

Chancen und Risiken beim Einsatz künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung in Arbeitsstätten

Jan Krüger¹

baua: Fokus

Bereits 16 Jahre sind vergangen, seit im menschlichen Auge ein neuer, blauempfindlicher Photorezeptor nachgewiesen werden konnte, der direkt mit der inneren Uhr des Menschen verbunden ist und damit das Potenzial besitzt Physiologie, Stimmung und Verhalten zu beeinflussen. Diese Erkenntnisse haben das Verständnis über die Bedeutung von Licht für die Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit für immer verändert. Offen ist bislang, wie diese Erkenntnisse in Anwendungsempfehlungen übersetzt werden können. Vor diesem Hintergrund wird im vorliegenden Artikel der derzeitige Erkenntnisstand zu Chancen und Risiken künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung zusammengetragen.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Chancen künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung	2
3	Risiken künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung	4
3.1	Einfluss auf psychische Gesundheit: Nebenwirkungen analog der Lichttherapie.....	4
3.2	Störungen des circadianen Systems.....	5
3.3	Nichtbeachtung interindividueller Unterschiede.....	7
3.4	Lichtdoping/Manipulation.....	8
3.5	Wechselwirkung unterschiedlicher nicht-visueller sowie visueller und nicht-visueller Lichtwirkungen	10
3.6	Einfluss künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung auf die Sicherheit bei der Arbeit.....	11
4	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	13
5	Literatur.....	14

1 Einleitung

Licht hat eine Doppelfunktion für den Menschen. Es ermöglicht einerseits das Sehen und ruft andererseits nicht-visuelle (melanopische) Wirkungen hervor. Diese werden in DIN SPEC 5031-100 als „durch Licht über die intrinsisch lichtempfindlichen Ganglienzellen (ipRGC) in der Netzhaut des Auges zusätzlich zur visuellen Wahrnehmung über das Auge vermittelten Wirkungen auf physiologische und psychologische Vorgänge im menschlichen Organismus“ definiert (DIN SPEC 5031-100:2015, S. 5).

¹Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Durch eine angemessene künstliche Beleuchtung in Arbeitsstätten soll die Sicherheit und der Schutz der Gesundheit von Beschäftigten gewährleistet werden (ArbStättV; ASR A3.4). Bei der Beleuchtung ist dem natürlichen Tageslicht Vorrang zu geben, ergänzt wird durch künstliche Beleuchtung. Neue energieeffiziente und intelligente Beleuchtungstechnologien auf dem Gebiet „künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung“ stellen die Frage nach Chancen und Risiken ihres Einsatzes, insbesondere bezogen auf die ausgelösten nicht-visuellen Wirkungen. Beispielsweise bieten Beleuchtungssysteme mit künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung die Chance Tageslichtmangel zu kompensieren und der inneren Uhr eine bessere Anpassung an die Tageszeit zu ermöglichen sowie Beschäftigte zu aktivieren und die Aufmerksamkeit zu erhöhen. Demgegenüber stehen zahlreiche offene Forschungsfragen, das Risiko von Gesundheitsbeschwerden (z. B. Schlafstörungen), aber auch ethische Fragestellungen (z. B. Lichtdoping/Manipulation von Beschäftigten).

Gegenwärtig werden Chancen und Risiken zur Anwendung künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung in der wissenschaftlichen Literatur hinsichtlich ihrer nicht-visuellen Wirkungen unterschiedlich diskutiert. In diesem Thesenpapier werden der aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisstand und offene Forschungsfragen zur Anwendung künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung zusammengestellt, wobei auf die Risiken ausführlicher eingegangen wird. Vertiefende Ausführungen zu den Chancen werden gegenwärtig vom DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL) NA 058-00-27 AA „Wirkung des Lichtes auf den Menschen“ erarbeitet.

2 Chancen künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung

These 1: Künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung ist mit positiven Effekten für Wohlbefinden und psychische Gesundheit verbunden.

Hinsichtlich der Wirkung des Lichtes auf Wohlbefinden und psychische Gesundheit, ist das natürliche Tageslicht aufgrund seiner stabilisierenden, synchronisierenden Wirkung für die innere Uhr von großer Bedeutung. Arbeitsstätten sollten auch deshalb möglichst mit ausreichendem Tageslicht beleuchtet werden. Von Bedeutung sind daher die nachfolgend genannten Trends, die diese positiven Effekte nicht allein auf die Wirkung des natürlichen Tageslichts zu beschränken scheinen. Danach kann auch künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung diese Synchronisation unterstützen.

Studien mit tragbaren Lichtexpositionsdetektoren belegen die Bedeutung der täglichen Lichtexposition für die psychische Gesundheit (Espiritu et al. 1994; Hubalek et al. 2010; Hubalek et al. 2006; Park et al. 2007; Rea et al. 2008; Scheuermaier et al. 2010; Smolders et al. 2013). Erkenntnisse zur Synchronisation und Stabilisierung der inneren Uhr mithilfe von Tageslicht deuten im Kontext der Arbeitsplatzgestaltung auf die Relevanz einer Sichtverbindung nach außen hin. Es wird darauf hingewiesen, dass das Tageslicht und die Sichtverbindung nach außen mit positiven Effekten für das Befinden verbunden sein können (Aries et al. 2015). Höhere tägliche Lichtmengen sind positiv mit Stimmung und Vitalität verbunden, geringere Beleuchtungsniveaus zeigen Tendenzen zu chronischer Müdigkeit. Eine ausreichende tägliche Tageslichtexposition hat einen indirekten positiven Einfluss auf das arbeitsbedingte Stressempfinden und die Arbeitszufriedenheit (Alimoglu and Donmez 2005).

These 2: Künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung hat positive Auswirkungen auf Schlafqualität, Einschlafdauer und Aufmerksamkeit am darauffolgenden Tag.

In zahlreichen Studien wird darauf aufmerksam gemacht, dass der individuellen Lichtexposition eine besondere Rolle für den Schlaf und die Aufmerksamkeit am darauffolgenden Tag zukommt (Kunz 2015). Es zeigt sich ein positiver Trend zwischen der Lichtexposition in den

Tagesstunden und der Schlafqualität bzw. Einschlafdauer (Hubalek, Brink and Schierz 2010; Mottram et al. 2011; Park, Kripke, Louis, Elliott, Klauber, Rex, Tuunainen and Langer 2007). Tendenziell können sich größere Lichtmengen am Tag positiv auf Stimmung, Schlaf und Befinden auswirken.

These 3: Künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung trägt zur Stärkung der Synchronisation des circadianen Systems bei.

Die tägliche Lichtexposition kann die Robustheit des circadianen Systems gegen Störungen durch Licht am Abend erhöhen, wobei mehr Licht am Tag die Melatonin-Suppression durch abendliches Licht reduzieren kann (Rufiange et al. 2007). Diese Erkenntnisse können aus Untersuchungen zur Wirkung der vorangegangenen Lichthistorie (light/photoc history) abgeleitet werden (Chang et al. 2011; Chang et al. 2013; Hebert et al. 2002; Münch et al. 2012; Owen and Arendt 1992; Smith et al. 2004).

These 4: Künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung ist mit Aktivierung und Steigerung kognitiver Leistungsfähigkeit sowie reduzierter Müdigkeit verbunden.

In Hinblick auf die Leistung bei der Arbeit belegt eine Vielzahl von Studien die akute aktivierende Wirkung von hellem und blau angereichertem Licht. Auch für die Überwindung der Phase reduzierter Aufmerksamkeit nach dem Aufstehen (Schlaftrunkenheit) konnte die Wirksamkeit von blau angereichertem Licht bestätigt werden (Gimenez et al. 2010; Kunz 2015; Santhi et al. 2013). Ergänzend dazu zeigt Vandewalle et al. (2009) in einer Review von Neuroimaging-Studien, dass die Wellenlänge, die Dauer und die Lichtintensität die Gehirnreaktionen auf kognitive Aufgaben modulieren. Dabei konnten die Reaktionen auf helles Licht hauptsächlich in Hirnregionen festgestellt werden, die mit Aufmerksamkeit assoziiert sind.

Bezüglich der Überführung der dargelegten Chancen in allgemeingültige Gestaltungsempfehlungen sowie Ableitung gesicherter Erkenntnisse sollte berücksichtigt werden, dass auch Studien existieren, bei denen keine Wirkungen von hellem, blau-angereichertem Licht festgestellt werden konnten (z. B. (Sletten et al. 2017; St Hilaire et al. 2017)). Beispielsweise konnte Segal keine Effekte von blauem Licht am Tag auf Aufmerksamkeit und kognitive Performance feststellen (Segal et al. 2016). Es ist zu betonen, dass wissenschaftliche Studien zu nicht-visuellen Lichtwirkungen, nicht ohne weiteres zusammengefasst bzw. generalisiert werden können. Die Ursachen dafür liegen in den unterschiedlichen Versuchsdesigns und der Berücksichtigung von Einflussfaktoren bzw. Störvariablen auf die Lichtwirkung.

Oft können Studien in ihrer Wirkung aufgrund unterschiedlicher Lichtexposition nicht zusammengefasst werden (unterschiedliche Intensität, Expositionsdauer, spektrale Zusammensetzung, Dynamik, Größe der leuchtenden Fläche).

Wichtige Faktoren für die Lichtwirkung betreffen die Berücksichtigung der privaten Lichtexposition und der individuellen circadianen Phase sowie das Level der Schlafdeprivation (Cajochen et al. 2000; Phipps-Nelson et al. 2003). Auch die sich im Alter verändernden, Transmissionseigenschaften der Augenmedien müssen einkalkuliert werden. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Effekte von künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung für verschiedene Arbeitsaufgaben unterschiedlich zu sein scheinen (Smolders and de Kort 2014).

Neuere Studien legen sogar Adaptationseffekte nahe, bei denen sich die spektrale Empfindlichkeit für nicht-visuelle Lichtwirkungen in Abhängigkeit der vorangegangenen Lichthistorie verändern kann (Gimenez et al. 2014).

Die nachfolgende Abbildung 1 fasst einige wirkungsbestimmende Faktoren zusammen. An dieser Stelle soll deutlich werden, dass jeder der benannten Faktoren die Wirkung beeinflussen kann und dass es für ein Wirksamwerden der Chancen auf ein Zusammenspiel verschiedenster Faktoren ankommt. Oft liegt das optimale Zusammenspiel der dargestellten Faktoren (Abbildung 1) nicht in der Hand der Arbeitgeber.

Nichtsdestotrotz deutet die Studienlage auf eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung der Beleuchtung als Ressource für Befinden und kognitive Leistung.

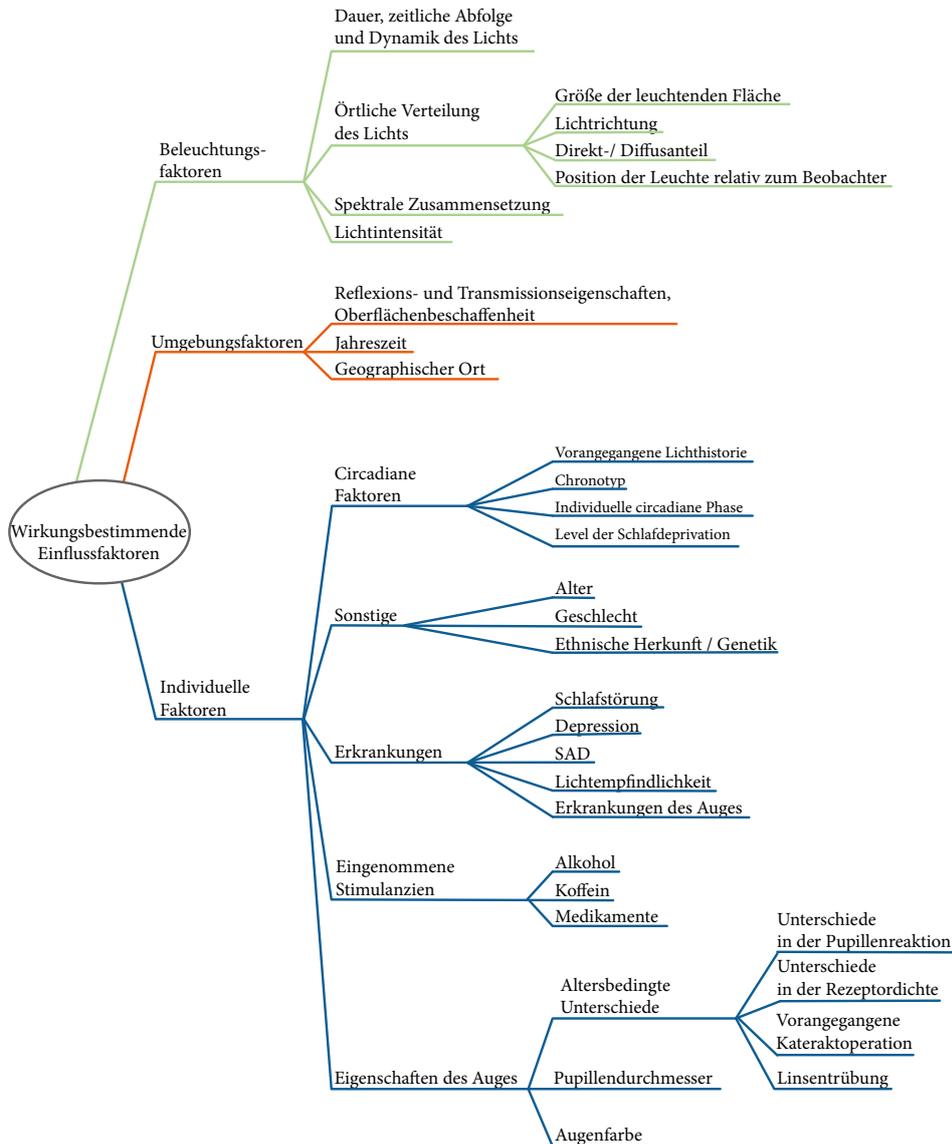


Abb. 1 Faktoren, welche die Wirkung künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung beeinflussen

3 Risiken künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung

3.1 Einfluss auf psychische Gesundheit: Nebenwirkungen analog der Lichttherapie

These 1: Anwendung künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung hat Nebenwirkungen analog der Lichttherapie.

Studien zur Lichttherapie belegen Nebenwirkungen wie Hypomanie, Einschlafprobleme, Kopfschmerzen, Augenbeschwerden, Gereiztheit und Übelkeit. Die Arousal-Theorie besagt, dass zwischen Arousal-Level und Verhaltensoutcomes wie der Arbeitsleistung ein umgedreht u-förmiger Zusammenhang bestehen kann (Yerkes and Dodson 1908). Beleuchtungsbedingungen, die über ein optimales Arousalmaß hinaus aktivieren, könnten als Stressoren wirken (Schierz 2002; Schierz and Krueger 2002; Veitch 2001) und sich negativ auf die psychische Gesundheit auswirken. Hinweise auf mögliche Zusammenhänge zwischen der Aktivierung mit hellem Licht und Stress ergeben sich aus Studien zur Lichttherapie, in denen von Hypomanie, Kopfschmerzen und Einschlafproblemen nach der Lichtanwendung berichtet wird. In einem Cochrane-Review zur Wirkung von Lichttherapie verweist Tuunainen et al. (2004) auf sieben Studien, in denen Hypomanie berichtet wurde. In zwei Fallstudien berichtet Schwitzer et al. (1990) von extremer Gereiztheit und aggressivem Verhalten nach der Lichtanwendung.

Da die Übertragbarkeit dieser Nebenwirkungen auf nicht-klinische Populationen bisher nicht geklärt ist, untersuchten Botanov and Ilardi (2013) sowie Kasper et al. (1990) die Wirkungen der Lichttherapie an einem Probandenkollektiv, welches repräsentativ für die gesunde Bevölkerung war. Beide kommen zu dem Erkenntnis, dass Nebenwirkungen nicht allein auf klinische Populationen reduziert werden können. Die Analysen von Botanov zeigten weiterhin einen signifikanten Effekt auf Faktoren des visuellen Diskomforts, wie Augenermüdung und Unschärfe sowie Nebenwirkungen wie Kopfschmerzen, Augenbeschwerden, Gereiztheit und Übelkeit. Die Autoren betonen, dass einige dieser Auswirkungen bereits nach einmaliger, 30-minütiger Lichtanwendung auftraten.

3.2 Störungen des circadianen Systems

3.2.1 Desynchronisation durch Licht in der Nacht

These 2: Künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung in der Nacht verursacht eine Desynchronisation des circadianen Systems vom natürlichen Tag-und-Nacht-Rhythmus.

Im Juni 2012 wurde vom Amerikanischen Medical Association House of Delegates eine Grundsatzerklärung über mögliche Zusammenhänge zwischen nächtlicher Lichtexposition und deren Auswirkungen auf die Gesundheit herausgegeben (Council on Science and Public Health 2012). Das Dokument trägt wissenschaftliche Hinweise zusammen, die verdeutlichen, dass die Lichtexposition in der Nacht mit einer Störung der circadianen Rhythmik verbunden ist.

Die vermuteten Zusammenhänge werden im Dokument von einer starken wissenschaftlichen Basis gestützt, wobei verschiedene Linien der Evidenz dargestellt werden. Zusammengefasst werden Ergebnisse aus Studien zur Unterdrückung des Dunkelhormons Melatonin, Studien über das Zusammenwirken von Licht und Schlaf, epidemiologische Studien zur Schichtarbeit und Krebsrisiko sowie Studien, welche die Genexpressionsebene betrachten (Stevens et al. 2013).

Von besonderer Bedeutung für den Arbeitsschutz ist der Umstand, dass Störungen der inneren Uhr mit zahlreichen Risiken verbunden sein können (Arble et al. 2010; Erren and Reiter 2009; Erren and Reiter 2013; Golombek et al. 2013; Kohyama 2011; Stevens, Brainard, Blask, Lockley and Motta 2013). Eine wesentliche Sorge bei der Lichtexposition in der Nacht betrifft das, mit Nachtschichtarbeit in Zusammenhang stehende, Krebsrisiko. Weitere Risiken betreffen Magen-Darm- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Fettleibigkeit, Diabetes, und psychische Erkrankungen wie Depression sowie Einflüsse auf das Genom und die Fertilität (Stevens, Brainard, Blask, Lockley and Motta 2013).

3.2.2 Störung des circadianen Systems durch Lichtenwendung am Tag

These 3: Die Anwendung künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung führt durch den stärkeren Lichtreiz im Vergleich zum natürlichen Tageslicht zur Entkopplung der circadianen Physiologie vom natürlichen Hell-Dunkel-Tagesrhythmus.

Neuere Untersuchungen zeigen, dass das circadiane System auf den stärksten Lichtreiz im Verlauf des Tages synchronisiert. Dieser Umstand zeigt sich beispielsweise in Untersuchungen von Roenneberg et al. (2007) oder Vetter et al. (2011). Die Untersuchungen von Vetter et al. (2011) demonstrieren, dass künstliches Licht mit einem hohen Blauanteil einen starken Zeitgeberreiz darstellt, der mit dem natürlichen Licht konkurrieren kann. Sie raten daher zu einem vorsichtigen Umgang mit künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung. Die Studie ergab, dass sich die innere Uhrzeit von Bürobeschäftigten ohne künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung (Leuchtstofflampe, 4000 K) synchron an die jahreszeitliche Veränderung der Sonnenaufgangszeit anpasste. Im Kontrast dazu fixierten sich die inneren Uhren der Gruppe mit biologisch wirksamer Beleuchtung (Leuchtstofflampe, 8 000 K) auf das statische Regime der Beleuchtungsanlage im Büro.

Die Studie verdeutlicht, dass die Anpassung der inneren Uhr an jahreszeitliche, saisonale Veränderungen (circannuale Rhythmen) durch künstliches Licht mit einem hohen Blauanteil behindert werden kann. Gleichzeitig zeigt die Studie, dass zwischen einer Stabilisierung der inneren Uhr mit gleichzeitiger Entkopplung von natürlichen, jahreszeitlichen Veränderungen und einer Stabilisierung mit Angleichung an natürliche, jahreszeitliche Veränderungen unterschieden werden muss. Konsequenzen für Physiologie und Verhalten sind für die Entkopplung von saisonalen Rhythmen bisher unbekannt.

Die nachfolgend dargestellten Studien geben Hinweise darauf, dass tatsächlich Anpassungen des circadianen Systems an saisonale Veränderungen der Photoperiode stattfinden. Untersuchungen zur saisonalen Anpassung des circadianen Systems reichen bereits 180 Jahre zurück (Roenneberg 2004). Saisonale Rhythmen konnten insbesondere beim Schlaf und der Körpertemperatur beobachtet werden (Foster and Roenneberg 2008; Wey et al. 2012). Weitere Hinweise auf eine saisonale Schlafrhythmik geben Paul (2015) und Kantermann (2007), sie stellten signifikante Unterschiede der Schlafdauer zwischen den Jahreszeiten fest, wobei die Schlafdauer im Sommer im Vergleich zum Winter reduziert sei. Darüber hinaus war Cajochen in der Lage zu zeigen, dass subjektive und objektive Parameter des Schlafs analog zu den Mondphasen variieren (Cajochen et al. 2013). Eine neuere Neuroimaging-Studie legt sogar nahe, dass kognitive Hirnfunktionen wie Daueraufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnisleistung saisonalen Veränderungen unterworfen sind (Meyer et al. 2016).

Eng verbunden mit den geschilderten Problemstellungen ist die Frage nach der benötigten Zeitgeberstärke sowie der Notwendigkeit einer ganztägigen Aktivierung mit hohen Beleuchtungsstärken und ausgeprägtem Blauanteil. Beispielsweise untersuchte Wright et al. (2001) die Anpassungsfähigkeit des circadianen Systems bei geringen Zeitgeberstärken (1,5 lx in Blickrichtung). Er stellte fest, dass eine kerzenähnliche Beleuchtungsstärke zur Synchronisation ausreichend ist. Demnach kann auch gedimmtes Licht die innere Uhr auf einen 24-Stunden-Tag synchronisieren.

These 4: Eine irreguläre morgendliche Anwendung von künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung im Winter erzeugt größeren Synchronisationsaufwand und eine stärkere Belastung des circadianen Systems.

Vorrangiges Ziel der künstlichen, biologisch wirksamen Beleuchtung während der Tagesstunden ist die Stabilisierung der inneren Uhr sowie Aktivierung und Überwindung der Schlaf-

trunkenheit. Dazu werden Beschäftigte in den Morgenstunden mit blau-angereichertem Licht exponiert. Die Blauanteile der Beleuchtung erzeugen ein starkes Signal zur Synchronisation, welches der inneren Uhr den Beginn des Tages (Sonnenaufgang) signalisiert. Häufig finden in Arbeitsstätten flexible Arbeitszeitregelungen Anwendung, sodass die Synchronisation (besonders im Winter) durch die künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung an verschiedenen Tagen zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgen könnte. Die innere Uhr muss dabei mit einem irregulären Zeitgeberregime zurechtkommen. Infolge der unterschiedlichen täglichen Anwendungszeitpunkte könnte die innere Uhr in einen ständigen Anpassungsprozess gezwungen werden, welcher stärkere Ausgleichsbewegungen und damit eine größere Belastung des circadianen Systems zur Folge haben könnte (Van Someren and Riemersma-Van Der Lek 2007). Dieser Anpassungsprozess würde zwar ebenfalls bei Beleuchtung mit geringerer Zeitgeberstärke stattfinden (z. B. mit warmweißer Bürobeleuchtung), allerdings in geringerem Maße.

These 5: Künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung am Nachmittag und in den frühen Abendstunden verursacht Störungen des circadianen Systems.

Aus Studien zur Schichtarbeit ist bekannt, dass die Lichtexposition in der Nacht mit nachteiligen Wirkungen für die Gesundheit verbunden ist (Stevens, Brainard, Blask, Lockley and Motta 2013). Diese desynchronisierende Wirkung kann jedoch nicht allein auf die Beleuchtung in der Nacht reduziert werden, sondern ist in geringerem Maße auch auf die Beleuchtung am frühen Abend übertragbar. Ergebnisse von Santhi et al. (2012), in denen Versuchspersonen am Abend unterschiedlichen Lichtbedingungen ausgesetzt waren, zeigten, dass auch die Lichtexposition am Abend die Melatoninausschüttung unterdrückt und den Schlafrythmus verschiebt. Demnach kann künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung für Beschäftigte, die ihre Tätigkeit in den frühen Abend ausdehnen (z. B. 18 – 20 Uhr), Einfluss auf die innere Uhr haben. Untersuchungen von Burgess et al. (2013) belegen, dass auch kleine Störungen des circadianen Systems die Leistung beeinflussen können. Weiterhin ist bekannt, dass die aktivierende Wirkung von blauem Licht über einen gewissen Zeitraum anhält, auch wenn die Lichtexposition nicht mehr stattfindet (Kunz 2015; Münch, Linhart, Borisuit, Jaeggi and Scartezzini 2012). Untersuchungen von Sletten (2009) zeigen, dass die aktivierende Wirkung einer 2-stündigen Lichtexposition, selbst fünf Stunden nach Beendigung der eigentlichen Lichtintervention, nachweisbar war.

3.3 Nichtbeachtung interindividueller Unterschiede

These 6: Die Nichtbeachtung interindividueller Unterschiede bei der Anwendung von künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung kann Störungen der inneren Uhr begünstigen.

Eine besondere Herausforderung bei der Anwendung künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung stellt die Berücksichtigung interindividueller Unterschiede dar. In einem Arbeitsraum mit mehreren Beschäftigten können sich z. B. Arbeitsaufgaben (Anforderungen an die Schleistung) und circadiane Phase (Unterschiede der inneren Uhr, individuelle Laufzeit (τ) der Beschäftigten unterscheiden. Daher müssten auch unterschiedliche Lichtszenarien gleichzeitig ablaufen können, um eine beabsichtigte Lichtwirkung hervorrufen zu können. Eine räumliche Trennung ist oftmals schwierig. Die Nichtbeachtung dieser interindividuellen Unterschiede kann Störungen der inneren Uhr hervorrufen. Duffy und Czeisler (2009) stellten fest, dass die Laufzeiten der inneren Uhren von Person zu Person unterschiedlich sind und somit jede Person eine individuelle Lichtexposition zur Stabilisierung der inneren Uhr benötigt. Diesen Sachverhalt demonstrierten Duffy und Wright (2005) in einer Studie.

Sie analysierten die individuellen Laufzeiten (τ) der inneren Uhren von 21 Versuchspersonen und leiteten daraus die, zum Erhalt der Synchronisation benötigten, individuellen Lichtexpositionen ab. Bei der Analyse zeigte sich, dass fünf Versuchspersonen eine individuelle Lauf-

zeit der inneren Uhr von weniger als 24 Stunden ($\tau < 24$ h) besaßen, wobei die anderen 16 Versuchsteilnehmer eine individuelle Laufzeit von mehr als 24 Stunden aufzeigten ($\tau > 24$ h). Duffy und Wright machen darauf aufmerksam, dass die inneren Uhren dieser fünf Versuchspersonen durch eine abendliche Lichtanwendung verlangsamt werden müssten, um sie auf einen 24-h-Tag anzupassen (biologisch wirksames Licht am Abend verlangsamt die innere Uhr/biologisch wirksames Licht am Morgen beschleunigt die innere Uhr). In der Folge würden diese fünf Personen von einer abendlichen Lichtexposition profitieren. Hingegen könnte künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung am Morgen bei diesen Probanden Störungen der inneren Uhr hervorrufen (Duffy and Wright 2005).

Auch Andersen kommt zu dem Erkenntnis, dass ca. 25 % der Bevölkerung für die Synchronisation eine komplett gegensätzliche Lichtanwendung (Licht am Abend vs. Licht am Morgen) benötigen als die anderen 75 % (Andersen et al. 2012).

Aus Perspektive des Arbeitsschutzes kann festgehalten werden, dass eine fehlende Berücksichtigung interindividueller Unterschiede bei der Anwendung künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung am Morgen einen Teil der Beschäftigten benachteiligen könnte.

Bei der Diskussion, um die Berücksichtigung individueller Unterschiede wird häufig das Argument angeführt, dass biologisch wirksame Beleuchtung in den Tagesstunden denselben Effekt hätte wie das Tageslicht, welches letztendlich ebenfalls keine „Rücksicht auf individuelle Unterschiede nehme“. Diese Ansicht ist aus zweierlei Gründen zweifelhaft. Einerseits darf die biologisch wirksame Beleuchtung nicht mit dem Tageslicht gleichgestellt werden. Das Tageslicht weist Eigenschaften auf (z. B. Dynamik, Intensität, Spektrum, Richtung, Gerichtetheit/Diffusität), welche von der künstlichen Beleuchtung lediglich in einzelnen Facetten nachgeahmt werden können. Andererseits muss die Interaktion mit sozialen Einflüssen (z. B. der Arbeitszeit) berücksichtigt werden. Beispielsweise kann spekuliert werden, dass der individuelle Chronotyp ohne den sozialen Zwang der Arbeitszeit den Zeitpunkt der Tageslichtexposition durch sein Verhalten selbst regulieren würde (z. B. spätere Tageslichtexposition durch späteres Aufstehen beim späten Chronotyp). Hingegen könnte die Anwendung biologisch wirksamer Beleuchtung am frühen Morgen, zum Arbeitsbeginn, mögliche nachteilige Effekte beim späten Chronotyp verstärken. Durch die selbstgewählten Schlafenszeiten kreiert der individuelle Chronotyp ein individuelles Lichtprofil.

3.4 Lichtdoping/Manipulation

3.4.1 Koffeinanalogie

In der Literatur werden zu aktivierenden Effekten durch künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung (z. B. blauem Licht) vergleichende Betrachtungen hinsichtlich ihrer gesundheitlichen Auswirkungen zur Aktivierung durch Koffein beschrieben.

Mit dem Wissen über eine vergleichbare Wirkung von blauem Licht und Koffein sowie der Möglichkeit der physischen Leistungssteigerung, z. B. bei Athleten, ist der Gedanke des Lichtdopings bei Beschäftigten in Arbeitsstätten naheliegend. Zu bedenken ist bei diesem Vergleich die Tatsache, dass Arbeitgeber den Zeitpunkt und die Dauer der Lichtexposition festlegen können, wohingegen Beschäftigte bei der Koffeinnahme selbst entscheiden.

Aus Perspektive des Arbeitsschutzes muss eine intransparente Aktivierung von Beschäftigten durch blaues Licht mit dem Ziel, höhere Arbeitsleistungen zu erzielen, vermieden werden.

These 7: Bei der Aktivierung mit künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung treten vergleichbare Nebenwirkungen wie bei der Aktivierung mit Koffein auf.

Ziel künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung kann es sein (DIN SPEC 67600:2013 2013), potenzielle Leistungsverluste beispielsweise am frühen Morgen (Schlaftrunkenheit; Santhi, Groeger, Archer, Gimenez, Schlangen and Dijk 2013) oder am frühen Nachmittag (Mittagstief; Monk 2005) zu kompensieren. Chellappa (2011) macht darauf aufmerksam, dass eine zweistündige Lichtexposition mit handelsüblichen 6500-K-Leuchtstofflampen einen ähnlichen Effekt auf die Daueraufmerksamkeit hervorrufen kann, wie die Koffeineinnahme bei koffeempfindlichen Personen. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Beaven und Ekström (2013). Sie verglichen die Wirkung von 240 mg Koffein mit der aktivierenden Wirkung von einer Stunde Blaulicht (40 lx). Die Studie stellt vergleichbare aktivierende Effekte von Koffein und blauem Licht fest, wobei blaues Licht die Wirkung von Koffein in psychomotorischen Tests übertraf. Da der Wirkungspfad für die aktivierende Wirkung von hellem Licht bisher nicht bekannt ist, können ähnliche gesundheitliche Nebenwirkungen analog denen vom Koffein (z. B. Ängstlichkeit (Heatherley et al. 2005), zitternde Hände (Peeling and Dawson 2007)) nicht ausgeschlossen werden. Weiterhin wurden bei der Kombination von Koffein und blauem Licht additive Effekte beobachtet, welche in einer verstärkten Aktivierung resultierten.

These 8: Die Kombination von künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung mit Koffein führt zu Überaktivierung.

Die Ergebnisse von Beaven und Ekström deuten darauf hin, dass die Kombination von blauem Licht und Koffein das optimale Aufmerksamkeitsmaß übersteigen und eine Überaktivierung hervorrufen kann, welche sich in einem Leistungsabfall manifestiert. Neuere Studien zeigen außerdem, dass Koffein das Potenzial besitzt, die Lichtempfindlichkeit des circadianen Systems zu erhöhen (DeBoer 2015; van Diepen et al. 2014).

These 9: Künstliches, biologisch wirksames Licht führt zur Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit.

Nach Beaven und Ekström besteht die Möglichkeit der Lichtanwendung mit dem Zweck der Leistungssteigerung von professionellen Sportlern (Doping). Licht kann eine stärkere Wirkung auf das circadiane System ausüben als jedes Medikament (Czeisler 2013). Auch Kantermann (2012) macht darauf aufmerksam, dass blaues Licht das Potenzial besitzt, physische Leistung zu erhöhen.

3.4.1 Fehlendes Bewusstsein für Eingriffe in das circadiane System

These 10: Die Entscheidungsgewalt der Arbeitgeber über Zeitpunkt und Dauer einer Aktivierung führt zu Akzeptanzproblemen bei Beschäftigten gegenüber der Beleuchtung.

Durch den Umstand, dass Arbeitgeber den Zeitpunkt und die Dauer einer aktivierenden Lichtexposition festlegen können, werden Beschäftigte in ihrer Autonomie eingeschränkt, was in der Folge zu einer negativen Einstellung gegenüber der Beleuchtung führen kann. Es findet eine Bewertung im Sinne einer Attribuierung (subjektive Zuschreibung von Ursachen) statt, welche sich negativ auf die Gesundheit des Betroffenen auswirken kann (Schierz and Krueger 2002). So kann die von einer Person negativ attribuierte Beleuchtung ständig die Aufmerksamkeit auf sich ziehen und negative Gefühle erzeugen (Cakir et al. 2011).

These 11: Den Arbeitgebern fehlt die Wirkungskontrolle über beabsichtigte nicht-visuelle Lichtwirkungen.

Werden Beleuchtungsanlagen in Arbeitsstätten nach Empfehlungen der DIN SPEC 67600 geplant und umgesetzt, so werden in der Regel die im Abschnitt 4 der Spezifikation dargelegten Zielgrößen verfolgt (z. B. Stabilisierung des individuellen circadianen Rhythmus, Stärkung der

Amplitude der biologischen Uhr usw.). Ein Risiko stellt hierbei die fehlende Wirkungskontrolle dar. Dem Arbeitgeber stehen keine Instrumentarien zur Verfügung, um die Erreichung der in DIN SPEC 67600 genannten Zielgrößen zu überprüfen. Weiterhin soll an dieser Stelle nochmals an die vielfältigen wirkungsbestimmenden Einflussfaktoren aus Abbildung 1 erinnert werden, die oft nicht vom Arbeitgeber beeinflusst werden können.

These 12: Den Beschäftigten fehlt ein direktes Bewusstsein für Eingriffe in das circadiane System.

Eine weitere Besonderheit der biologisch wirksamen Lichtenwendung besteht darin, dass sich Beschäftigte z. B. einer Leistungssteigerung selbst nicht bewusst werden bzw. diese nicht direkt wahrnehmen können. Dies kann bei individueller Steuerung zu Fehlanwendung bzw. falschen Einschätzungen führen, welche mit Risiken verbunden sein können.

Fehlendes Wissen des Beschäftigten über Wirkungszusammenhänge und physiologische Mechanismen können weiterhin dazu führen, dass mögliche Gesundheitsbeschwerden (z. B. Schlafstörungen) nicht in den Zusammenhang mit den Beleuchtungsbedingungen in der Arbeitsstätte gebracht werden. Dieser Umstand wird durch die Trägheit der inneren Uhr begünstigt, durch welche die Auswirkungen einer unsachgemäßen Lichtenwendung verspätet, teilweise erst Tage später, auftreten können.

Es kann festgehalten werden, dass akute Lichtwirkungen für Beschäftigte nicht unmittelbar erlebbar sind und Langzeitwirkungen in ihren Kausalitäten nicht ohne Weiteres abgeschätzt werden können, dies belegt auch die Einzelfallstudie von Doljansky (2005).

3.5 Wechselwirkung unterschiedlicher nicht-visueller sowie visueller und nicht-visueller Lichtwirkungen

These 13: Die Nichtbeachtung von Zielkonflikten zwischen unterschiedlichen nicht-visuellen Lichtwirkungen und zwischen visuellen und nicht-visuellen Lichtwirkungen ist mit Risiken für die Gesundheit verbunden.

a) Zielkonflikte bei unterschiedlichen nicht-visuellen Lichtwirkungen: Hinsichtlich der nicht-visuellen Wirkungen muss zwischen akuten Effekten, wie der plötzlichen Aktivierung, und langfristigen Effekten, wie der Verschiebung der inneren Uhr, unterschieden werden. Mit Hilfe der biologisch wirksamen Beleuchtung besteht prinzipiell die Möglichkeit, kurzfristige Wirkungen separat von langfristigen Effekten zu steuern (z. B. akute Aktivierung ohne Verschiebung der inneren Uhr). Jedoch kann während der Lichtenwendung nicht kontrolliert werden, inwiefern die gewünschte Aktivierung mit einer nicht gewünschten Verschiebung der circadianen Phase einhergeht. Erhöhtes Risiko für Gesundheitsbeschwerden besteht demnach dort, wo ein Zielkonflikt zwischen unterschiedlichen Lichtwirkungen besteht (z. B. Aktivierung vs. Phasenverschiebung).

b) Zielkonflikte bei visuellen und nicht-visuellen Lichtwirkungen: Ein weiteres Anwendungsszenario welches einen Zielkonflikt verdeutlicht, betrifft die kurzzeitige Erhöhung der Beleuchtungsstärke in der Nachtschicht, um eine Arbeitsaufgabe mit anspruchsvollen Sehansforderungen ausführen zu können. Die kurzzeitige Erhöhung sollte dabei nicht mit einer Verschiebung der circadianen Phase einhergehen.

These 14: Die Planung von vertikalen Beleuchtungsstärken für die Dimensionierung von künstlichen, biologisch wirksamen Beleuchtungsanlagen beeinflusst lichttechnische Güte-merkmale und erzeugt Wechselwirkungen mit Sehleistung und Sehkomfort.

Zur Beschreibung von Beleuchtungsanforderungen für die nicht-visuellen Lichtwirkungen werden in der Regel vertikale Beleuchtungsstärken am Auge verwendet. Die Planung von vertikalen Beleuchtungsstärken in Augenhöhe beeinflusst gleichermaßen lichttechnische Güteerkmale wie Lichtrichtung/Schattigkeit, Gleichmäßigkeit, Blendung und horizontale Beleuchtungsstärken. Vertikale Beleuchtungsstärken in Augenhöhe können mit den genannten Güteerkmale in Wechselwirkung treten und sich auf Sehleistung und Sehkomfort auswirken. Das Auftreten von Augenermüdung bei langfristiger Anwendung künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung ist bisher nicht untersucht. Zur Unterstützung nicht-visueller Lichtwirkungen können Beleuchtungslösungen mit vertikal leuchtenden Flächen (z. B. virtuelle Fenster) oder einem steuerbaren Direkt-/Diffusanteil zur Anwendung kommen. Unbekannt sind in solchen Anwendungsfällen Wechselwirkungen mit Bildschirmarbeit. Vertikal leuchtende Flächen können Blendung und Schleierreflexionen auf Bildschirmen hervorrufen. Dabei kommt es zur Kontrastreduktion, Ablenkung und ungewollten Akkommodationswechseln (Boyce 2003). Demgegenüber sollte berücksichtigt werden, dass Beleuchtung mit hohem Diffusanteil einen hohen Grad an Gleichmäßigkeit hervorruft. Sato et al. (1989) weist darauf hin, dass monotone und triste Beleuchtung zu Stress führen kann und die Aufmerksamkeit beeinflusst. Aus Untersuchungen mit fensterlosen Kontrollräumen ist bekannt, dass die Variabilität der Beleuchtungsbedingungen einen wichtigen psychologischen Aspekt darstellt, welcher Vigilanz entgegenwirken kann (Sato, Inui, Nakamura and Takeuchi 1989). In Ergänzung dazu adressiert Tralau weitere Fallstricke bei der Planung und Realisierung nicht-visueller Lichtwirkungen in der Praxis, beispielweise Farbunterschiede bei Raumübergängen oder zwischen unterschiedlichen Leuchten eines Raumes (Tralau 2014).

These 15: Strategien zur Dynamisierung von künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung sind in ihrer Wirkung bislang kaum untersucht.

Offen ist bisher auch die Frage, wie die vielfältigen technischen Möglichkeiten zur dynamischen Veränderung von künstlicher Beleuchtung eingesetzt werden können. Unklar ist beispielsweise, nach welchen Algorithmen das Licht dynamisiert werden soll (z. B. Unterstützung des Mittagstiefs durch Reduzierung von Blauanteilen oder Bekämpfung des Mittagstiefs mit höheren Blauanteilen). Forschungsbedarf besteht, weil das Erreichen der gewünschten Wirkungen mit den in der Anwendung befindlichen Lichtszenarien meistens nicht untersucht und nachgewiesen wird. Dies gilt ebenso für die Störwirkung dynamischen Lichts. Ähnlich wie bei der psychologischen Blendung geht es hierbei um die Frage, wie weit Beschäftigte durch veränderliches Licht von ihrer eigentlichen Sehaufgabe abgelenkt werden können und ob dadurch ein erhöhtes Unfallrisiko entsteht. Auch in der DIN EN 12464-1:2011 wird zur „Veränderlichkeit von Licht“ darauf hingewiesen, dass Richtwerte für die Variationsbandbreite noch zur Diskussion stehen.

These 16: Das Wirkpotenzial von natürlichem Tageslicht ist nicht mit dem von künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung gleichzusetzen.

Dem Arbeitsstättenrecht liegt zu Grunde, dass natürliches Tageslicht nicht mit künstlicher Beleuchtung ersetzt werden kann, dies gilt ebenso für die künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung. Vor diesem Hintergrund dürfen virtuelle Fenster oder tageslichtsimulierende Decken nicht als Tageslichtersatz angesehen werden, auch wenn diese die Nachbildung separater charakteristischer Eigenschaften des natürlichen Lichts möglich machen.

3.6 Einfluss künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung auf die Sicherheit bei der Arbeit

These 17: Künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung beeinflusst die Sicherheit bei der Arbeit.

Neben den gesundheitsbezogenen und ethischen Aspekten, die mit der gezielten Anwendung der biologisch wirksamen Beleuchtung verknüpft sein können, sollten auch eventuelle Einflüsse auf die Sicherheit bei der Arbeit nicht unberücksichtigt bleiben. Besonders deutlich wird der Einfluss des circadianen Systems bei Müdigkeit, Aufmerksamkeit, kognitiver Leistung und dem Schlaf. Hierbei handelt es sich um sicherheitsrelevante Verhaltensoutcomes, die mit dem Störfall- und Unfallgeschehen in Verbindung stehen können.

Zunächst wird auf Laboruntersuchungen verwiesen, welche verdeutlichen, dass kognitive Leistungsparameter eine starke Verknüpfung zum circadianen System aufweisen. Aufgrund der Tatsache, dass von Labor-basierten Müdigkeitsmessungen keine unmittelbaren Rückschlüsse auf reale Sicherheitsoutcomes in der Praxis gemacht werden können, werden in einer weiteren Argumentationsstufe praxisbezogene Studien in Bezug genommen, welche deutliche Hinweise auf die Beteiligung der circadianen Rhythmik am Unfallgeschehen geben. Diese unterschiedlichen Argumentationslinien (Laboruntersuchungen mit objektiven Leistungsmessungen, Studien mit Selbstauskünften und Fragebögen zu sicherheitsbezogenen Verhaltensaspekten sowie Unfallanalysen aus der Praxis) verdeutlichen die enge Verknüpfung von Sicherheit und circadianem System, welche durch biologisch wirksame Beleuchtung sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden kann. Ein Eingriff in das circadiane System durch biologisch wirksame Beleuchtung wird daher mit großer Wahrscheinlichkeit Auswirkungen auf sicherheitsrelevante Verhaltensoutcomes haben. Die folgenden Beispiele belegen diese Zusammenhänge zwischen circadianem System und Sicherheit bei der Arbeit.

Der Einfluss des circadianen Systems auf Müdigkeit und Aufmerksamkeit lässt sich besonders mit dem Einsatz von Instrumenten zur Erhebung des subjektiven Befindens (z. B. Müdigkeitsskalen) nachweisen (Tkachenko et al. 2017). Bei kontinuierlicher Erhebung über den Tag zeigen sich circadiane Rhythmen mit ausgeprägten Aufmerksamkeitstiefs (Van Dongen and Dinges 2005).

Hinsichtlich kognitiver Leistungsparameter konnte mit objektiven Tests in Laboruntersuchungen gezeigt werden, dass die Leistung bei bestimmten standardisierten Tests, wie der Psychomotor-Vigilanz-Aufgabe, Such- und Detektionsaufgaben, Sortieraufgaben, logischem Denken, sowie der Ablesegenauigkeit von Instrumenten mit Markern der circadianen Phase korreliert (Tkachenko, Spaeth, Minkel and Dinges 2017). Gestützt werden diese Erkenntnisse durch Neuroimaging-Studien, in denen gezeigt werden konnte, dass Hirnreaktionen vom circadianen System beeinflusst werden (Vandewalle, Maquet and Dijk 2009).

Die Verknüpfung des Schlafes mit dem circadianen System wird durch das „two-process model of sleep regulation“ (Borbely 1982; Borbely et al. 2016) erklärt. Das Modell beschreibt die Überlagerung des circadianen Rhythmus der Schlafneigung mit dem, bei andauernder Wachheit linear ansteigenden, homöostatischen Schlafdruck. Das Modell ist in zahlreichen Laborstudien zur Ermüdung und Leistung zur Anwendung gekommen und konnte in Felduntersuchungen nachgewiesen werden.

Neben dem Einfluss des circadianen Systems auf Müdigkeit, Aufmerksamkeit, kognitive Leistung und Schlaf in Laboruntersuchungen spiegeln sich mögliche Zusammenhänge zwischen circadianem System und Sicherheit aber auch in der Praxis. Besonders deutlich werden die Auswirkungen dieser sicherheitsrelevanten Verhaltensoutcomes auf das Unfallgeschehen in Arbeitsumgebungen, in denen kurze Aufmerksamkeitsdefizite zu unmittelbaren Schäden führen können (z. B. Schienenverkehr, Kraftfahrt, Luftfahrt, Gesundheitswesen). Retrospektive Analysen verdeutlichen, dass Unfälle in den genannten Bereichen, sich besonders zu Zeitpunkten circadianer Aufmerksamkeitstiefs (z. B. nachts, morgens und am frühen Nachmit-

tag) ereignen (Williamson et al. 2011). Verschiedene Autoren waren in der Lage ausgeprägte circadiane Rhythmen in der Unfallhäufigkeit nachzuweisen (Folkard et al. 2006; Mitler et al. 1988).

Weiterhin deuten Studien, welche die Auswirkungen der Zeitumstellung auf das Unfallgeschehen untersucht haben, auf eine müdigkeitsbedingte Erhöhung des Unfallrisikos nach der Frühjahrszeitumstellung (Varughese and Allen 2001).

Insgesamt deuten auch diese Ergebnisse auf einen Einfluss des circadianen Systems auf die Sicherheit. Wohlgemerkt sind circadiane und schlafbezogene Mechanismen nicht die einzigen Einflussfaktoren, die Müdigkeit und Leistung beeinflussen und damit Auswirkungen auf die Sicherheit haben können. Neben circadianen Effekten, Schlafhomöostase, der Natur der Arbeitsaufgabe und individuellen Unterschieden spielen vielfältige weitere Faktoren eine entscheidende Rolle.

Dennoch zeigt die Anwendung von biomathematischen/circadianen Alertness-Management-Modellen im Risiko- und Safetymanagement von Unternehmen die Bedeutung dieser Wirkungen (Caldwell et al. 2008; Rosekind et al. 2002). Beispielsweise kommen zur Planung sicherer Arbeitszeitregimes in Risikobranchen wie der Luftfahrt „fatigue management programs“ (AS 4360, ISO 31000:2009) zum Einsatz, in denen auch circadiane Effekte berücksichtigt werden (Dawson et al. 2016; Dawson et al. 2011).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zahlreiche Studien belegen die Bedeutung von künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung für die Gesundheit von Beschäftigten. Die damit verbundenen Chancen und Risiken sind von hoher Relevanz für den Arbeitsschutz und die Gestaltung der Lichtumgebung. Daher sollten diese bei der Normung und Regelsetzung berücksichtigt werden. Neben den Chancen und Risiken für Physiologie und Verhalten sind oft auch ethische Fragestellungen, wie mögliches Lichtdoping bzw. Manipulation von Beschäftigten, zu berücksichtigen. Eine intransparente, willkürliche Aktivierung von Beschäftigten mit dem Hintergrund, höhere Arbeitsleistungen zu erzielen, muss ausgeschlossen werden.

Im KAN-Positionspapier zum Thema künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung und Normung (KAN 2016) wird darauf aufmerksam gemacht, dass bisher keine ausreichend gesicherten Erkenntnisse im Bereich künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung vorliegen, um konkrete Anforderungen an die Beleuchtung von Arbeitsstätten festlegen zu können. Eine große Zahl neuer Erkenntnisse ist noch nicht abschließend bewertet. Die Risikobewertung kann mit der technologischen Entwicklung nicht in erforderlichem Maße mithalten. Diese Sachlage kann aus den Inhalten der vorausgegangenen Abschnitte bestätigt werden.

In der wissenschaftlichen Community vertreten anerkannte Experten die Ansicht, dass der aktuelle Wissensstand keine konkreten Planungs- und Anwendungsempfehlungen zulässt (Boyce 2016; Veitch 2011). Auch die internationale Beleuchtungskommission (CIE) teilt die Auffassung einer bisher unzureichenden Wissensbasis (CIE 2015) macht aber gleichzeitig darauf aufmerksam, dass zu einigen Aspekten bereits Konsens besteht. Generelle Einigkeit besteht zu den Einflussfaktoren der Beleuchtung auf die nicht-visuellen Wirkungen. Diese Einflussfaktoren umfassen Spektrum, Intensität, Dauer, Timing, zeitliche Abfolge der Lichtintervention sowie vorangegangene Lichthistorie. Ein aktueller technischer Report der CIE fasst den derzeitigen Wissensstand zusammen und zeigt Wissenslücken auf, welche aus Sicht

der Kommission für die Einführung von konkreten Beleuchtungsempfehlungen geschlossen werden müssen, um eine sichere und förderliche Nutzung des Lichtes zu unterstützen (CIE 218:2016). Im Report werden 28 Forschungsfragen aufgeworfen.

Das Thesenpapier verdeutlicht, dass die Bewertung von Chancen und Risiken aufgrund zahlreicher Wissenslücken zum aktuellen Zeitpunkt schwierig ist. Dennoch lassen sich erste Gestaltungsansätze ableiten, die bei Normungsvorhaben zur biologisch wirksamen Beleuchtung auf nationaler und internationaler Ebene eingebracht werden können. Grundprinzipien dieserart betreffen z. B. die Vermeidung von Störungen der inneren Uhr durch intensives blaues Licht am Abend und in der Nacht oder die Anpassung der Lichtexposition an den Kontext der Arbeitszeit (richtiges Licht zur richtigen Zeit).

Nicht zuletzt nutzt die BAuA die zahlreichen Forschungsergebnisse für die proaktive Beratung des BMAS und im Rahmen der Mitwirkung im Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA) zur Fortentwicklung des technischen Regelwerkes. Aktuell erarbeitet ein neu gegründeter Arbeitskreis „Künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung“ ein internes Informationspapier zur Beratung des ASTA. Darüber hinaus sind die Erkenntnisse des Thesenpapiers bei der Bildung einer gemeinsamen deutschen Arbeitsschutzposition eingeflossen, welche im „KAN-Positionspapier zum Thema künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung und Normung“ (KAN 2015; KAN 2016) dargelegt ist.

5 Literatur

ALIMOGLU, M. K. AND L. DONMEZ: Daylight exposure and the other predictors of burn-out among nurses in a university hospital. *International Journal of Nursing Studies*, 7 2005, 42(5), 549-555.

ANDERSEN, M., J. MARDALJEVIC AND S. W. LOCKLEY: A framework for predicting the non-visual effects of daylight - Part I: photobiologybased model. *Lighting Research and Technology*, 2012, 44, 37-53.

ARBLE, D. M., K. M. RAMSEY, J. BASS AND F. W. TUREK: Circadian disruption and metabolic disease: Findings from animal models. *Best Practice and Research Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2010, 24, 785-800.

ARBSTÄTTV Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV). *Bundesgesetzblatt*, 2016, 2681.

ARIES, M. B. C., M. P. J. AARTS AND J. VAN HOOFF: Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment. *Lighting Research and Technology*, February 1, 2015 2015, 47(1), 6-27.

ASR A3.4 Technische Regel für Arbeitsstätten - Beleuchtung. *Gemeinsames Ministerialblatt*, 2011, 16, 303-318.

BEAVEN, C. M. AND J. EKSTRÖM, A.: comparison of blue light and caffeine effects on cognitive function and alertness in humans. *Plos one*, 2013, 8(10), e76707.

BORBELY, A. A.: A two process model of sleep regulation. *Hum Neurobiol*, 1982, 1(3), 195-204.

BORBELY, A. A., S. DAAN, A. WIRZ-JUSTICE AND T. DEBOER: The two-process model of sleep regulation: A reappraisal. *J Sleep Res*, 2016, 25(2), 131-143.

BOTANOV, Y. AND S. S. ILARDI: The acute side effects of bright light therapy: A placebo-controlled investigation. *Plos one*, 2013, 8(9), e75893.

BOYCE, P.: Editorial: Exploring human-centric lighting. *Lighting Research and Technology*, 2016, 48(2), 101.

BOYCE, P. R.: *Human factors in lighting*. New York: Taylor and Francis Group, 2003.

BURGESS, H. J., C. S. LEGASTO, L. F. FOGG AND M. R. SMITH: Can small shifts in circadian phase affect performance? *Applied Ergonomics*, 2013, 44, 109-111.

CAJOCHEN, C., S. ALTANAY-EKICI, M. MUNCH, S. FREY, et al.: Evidence that the lunar cycle influences human sleep. *Curr Biol*, 2013, 23(15), 1485-1488.

CAJOCHEN, C., J. M. ZEITZER, C. A. CZEISLER AND D. J. DIJK: Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behav Brain Res*, 2000, 115(1), 75-83.

CAKIR, G., A. CAKIR, H. KRAMER, C. SCHIERZ, et al.: *Der Stand von Wissenschaft und Technik bei neuen Beleuchtungstechnologien am Arbeitsplatz und ihre Auswirkungen*. 2011.

CALDWELL, J. A., J. L. CALDWELL AND R. M. SCHMIDT: Alertness management strategies for operational contexts. *Sleep Med Rev*, 2008, 12(4), 257-273.

CHANG, A.-M., F. A. J. L. SCHEER AND C. A. CZEISLER: The human circadian system adapts to prior photic history. *Journal of Physiology*, 2011, 589(5), 1095-1102.

CHANG, A. M., F. A. SCHEER, C. A. CZEISLER AND D. AESCHBACH: Direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans depend on prior light history. *Sleep*, 2013, 36(8), 1239-1246.

CHELLAPPA, S. L., R. STEINER, P. BLATTNER, P. OELHAFEN, et al.: Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: Can blue-enriched light keep us alert? *Plos one*, 2011, 6(1), e16429.

CIE 218:2016. *Research roadmap for helthful interior lighting applications*. Wien, Österreich: 2016.

CIE. *CIE Statement on Non-visual effects of light: Recommending proper light at the proper time*. 2015.

COUNCIL ON SCIENCE AND PUBLIC HEALTH: *Light pollution: Adverse health effects of nighttime lighting*. Chicago: 2012.

CZEISLER, C. A.: Perspective: Casting light on sleep deficiency. *Nature*, 2013, 497(7450), S13-S13.

DAWSON, D., D. DARWENT AND G. D. ROACH: How should a bio-mathematical model be used within a fatigue risk management system to determine whether or not a working time arrangement is safe? *Accident Analysis & Prevention*, 2016.

DAWSON, D., Y. IAN NOY, M. HARMA, T. AKERSTEDT, et al.: Modelling fatigue and the use of fatigue models in work settings. *Accid Anal Prev*, 2011, 43(2), 549-564.

DEBOER, T.: Sleep deprivation, caffeine, and light sensitivity of the circadian system. In *Proceedings of the 8th DIN-expert-panel - effect of light on human beings*, Weimar WBA Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e.V., 2015.

DIN EN 12464-1. Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. Berlin: Beuth, 2011, p. 1-59.

DIN SPEC 5031-100:2015. Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. Berlin: Beuth, 2015.

DIN SPEC 67600:2013. Biologisch wirksame Beleuchtung - Planungsempfehlungen. Berlin: Beuth, 2013, p. 1-68.

DOLJANSKY, J. T., H. KANNETY AND Y. DAGAN: Working under daylight intensity lamp: an occupational risk for developing circadian rhythm sleep disorder? *Chronobiol Int*, 2005, 22(3), 597-605.

DUFFY, J. F. AND C. A. CZEISLER: Effect of light on human circadian physiology. *Sleep Medicine Clinics*, 2009, 4(2), 165-177.

DUFFY, J. F. AND K. P. WRIGHT, JR.: Entrainment of the human circadian system by light. *J Biol Rhythms*, 2005, 20(4), 326-338.

ERREN, T. C. AND R. J. REITER: Light Hygiene: Time to make preventive use of insights – old and new – into the nexus of the drug light, melatonin, clocks, chronodisruption and public health. *Medical Hypotheses*, 2009, 73(4), 537-541.

ERREN, T. C. AND T. J. REITER: Revisiting chronodisruption: When the physiological nexus between internal and external times splits in humans. *Naturwissenschaften*, 2013, 100, 291-298.

ESPIRITU, R. C., D. F. KRIPKE, S. ANCOLI-ISRAEL, M. A. MOWEN, et al.: Low illumination experienced by San Diego adults: Association with atypical depressive symptoms. *Biological Psychiatry*, 1994, 35(6), 403-407.

FOLKARD, S., D. A. LOMBARDI AND M. B. SPENCER: Estimating the circadian rhythm in the risk of occupational injuries and accidents. *Chronobiol Int*, 2006, 23(6), 1181-1192.

FOSTER, R. G. AND T. ROENNEBERG: Human responses to the geophysical daily, annual and lunar cycles. *Curr Biol*, 2008, 18(17), r784-r794.

GIMENEZ, M. C., D. G. BEERSMA, P. BOLLEN, M. L. VAN DER LINDEN, et al.: Effects of a chronic reduction of short-wavelength light input on melatonin and sleep patterns in humans: Evidence for adaptation. *Chronobiol Int*, 2014, 31(5), 690-697.

GIMENEZ, M. C., M. HESSELS, M. VAN DE WERKEN, B. DE VRIES, et al.: Effects of artificial dawn on subjective ratings of sleep inertia and dim light melatonin onset. *Chronobiol Int*, 2010, 27(6), 1219-1241.

GOLOMBEK, D. A., L. P. CASIRAGHI, P. V. AGOSTINO, N. PALADINO, et al.: The times they're a-changing: Effects of circadian desynchronization on physiology and disease. *Journal of Physiology*, 2013, 107(4), 12.

HEATHERLEY, S. V., R. C. HAYWARD, H. E. SEERS AND P. J. ROGERS: Cognitive and psychomotor performance, mood, and pressor effects of caffeine after 4, 6 and 8 h caffeine abstinence. *Psychopharmacology*, 2005, 178(4), 461-470.

HEBERT, M., S. K. MARTIN, C. LEE AND C. I. EASTMAN: The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *J Pineal Res*, 2002, 33(4), 198-203.

HUBALEK, S., M. BRINK AND C. SCHIERZ: Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood. *Lighting Research and Technology*, 2010, 42(1), 33-50.

HUBALEK, S., D. ZÖSCHG AND C. SCHIERZ: Ambulant recording of light for vision and non-visual biological effects. *Lighting Research and Technology*, 2006, 38(4), 314-324.

KAN. KAN-Positionspapier zum Thema künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung in der Normung In. St. Augustin: Kommission Arbeitsschutz und Normung, Verein zur Förderung der Arbeitssicherheit in Europa e.V. (VFA), 2015, p. 1-7.

KAN. KAN-Positionspapier zum Thema künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung und Normung In. St. Augustin: Kommission Arbeitsschutz und Normung, Verein zur Förderung der Arbeitssicherheit in Europa e.V. (VFA), 2016, p. 1-6.

KANTERMANN, T., S. FORSTNER, M. HALLE, L. SCHLANGEN, et al.: The stimulating effect of bright light on physical performance depends on internal time. *Plos one*, 2012, 7(7), e40655.

KANTERMANN, T., M. JUDA, M. MERROW AND T. ROENNEBERG: The human circadian clock's seasonal adjustment is disrupted by daylight saving time. *Current Biology*, 2007, 17(22), 1996-2000.

KASPER, S., S. L. ROGERS, P. A. MADDEN, J. R. JOSEPH-VANDERPOOL, et al.: The effects of phototherapy in the general population. *J Affect Disord*, 1990, 18(3), 211-219.

KOHYAMA, J.: Sleep health and asynchronization. *Brain and Development*, 2011, 33, 252-259.

KUNZ, D.: Circadiane Wirksamkeit Aml-basierter Beleuchtungssysteme: Wirkungsfragen circadianer Desynchronisation. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, BAuA-Forschungsbericht, 2015.

MEYER, C., V. MUTO, M. JASPAR, C. KUSSE, et al.: Seasonality in human cognitive brain responses. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2016, 113(11), 3066-3071.

MITLER, M. M., M. A. CARSKADON, C. A. CZEISLER, W. C. DEMENT, et al.: Catastrophes, sleep, and public policy: Consensus report. *Sleep*, 1988, 11(1), 100-109.

MONK, T. H.: The post-lunch dip in performance. *Clin Sports Med*, 2005, 24(2), e15-23, xi-xii.

MOTTRAM, V., B. MIDDLETON, P. WILLIAMS AND J. ARENDT: The impact of bright artificial white and 'blue-enriched' light on sleep and circadian phase during the polar winter. *J Sleep Res*, 2011, 20(1 Pt 2), 154-161.

MÜNCH, M., F. LINHART, A. BORISUIT, S. M. JAEGGI, et al.: Effects of prior light exposure on early evening performance, subjective sleepiness, and hormonal secretion. *Behavioral Neuroscience*, 2012, 126(1), 196-203.

OWEN, J. AND J. ARENDT: Melatonin suppression in human subjects by bright and dim light in antarctica: Time and season-dependent effects. *Neurosci Lett*, 1992, 137(2), 181-184.

PARK, D.-H., D. F. KRIPKE, G. J. LOUIS, J. A. ELLIOTT, et al.: Self-reported sleep latency in postmenopausal women. *J Korean Med Sci*, 2007, 22(6), 1007.

PAUL, M. A., R. J. LOVE, A. HAWTON AND J. ARENDT: Sleep and the endogenous melatonin rhythm of high arctic residents during the summer and winter. *Physiol Behav*, 2015, 141, 199-206.

PEELING, P. AND B. DAWSON: Influence of caffeine ingestion on perceived mood states, concentration, and arousal levels during a 75-min university lecture. 2007, p. 332-335.

PHIPPS-NELSON, J., J. R. REDMAN, D. J. DIJK AND S. M. RAJARATNAM: Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. *Sleep*, 2003, 26(6), 695-700.

REA, M. S., A. BIERMAN, M. G. FIGUEIRO AND J. D. BULLOUGH: A new approach to understanding the impact of circadian disruption on human health. *Journal of Circadian Rhythms*, 2008, 6, 7.

ROENNEBERG, T.: The decline in human seasonality. *J Biol Rhythms*, 2004, 19(3), 193-195; 196-197.

ROENNEBERG, T., C. J. KUMAR AND M. MERROW: The human circadian clock entrains to sun time. *Current Biology*, 2007, 17(2), R44-R45.

ROSEKIND, M. R., J. N. BOYD, S. F. GLOTZBACK AND R. C. BLANK: Alternance management in 24/7 settings: Lessons from aviation. *Occupational Medicine*, 2002, 17(2), 247-259.

RUFIANGE, M., C. BEAULIEU, P. LACHAPPELLE AND M. DUMONT: Circadian light sensitivity and rate of retinal dark adaptation in indoor and outdoor workers. *Journal of Biological Rhythms*, 2007, 22(5), 454-457.

SANTHI, N., J. A. GROEGER, S. N. ARCHER, M. GIMENEZ, et al.: Morning sleep inertia in alertness and performance: Effect of cognitive domain and white light conditions. *Plos one*, 2013, 8(11), e79688.

SANTHI, N., H. C. THORNE, D. R. VAN DER VEEN, S. JOHNSEN, et al.: The spectral composition of evening light and individual differences in the suppression of melatonin and delay of sleep in humans. *J Pineal Res*, 2012, 53(1), 47-59.

SATO, M., M. INUI, Y. NAKAMURA AND Y. TAKEUCHI: Visual environment of a control room. *Lighting Research and Technology*, 1989, 21(3), 99-106.

SCHEUERMAIER, K., A. M. LAFFAN AND J. F. DUFFY: Light exposure patterns in healthy older and young adults. *J Biol Rhythms*, 2010, 25(2), 113-122.

SCHIERZ, C.: 2002. Leben wir in der „biologischen Dunkelheit?“. In: *Proceedings of the LICHT*.

SCHIERZ, C. AND H. KRUEGER: Vor- und Nachteile intensiver Beleuchtung am Büroarbeitsplatz. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 2002, 56(4), 269-274.

SCHWITZER, J., C. NEUDORFER, H. G. BLECHA AND W. W. FLEISCHHACKER: Mania as a side effect of phototherapy. *Biol Psychiatry*, 1990, 28(6), 532-534.

SEGAL, A. Y., T. L. SLETTEN, E. E. FLYNN-EVANS, S. W. LOCKLEY, et al.: Daytime exposure to short- and medium-wavelength light did not improve alertness and neurobehavioral performance. *Journal of Biological Rhythms*, 2016, 31(5), 470-482.

SLETTEN, T. L., S. FTOUNI, C. L. NICHOLAS, M. MAGEE, et al.: Randomised controlled trial of the efficacy of a blue-enriched light intervention to improve alertness and performance in night shift workers. *Occup Environ Med*, 2017.

SLETTEN, T. L., V. L. REVELL, B. MIDDLETON, K. A. LEDERLE, et al.: Age-related changes in acute and phase-advancing responses to monochromatic light. *J Biol Rhythms*, 2009, 24(1), 73-84.

SMITH, K. A., M. W. SCHOEN AND C. A. CZEISLER: Adaptation of human pineal melatonin suppression by recent photic history. *J Clin Endocrinol Metab*, 2004, 89(7), 3610-3614.

SMOLDERS, K. C. H. J. AND Y. A. W. DE KORT: Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. *Journal of Environmental Psychology*, 2014, 39(0), 77-91.

SMOLDERS, K. C. H. J., Y. A. W. DE KORT AND S. M. VAN DEN BERG: Daytime light exposure and feelings of vitality: Results of a field study during regular weekdays. *Journal of Environmental Psychology*, 2013, 36(0), 270-279.

ST HILAIRE, M. A., M. RUGER, F. FRATELLI, J. T. HULL, et al.: Modeling neurocognitive decline and recovery during repeated cycles of extended sleep and chronic sleep deficiency. *Sleep*, 2017, 40(1).

STEVENS, R. G., G. C. BRAINARD, D. E. BLASK, S. W. LOCKLEY, et al.: Adverse health effects of nighttime lighting - Comments on American Medical Association policy statement. *American Journal of Preventive Medicine*, 2013, 45(3), 343-346.

TKACHENKO, O., A. M. SPAETH, J. D. MINKEL AND D. F. DINGES.: Circadian rhythms in sleepiness, alertness, and performance. In: *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology*. Elsevier, 2017.

TRALAU, B.: Biologische Lichtwirkung in der Praxis – Fallstricke von der Planung bis zur Realisierung. In: Proceedings of the 2. Praxisforum Biologische Lichtwirkungen – BioWi. Weimar: Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e.V., 2014.

TUUNAINEN, A., D. F. KRIPKE AND T. ENDO: Light therapy for non-seasonal depression. Cochrane Database Syst Rev, 2004, (2), Cd004050.

VAN DIEPEN, H. C., E. A. LUCASSEN, R. YASENKOV, I. GROENEN, et al.: Caffeine increases light responsiveness of the mouse circadian pacemaker. Eur J Neurosci, 2014, 40(10), 3504-3511.

VAN DONGEN, H. AND D. DINGES.: Circadian rhythms in sleepiness, alertness, and performance. In: M. KRYGER, T. ROTH AND W.C. DEMENT, eds., Principles and practice of sleep medicine. Philadelphia: Elsevier, 2005, p. 435-443.

VAN SOMEREN, E. J. AND R. F. RIEMERSMA-VAN DER LEK: Live to the rhythm, slave to the rhythm. Sleep Med Rev, 2007, 11(6), 465-484.

VANDEWALLE, G., P. MAQUET AND D. J. DIJK: Light as a modulator of cognitive brain function. Trends Cogn Sci, 2009, 13(10), 429-438.

VARUGHESE, J. AND R. P. ALLEN: Fatal accidents following changes in daylight savings time: the American experience. Sleep Medicine, 2001, 2(1), 31-36.

VEITCH, J. A.: Psychological processes influencing lighting quality. Journal of the Illuminating Engineering Society, 2001, 30(1), 124.

VEITCH, J. A.: Workplace design contributions to mental health and well-being. Health Pap, 2011, 11 Spec No, 38-46.

VETTER, C., M. JUDA, D. LANG, A. WOJTYSIK, et al.: Blue-enriched office light competes with natural light as a zeitgeber. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 2011, 37(5), 437-445.

WEY, D., A. BOHN AND L. MENNA-BARRETO: Daily rhythms of native Brazilians in summer and winter. Physiol Behav, 2012, 105(3), 613-620.

WILLIAMSON, A., D. A. LOMBARDI, S. FOLKARD, J. STUTTS, et al.: The link between fatigue and safety. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43, 498-515.

WRIGHT, K. P., JR., R. J. HUGHES, R. E. KRONAUER, D. J. DIJK, et al.: Intrinsic near-24-h pacemaker period determines limits of circadian entrainment to a weak synchronizer in humans. Proc Nat Acad Sci USA, 2001, 98(24), 14027-14032.

YERKES, R. M. AND J. D. DODSON: The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. Journal of Comparative Neurology and Psychology, 1908, 18(5), 459-482.