

Gesicherte arbeitsschutzrelevante Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen

Eine Literaturstudie

**Validated OSH-related findings concerning the non-visual
effect of light upon human beings**

A literature review

**Connaissances avérées et pertinentes pour la SST sur
l'effet non visuel de la lumière sur l'humain**

Une étude bibliographique

Stand der Literaturstudie: 17.01.2017

Das Projekt „Kommission Arbeitsschutz und Normung“ wird finanziell durch das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) gefördert.

- Autor: Prof. Dr. habil. Thomas Kantermann
Hochschule für Oekonomie und Management (FOM)
& SynOpus, Bochum
- Co-Autoren: Prof. Dr. habil. Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau
Prof. Dr. habil. Volker Harth
Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin,
Hamburg
- Herausgeber: Verein zur Förderung der Arbeitssicherheit
in Europa e.V. (VFA)
- Redaktion: Dr. Anna Dammann
Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN)
– Geschäftsstelle –
Alte Heerstraße 111, 53757 Sankt Augustin
Telefon +49 2241 231-3449
- E-Mail: info@kan.de
Internet: www.kan.de
- Übersetzung: Marc Prior, Odile Brogden
- Veröffentlichung: August 2018

Inhaltsverzeichnis

Zu dieser Studie	4
Hintergrund	4
Ziel dieser Studie	6
Zusammenfassung der KAN	7
Empfehlungen der KAN	8
About this study	11
Background	11
Purpose of the study	13
Summary by KAN	14
KAN's recommendations	16
À ce propos	18
Le contexte	18
Objectif de cette étude	20
Résumé de la KAN	21
Recommandations de la KAN	23
1 Einleitung	25
1.1 Die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen	26
1.2 Faktoren der Lichtwirkung auf den Menschen	28
1.2.1 Einfluss vorheriger Lichtexposition (Lichthistorie)	29
1.2.2 Einfluss des Zeitpunktes der Lichtexposition	29
1.2.3 Einfluss von Lichtspektrum und Lichtintensität	30
2 Kontext und Ziel der vorliegenden Arbeit	36
3 Methode der Literatursuche	37
4 Ergebnisse der Literatursuche	42
5 Wichtige Bezüge zum Arbeitsschutz	54
6 Empfehlungen für die Forschung und Forschungsfragen	60
7 Zusammenfassung und Ausblick	67
8 Literaturverzeichnis	68
Anhang 1 - Suchalgorithmen	80
Anhang 2 - Gutachten aus lichttechnischer Sicht	81

Zu dieser Studie

Die Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN) hat den Auftrag, die deutschen Arbeitsschutzinteressen in der nationalen, europäischen und internationalen Normung zu wahren und die Beteiligung der Sozialpartner an der Normung zu gewährleisten. Dabei verfolgt sie das Ziel, dass die deutsche, europäische und internationale Normung den Arbeitsschutz bestmöglich berücksichtigt. In der KAN vertreten je fünf Personen die Arbeitgeber, die Arbeitnehmer und den Staat sowie je eine Person die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) und DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.).

Um arbeitsschutzrelevante Sachverhalte in der Normung zu analysieren und den Verbesserungsbedarf in der Normungsarbeit zu ermitteln, vergibt die KAN unter anderem Studien und Gutachten.

Hintergrund

Licht ermöglicht dem Menschen nicht nur das Sehen (visuelle Wirkung), sondern es hat auch nichtvisuelle Wirkungen. Im Zusammenhang mit der nichtvisuellen Wirkung des Lichts häufig verwendete Bezeichnungen sind „biologische Wirkungen“, „melanopische Wirkungen“ oder „Human Centric Lighting“.

Licht wirkt immer und somit auch an jedem Arbeitsplatz – ob gezielt oder nicht gezielt eingesetzt. Zu den nichtvisuellen Wirkungen zählen die Synchronisation der inneren Uhr des Menschen mit dem Tag-Nacht-Rhythmus und die akute Veränderung von Konzentration und Aufmerksamkeit durch bestimmtes Licht. Licht kann die psychische und physische Gesundheit positiv wie negativ beeinflussen.

Neben den visuellen Wirkungen beeinflussen auch die nichtvisuellen Wirkungen von Licht die Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, denn Aufmerksamkeit und Wachheit der Beschäftigten können sich unmittelbar auf das Unfallgeschehen auswirken. Durch den Einfluss auf die innere Uhr des Menschen, den Hormonhaushalt und weitere physiologische Prozesse im Körper ist Licht ebenso relevant für die Gesundheit.

Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung müssen die nichtvisuellen Wirkungen von Licht nicht nur auf ihre Potentiale hin geprüft werden, sondern auch auf mögliche Gefährdungen. Hierfür und auch für Anwendungsempfehlungen seitens des Arbeitsschutzes sind gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse erforderlich.

Zahlreiche Studien behandeln derzeit die Bedeutung der nichtvisuellen Wirkungen von Licht. Teilweise sind die Ergebnisse der Studien widersprüchlich, und noch nicht

alle für den Arbeitsschutz relevanten Fragen wurden untersucht. Gleichzeitig fördern die Industrie und die Normung die gezielte Nutzung der nichtvisuellen Wirkung, z. B. durch neuartige Beleuchtungssysteme.

Die bereits veröffentlichte DIN SPEC (Fachbericht) 67600:2013-4 „Biologisch wirksame Beleuchtung – Planungsempfehlungen“ basiert auf nicht hinreichend gesicherten Erkenntnissen. Zudem fällt die Planung von Beleuchtungsanlagen für Arbeitsstätten in den Bereich des betrieblichen Arbeitsschutzes¹. Welche Aufgaben die Normung in diesem Bereich übernehmen kann, regelt das Grundsatzpapier zur Rolle der Normung im betrieblichen Arbeitsschutz². Das ISO/TC 274 „Light and lighting“ beschäftigt sich ebenfalls mit den nichtvisuellen Wirkungen von künstlicher Beleuchtung. Dieses internationale Normungsgremium führt zunächst eine allgemeine Literaturrecherche durch, die als Basis für ein Dokument mit Empfehlungen dienen könnte.

Um Nachteile für den Arbeitsschutz zu vermeiden, ist es wichtig, auf eine fundierte Wissensgrundlage zurückgreifen zu können. Die hier vorliegende Literaturstudie bereitet daher, als eine Grundlage für die Positionierung des Arbeitsschutzes, die aktuellen arbeitsschutzrelevanten Ergebnisse wissenschaftlicher Studien zur nichtvisuellen Wirkung von Licht auf.

Es ist bereits jetzt klar, dass wichtige Erkenntnisse für den Arbeitsschutz fehlen. Um diese Lücken zu füllen, sind zielgerichtete Forschungsvorhaben erforderlich. Innerhalb der Arbeitsschutzkreise besteht die Bereitschaft, Forschung zu den nichtvisuellen Wirkungen von Licht zu unterstützen und durchzuführen. Jedoch müssen zunächst die noch offenen konkreten arbeitsschutzrelevanten Fragestellungen herausgearbeitet werden. Auch hierzu bietet die Literaturstudie eine Grundlage.

¹ KAN Positionspapier zum Thema künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung und Normung, April 2017: www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Basisdokumente/de/Deu/KAN-Position_Beleuchtung_2017.pdf

² Grundsatzpapier zur Rolle der Normung im betrieblichen Arbeitsschutz, www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Basisdokumente/de/Deu/Grundsatzpapier_GMBI-Ausgabe-2015-1.pdf

Ziel dieser Studie

Ziel der Literaturstudie ist eine Bestandsaufnahme und Auswertung wissenschaftlicher Publikationen. Sie veranschaulicht

- die arbeitsschutzrelevanten gesicherten Erkenntnisse,
- offene Forschungsfragen,
- Argumente für eine Positionierung gegenüber der Normung und

Bestehende Literaturrecherchen zu den nichtvisuellen Wirkungen von Licht wurden in die KAN-Studie mit einbezogen. Beispielsweise hat die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) eine Studie zu „Chancen und Risiken beim Einsatz künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung in Arbeitsstätten“ (2017) durchgeführt. Die TU Ilmenau hat zum Thema „Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit“ (2009) recherchiert.

Um die nichtvisuellen Wirkungen von Licht möglichst breit angelegt zu betrachten, wurden verschiedene Fachdisziplinen – die Chronobiologie, die Arbeitsmedizin und die Lichttechnik – an der KAN-Studie beteiligt.

Die KAN dankt dem Projektnehmer Prof. Dr. habil. Thomas Kantermann (Schwerpunkt: Chronobiologie), SynOpus, und den Gutachtern Prof. Dr. habil. Christoph Schierz (Schwerpunkt: Lichttechnik), TU Ilmenau, und Prof. Dr. habil. Volker Harth (Schwerpunkt: Arbeitsmedizin), Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (ZfAM), für die Durchführung der Literaturstudie.

Weiterhin dankt die KAN den folgenden Expertinnen und Experten für die Begleitung und die Unterstützung im Rahmen einer projektbegleitenden Arbeitsgruppe:

- Dr. Michael Bretschneider-Hagemes, KAN – Sozialpartnerbüro der Arbeitnehmer, Sankt Augustin
- Dr. Anna Dammann, KAN-Geschäftsstelle, Sankt Augustin
- Dr. Georg Hilpert, Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Bonn
- Dr. Sylvia Hubalek, Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM), Köln
- Angela Janowitz, Leiterin des Fachbereiches Gesundheitsschutz und Ergonomie der KAN-Geschäftsstelle, Sankt Augustin
- Jan Krüger, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dresden
- Sylke Neumann, Verwaltungsberufsgenossenschaft (VBG), Hamburg

- Dr. Sylvia Rabstein, Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA)
- Gerold Soestmeyer, Leiter des Sachgebiets Beleuchtung der DGUV, Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI), Bochum
- Bettina Tondorf, Institut für angewandte Arbeitswissenschaft e.V. (ifaa), Düsseldorf
- Reinhard Walleter, Südwestmetall, Stuttgart
- Dr. Hanna Zieschang, Institut für Arbeit und Gesundheit der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IAG), Dresden

Zusammenfassung der KAN

Vorbemerkung: Der in dieser Studie beschriebene Stand spiegelt die Ergebnisse wissenschaftlicher Studien Anfang 2017 wider.

Diese Literaturstudie stellt eine Auswahl der bisherigen Studien zusammen, die arbeitsschutzrelevante Aspekte der nichtvisuellen Wirkung von Licht behandeln. Hierzu wurden die Blickwinkel verschiedener Fachdisziplinen einbezogen. Im ersten Schritt wurde eine Literaturstudie aus chronobiologischer Sicht erstellt und diese anschließend aus arbeitsmedizinischer und lichttechnischer Sicht begutachtet. Die Inhalte der Gutachten sind in die vorliegende Studie eingeflossen. Zusätzlich befindet sich das ausführliche lichttechnische Gutachten im Anhang. Dieses Gutachten stellt lichttechnische Grundlagen und den Wissensstand über eine mögliche Schädigung des Auges durch zu hohe Intensitäten des Blauanteils im Licht dar.

Zu den nichtvisuellen Wirkungen von Licht liegen überwiegend Studien unter kontrollierten Bedingungen (z. B. in Schlaflaboren) mit meist nur wenigen Teilnehmenden oder tierexperimentelle Studien vor. Diese Studien sind gut geeignet, Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aufzudecken. Diese Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge helfen wiederum, Studienergebnisse auf andere Szenarien als die untersuchten zu übertragen. Allerdings können Studien im Labor nicht die tatsächlichen Gegebenheiten am Arbeitsplatz abbilden. Deshalb sind zusätzliche Studien an Arbeitsplätzen (Feldstudien) mit vielen Teilnehmenden wichtig, auch wenn solche Studien gegebenenfalls schwer kontrollierbaren Störeinflüssen unterliegen. Zudem sind Langzeitstudien wichtig.

Der Literaturrecherche wurden verschiedene Ausschlusskriterien zugrunde gelegt (vgl. Kapitel 3). Dreizehn Studien wurden genauer betrachtet (vgl. Tabelle 1). Da-

bei handelt es sich um Feldstudien mit mindestens 10 Teilnehmenden, die am Arbeitsplatz durchgeführt wurden. Bei elf der dreizehn Studien wurde die künstliche Beleuchtung für die Untersuchung verändert. Bei den anderen beiden Studien (Nr. 1/13 und Nr. 2/13) wurde der Einfluss von Tageslicht am Arbeitsplatz untersucht. Drei Studien (Nr. 2/13 bis 4/13) behandeln Tagarbeit, zehn fanden im Bereich Nacht- und Schichtarbeit statt. Die Projektnehmer haben die Studien zusätzlich kurz bewertet, z. B. hinsichtlich des Studiendesigns.

Es ist auffällig, dass viele Studien Schwachstellen vor allem bezüglich der Lichttechnik aufweisen. So ist häufig der Versuchsaufbau unvollständig beschrieben, oder die angegebenen radiometrischen Größen sind falsch.

Auf der Grundlage der vorliegenden Erkenntnisse gehen die Projektnehmer auf die Grundsätze des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) in Hinblick auf die nichtvisuellen Wirkungen von Licht ein. Für die Arbeitsstättenverordnung und die Technischen Regeln für Arbeitsstätten erläutern sie, inwiefern aus ihrer Sicht die darin enthaltenen Anforderungen auch auf die nichtvisuelle Wirkung von Licht übertragen werden können.

Die Literaturrecherche zeigt, dass noch viele arbeitsschutzrelevante Studien notwendig sind. Zum einem müssen Studien im Bereich der Grundlagenforschung durchgeführt werden, z. B. über Dosis-Wirkungs-Beziehungen, über individuelle Unterschiede, Adaptationsprozesse oder über das Studiendesign an sich. Zudem sind speziellere Interventionsstudien aus arbeitsmedizinischer Sicht notwendig: Der Einfluss von digitalen Medien als Licht emittierende Quellen, der Einfluss des Lichts auf Unfall- und Fehlerraten und die Vor- und Nachteile von bestimmten Beleuchtungsszenarien während der Nachtschicht müssen z. B. näher untersucht werden. Zu allen bisherigen Forschungsfragen sollte immer geprüft werden, ob Langzeitstudien notwendig und möglich sind.

Empfehlungen der KAN

Die KAN bittet die **DGUV-Forschungsförderung**,

- Vorhaben zu aus Arbeitsschutzsicht prioritären Forschungsfragen zu den nichtvisuellen Wirkungen von Licht auf dem Wege einer öffentlichen Bekanntmachung zu initiieren und zu fördern und dabei die in dieser Studie herausgearbeiteten Fragestellungen zu berücksichtigen.

Die KAN bittet die **BAuA**,

- einen Forschungsschwerpunkt zu den nichtvisuellen Wirkungen von Licht zu etablieren;
- die in dieser Studie beschriebenen Erkenntnisse in ihrer Arbeit zu berücksichtigen.

Die KAN bittet **die Forschungseinrichtungen des Arbeitsschutzes, der Sozialpartner** und **sonstige Forschungseinrichtungen** (z. B. der Lichtindustrie),

- die in der Studie aufgeführten Fragen in ihre Forschungsarbeit einzubinden und bei der Durchführung der Studien die lichttechnischen Hinweise im Anhang zu berücksichtigen.

Die KAN bittet das **BMAS**,

- die Möglichkeiten der Forschungsförderung zu den in dieser Studie aufgeführten Forschungsfragen zu prüfen;
- die in dieser Studie beschriebenen Erkenntnisse in seiner Arbeit (z. B. der technischen Regelsetzung) zu berücksichtigen.

Die KAN bittet den **KAN-Vorstand**,

- das **Bundesministerium für Bildung und Forschung** (BMBF) zu bitten, die Möglichkeiten der Forschungsförderung zu den in dieser Studie aufgeführten Forschungsfragen zu prüfen.

Die KAN bittet die betroffenen **Fachbereiche der DGUV**,

- die in dieser Studie beschriebenen Erkenntnisse in ihrer Arbeit (z. B. der technischen Regelsetzung) zu berücksichtigen und die Inhalte zu verbreiten;
- die Forschung zu den nichtvisuellen Wirkungen von Licht zu unterstützen.

Die **KAN-Geschäftsstelle** wird beauftragt,

- die Ergebnisse der Studie der Öffentlichkeit (in deutscher und englischer Sprache) bekannt zu machen;

- die Inhalte der Studie dem DIN-Normungsgremium FNL 27 „Wirkung des Lichts auf den Menschen“ sowie dem passenden Arbeitskreis im ZVEI zur Verfügung zu stellen und bei Bedarf vorzustellen;
- der Geschäftsstelle des DIN-Normenausschusses Lichttechnik (FNL) die Studie in englischer Sprache mit der Bitte um Weiterleitung an die internationale Normung (ISO/TC 274) zur Verfügung zu stellen;
- zu prüfen, welche Inhalte der Studie in die Normung einfließen könnten, um diese im Anschluss an die Normung weiterzuleiten, z. B. Anforderungen an Messverfahren und Produkte.

Die KAN bittet **PEROSH**,

- die Forschungsfragen an die europäischen Partner weiterzugeben und gemeinsam zu diskutieren;
- ggf. gemeinsame Projekte aufzusetzen.

About this study

The Commission for Occupational Health and Safety and Standardization (KAN) has the mandate of safeguarding German occupational safety and health interests in German, European and international standardization activity, and of assuring the participation of the social partners in standardization. KAN therefore pursues the objective of ensuring that German, European and international standardization gives the best possible consideration to OSH issues. Employers, employees and the state are each represented in KAN by five delegates, and the German Social Accident Insurance (DGUV) and DIN Deutsches Institut für Normung e.V. by one delegate each.

KAN analyses OSH-related issues in standardization activity and identifies scope for improvement. One measure used for this purpose is the commissioning of studies and reports.

Background

Besides its visual effect of enabling human beings to see, light also has non-visual effects upon human beings. Terms frequently used in conjunction with the non-visual effects of light are "biological effects", "melanopic effects" and "human-centric lighting".

Light always has an effect, and this therefore applies at any workplace, irrespective of whether the effect is brought about intentionally. The non-visual effects of light include synchronization of the human biological clock with the day/night rhythm and the acute change in concentration and attentiveness caused by certain light. Light can influence physical and mental health, both positively and negatively.

Like the visual effects of light, its non-visual effects also influence safety and health at work, since the attentiveness and alertness of workers may have a direct influence upon the incidence and severity of accidents. Through its influence upon the human biological clock, the hormonal balance and other physiological processes in the body, light is also relevant to human health.

In the context of risk assessment, the non-visual effects of light must be examined with regard not only to their potential benefits, but also to their potential hazards. For this purpose, and in order for the OSH community to issue recommendations for application of the non-visual effects of light, validated findings are required concerning the human factors.

Numerous studies are currently addressing the significance of the non-visual effects of light. In some cases, the findings of the studies are contradictory, and as yet they have not addressed all issues relevant to occupational safety and health. At the same time, industry and standards bodies are promoting intentional exploitation of the non-visual effects, for example by means of new types of lighting system.

DIN SPEC (technical report) 67600: 2013-4, Biologically effective illumination – Design guidelines, which has already been published, is based upon findings that have not been adequately validated. Furthermore, the planning of lighting installations for work premises falls within the sphere of the safety and health of workers at work³ – an area in which the role of standardization is governed by a corresponding policy document⁴. ISO/TC 274, Light and lighting, is also concerned with the non-visual effects of artificial lighting. This international standards committee is conducting a general literature review, which may serve as a basis for a document containing recommendations.

Access to a sound body of knowledge is important if a negative impact upon occupational safety and health is to be avoided. The literature review presented here therefore discusses the latest OSH-related findings of scientific studies into the non-visual effects of light. This discussion is to serve as a basis for development of a position by the occupational safety and health lobby.

Gaps in important findings for occupational safety and health are already evident. Dedicated research projects are needed in order to close these gaps. A willingness exists among the stakeholders in occupational safety and health to support and conduct research into the non-visual effects of light. The specific issues relevant to OSH that are as yet unresolved must however first be determined. Here again, the literature review serves as a basis.

³ KAN position paper on artificial, biologically effective lighting and standardization, April 2017: www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Basisdokumente/en/Deu/KAN-Position_Lighting_2017-en.pdf

⁴ Policy paper on the role of standards in the health and safety of workers at work: www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Basisdokumente/en/Deu/Grundsatzpapier_GMBI-Ausgabe-2015-1-en.pdf

Purpose of the study

The purpose of the literature review is to provide a status review and evaluation of scientific publications. The literature review discusses:

- The validated findings of relevance to OSH
- As-yet unresolved research issues
- Arguments for adoption of a position with respect to standardization

Existing literature surveys concerning the non-visual effects of light were included in the KAN Study. For example, the Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA) conducted a study in 2017 into the opportunities and risks associated with the use of artificial, biologically effective lighting in work premises. The Technical University of Ilmenau conducted research in 2009 into the ideal lighting for shift work.

In order for the non-visual effects of light to be considered as broadly as possible, a number of specialist disciplines – chronobiology, occupational medicine and lighting technology – were involved in the KAN Study.

KAN wishes to thank the project partner Professor Dr habil. Thomas Kantermann (main discipline: chronobiology) of SynOpus and the consultant experts Professor Dr Christoph Schierz (main discipline: lighting technology) of TU Ilmenau and Professor Dr habil. Volker Harth (main discipline: occupational medicine) of the Institute for Occupational and Maritime Medicine (ZfAM) for conducting the literature review.

KAN further wishes to thank the following experts for their provision of supervision and support through the project support group:

- Dr Michael Bretschneider-Hagemes, KAN employees' liaison office, Sankt Augustin
- Dr Anna Dammann, KAN Secretariat, Sankt Augustin
- Dr Georg Hilpert, German Federal Ministry of Labour and Social Affairs (BMAS), Bonn
- Dr Sylvia Hubalek, German Social Accident Insurance Institution for the energy textile electrical and media products sectors (BG ETEM), Cologne
- Angela Janowitz, head of the Occupational Health and Ergonomics Department at the KAN Secretariat, Sankt Augustin
- Jan Krüger, German Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA), Dresden

- Sylke Neumann, German Social Accident Insurance Institution for the administrative sector (VBG), Hamburg
- Dr Sylvia Rabstein, Institute for Prevention and Occupational Medicine of the German Social Accident Insurance, institute of the Ruhr University Bochum (IPA)
- Gerold Soestmeyer, Head of the Lighting Subcommittee of the DGUV, German Social Accident Insurance Institution for the raw materials and chemical industry (BG RCI), Bochum
- Bettina Tondorf, ifaa – Institute for Applied Occupational Ergonomics and Industrial Engineering, Düsseldorf
- Reinhard Walleter, Südwestmetall, Stuttgart
- Dr Hanna Zieschang, Institute for Work and Health of the German Social Accident Insurance (IAG), Dresden

Summary by KAN

Note: the state of progress described in this literature review reflects the results of scientific studies as at the beginning of 2017.

The literature review constitutes a selection of the studies into the OSH-related aspects of the non-visual effects of light conducted to date. The perspectives of several specialist disciplines were considered for this purpose. In the first stage, a literature review was conducted from the chronobiological perspective. This was then assessed from the perspectives of occupational medicine and lighting technology. The content of the assessments was incorporated into the present literature review. The comprehensive assessment from the perspective of lighting technology can also be found in the annex. This assessment sets out principles of lighting technology and current knowledge of potential harm to the eyes caused by an excessively intense blue light component.

The available studies into the non-visual effects of light were conducted primarily under controlled conditions (for example in sleep laboratories). They generally involved only small numbers of test subjects, or were animal experimental studies. These studies are well suited to identifying cause-effect relationships. In turn, the cause-effect relationships facilitate transfer of the results of studies to scenarios beyond those studied. Laboratory studies cannot however describe the actual circumstances at workplaces. Additional studies at workplaces (field studies) involving large numbers of test subjects are therefore important, even though such studies

may also be subject to confounding influences that are difficult to control. Long-term studies are also important.

A number of exclusion criteria were laid down for the literature review (see Chapter 3). Thirteen studies were considered more closely (see Table 1). These are field studies performed at the workplace and involving at least ten test subjects. In eleven of the thirteen studies, the artificial lighting was modified for the purpose of the study. In the other two studies (Nos 1/13 and 2/13), the influence of daylight at the workplace was studied. Three studies (Nos 2/13 to 4/13) examined day work, ten examined night and shift work. The project partners also conducted a brief evaluation of the studies, for example with regard to the study design.

It is notable that many of the studies exhibit weaknesses, particularly with regard to the lighting technology. The description of the test arrangement for example is frequently incomplete, or the radiometric quantities stated are incorrect.

Based upon the available findings, the project partners discuss the principles of the German occupational health and safety act (ArbSchG) with regard to the non-visual effects of light. They discuss the extent to which, in their view, the requirements of the German ordinance on work premises (ArbStättV) and the TR Technical Rules for workplaces can be applied to the non-visual effects of light.

The literature review reveals a need for numerous further studies of relevance to occupational safety and health. Firstly, studies must be conducted in the area of basic research, for example into dose-effect relationships, differences between individuals, adaptation processes and the study design per se. Secondly, more specific intervention studies with a focus on occupational medicine are required: the influence of digital media as a light-emitting source, the influence of light upon accident and error rates, and the benefits and drawbacks of certain lighting scenarios during night shifts for example must be studied in more detail. With regard to all research issues addressed to date, it should always be considered whether long-term studies are necessary and possible.

KAN's recommendations

KAN requests that the **DGUV's research funding**:

- Issue a public announcement in order to launch and fund research into the non-visual effects of light that in the view of the occupational safety and health lobby should be prioritized, and in the process consider the issues identified in this study.

KAN requests that the **German Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA)**:

- Establish a programme of research activity focusing upon the non-visual effects of light.
- Consider the findings of this study in its work.

KAN requests that the **research institutes of the occupational safety and health bodies, the social partners and other research institutes** (for example in the lighting industry):

- Include the research issues listed in the study in their research activity and consider the information in the annex concerning lighting technology during performance of the studies.

KAN requests that the **German Federal Ministry of Labour and Social Affairs (BMAS)**:

- Examine the possibilities of funding research into the research issues listed in this study.
- Consider the findings described in this study in its work (for example during technical regulatory activity).

KAN requests that the **KAN Executive Board**:

- Request that the **German Federal Ministry of Education and Research (BMBF)** examine the opportunities to fund research into the issues listed in this study.

KAN requests that the affected **expert committees of the DGUV**:

- Consider the findings described in this study in their work (for example during technical regulatory activity) and disseminate its content.
- Support research into the non-visual effects of light.

The **KAN Secretariat** is tasked with:

- Making the results of the study publicly available (in German and English)
- Making the content of the study available to the DIN Standards Committee FNL 27, Effect of light on human beings, and the relevant working group at the ZVEI and if appropriate presenting it to these bodies.
- Making the study available in English to the secretariat of the DIN Standards Committee Lighting Technology with the request that it be forwarded to the international standards committee (ISO/TC 274).
- Examining what content of the study (such as requirements concerning measurement methods and products) could be made the subject of standardization work, in order for the content concerned to be forwarded subsequently to standards bodies.

KAN requests that **PEROSH**

- Forward the research issues to the European partners and discuss them with these partners.
- Launch joint projects if appropriate.

À ce propos

La Commission pour la sécurité et la santé au travail et la normalisation (KAN) a pour mission de défendre les intérêts allemands en matière de sécurité et de santé au travail dans la normalisation nationale, européenne et internationale, et de garantir la participation des partenaires sociaux à la normalisation. Son objectif, dans ce contexte, est de veiller à ce que les enjeux de la prévention soient pris en compte le mieux possible dans la normalisation, non seulement allemande et européenne, mais aussi internationale. La KAN se compose de représentants des employeurs, des employés et de l'État (cinq membres chacun), ainsi que d'un représentant chacun de l'Assurance sociale allemande des accidents du travail et maladies professionnelles (DGUV) et de l'Institut allemand de normalisation (DIN).

La KAN commissionne, entre autres, des études et expertises destinées à analyser les aspects de la normalisation ayant une incidence sur la sécurité et la santé au travail et à déterminer les améliorations nécessaires dans le travail de normalisation.

Le contexte

La lumière ne sert pas seulement à y voir clair (effet visuel), elle a aussi des effets non visuels. Les termes fréquemment utilisés à propos de l'effet non visuel de la lumière sont "effets biologiques", "effets mélanopiques" ou "Human Centric Lighting".

L'effet de la lumière s'exerce partout – et donc aussi à chaque poste de travail – qu'elle soit utilisée de manière ciblée ou non. L'un des effets non visuels est la synchronisation de l'horloge interne de l'individu avec le rythme jour-nuit, ainsi que l'impact direct d'un éclairage donné sur la concentration et l'attention. La lumière peut avoir des effets aussi bien positifs que négatifs sur la santé psychique et physique.

Outre les effets visuels, les effets non visuels de la lumière ont également un impact sur la sécurité et la santé au travail, l'attention et la vigilance des employés pouvant en effet avoir une incidence directe sur l'occurrence d'accidents. Du fait de son influence sur l'horloge interne de l'homme, sur l'équilibre hormonal et sur d'autres processus physiologiques dans l'organisme, la lumière constitue également un facteur important pour la santé.

Dans le cadre de l'évaluation des risques, les effets non visuels de la lumière doivent être examinés non seulement du point de vue de leur potentiel, mais aussi de celui des risques possibles. Pour cela, mais aussi pour les recommandations de la part des préventeurs en matière d'applications des effets non visuels de la lumière,

il est indispensable de disposer de connaissances avérées dans le domaine des sciences du travail.

Il existe aujourd’hui de nombreuses études consacrées aux effets non visuels de la lumière. Or, leurs conclusions sont parfois contradictoires, et les questions pertinentes pour la sécurité et la santé au travail n’ont pas encore été toutes examinées. En même temps, l’industrie et la normalisation encouragent l’utilisation ciblée de l’effet non visuel, par exemple par le biais de systèmes d’éclairage innovants.

Le DIN SPEC (rapport technique) 67600: 2013-4 “Éclairage à effet biologique – Conseils de conception” déjà publié repose sur des connaissances qui ne sont pas suffisamment fiables. De plus, la conception de systèmes d’éclairage destinés aux postes de travail relève de l’organisation de la prévention en entreprise⁵. Le rôle de la normalisation dans ce domaine est réglementé par le document d’orientation sur le rôle de la normalisation dans l’organisation de la prévention en entreprise⁶.

L’ISO/TC 274 “Lumière et éclairage” traite également des effets non visuels de l’éclairage artificiel. Cet organisme international de normalisation effectue d’abord une recherche bibliographique générale qui pourrait servir de base à un document contenant des recommandations.

Afin d’éviter tout désavantage pour la SST, il est important de pouvoir recourir à une base de connaissances fiable. C’est pourquoi la présente étude bibliographique compile les conclusions d’études scientifiques récentes relatives à l’effet non visuel de l’éclairage et pertinentes pour la SST, le but étant qu’elles servent de base au positionnement des préventeurs.

Il est d’ores et déjà évident que des connaissances importantes pour la SST font défaut. Des projets de recherche ciblés sont nécessaires pour combler ces lacunes. Au sein des cercles concernés par la SST, on constate une volonté de soutenir des recherches, voire de les mener, sur les effets non visuels de la lumière. Il faut toutefois d’abord mettre en évidence les questions concrètes encore sans réponse importantes pour la SST. La présente étude bibliographique pourra également servir de base à cette démarche.

⁵ Document de position de la KAN sur l’éclairage artificiel à effet biologique et la normalisation, avril 2017 (en anglais) : www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Basisdokumente/en/Deu/KAN-Position_Lighting_2017-en.pdf

⁶ Document de principe portant sur le rôle de la normalisation dans la prévention en entreprise (en anglais) : www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Basisdokumente/en/Deu/Grundsatzpapier_GMBI-Ausgabe-2015-1-en.pdf

Objectif de cette étude

Cette étude bibliographique a pour objet de dresser un inventaire et d'effectuer une analyse de publications scientifiques. Elle met en évidence :

- les connaissances avérées et pertinentes pour la SST,
- les questions de recherche encore sans réponse,
- les arguments pouvant être avancés pour un positionnement vis-à-vis de la normalisation et.

Des recherches bibliographiques existantes sur les effets non visuels de la lumière ont été prises en compte dans l'étude de la KAN. L'Institut fédéral de la sécurité et de la santé au travail (BAuA) a, par exemple, effectué une étude consacrée aux chances et risques de l'utilisation de l'éclairage artificiel à effet biologique aux postes de travail (2017). L'université technique d'Ilmenau a mené des recherches portant sur l'éclairage optimal pour le travail posté (2009).

Afin de jeter un regard aussi large que possible sur les effets non visuels de la lumière, différentes disciplines – la chronobiologie, la médecine du travail et la technique d'éclairage – ont été impliquées dans l'étude de la KAN.

La KAN remercie le mandataire : le Pr Dr habil. Thomas Kantermann (spécialisation : chronobiologie) de SynOpus, et les experts : le Pr Dr habil. Christoph Schierz (spécialisation : technique d'éclairage) de l'Université technique d'Ilmenau et le Pr Dr habil. Volker Harth (spécialisation : médecine du travail) de l'Institut central de médecine du travail et de médecine maritime (ZfAM), pour la réalisation de l'étude. La KAN remercie en outre les experts ci-dessous, qui ont accompagné ce projet et lui ont apporté leur soutien dans le cadre d'un groupe de travail dédié :

- Dr Michael Bretschneider-Hagemes, KAN – Bureau des partenaires sociaux "Employés", Sankt Augustin
- Dr Anna Dammann, Secrétariat de la KAN, Sankt Augustin
- Dr Georg Hilpert, Ministère fédéral du Travail et des Affaires sociales (BMAS), Bonn
- Dr Sylvia Hubalek, Organisme d'assurance sociale allemande des accidents du travail et des maladies professionnelles des secteurs de l'énergie, des textiles, de l'électrotechnique et des produits médiatiques (BG ETEM), Cologne
- Angela Janowitz, responsable de la section "Protection de la santé et ergonomie" au sein du Secrétariat de la KAN, Sankt Augustin
- Jan Krüger, Institut fédéral de la sécurité et de la santé au travail (BAuA), Dresde

- Sylke Neumann, Organisme d'assurance sociale allemande des accidents du travail et des maladies professionnelles dans l'administration (VBG), Hambourg
- Dr Sylvia Rabstein, Institut pour la prévention et la médecine du travail de la DGUV (IPA), Institut de la Ruhr-Universität Bochum
- Gerold Soestmeyer, directeur de la sous-section spécialisée Éclairage de la DGUV, Organisme d'assurance sociale allemande des accidents du travail et des maladies professionnelles des secteurs des matières premières et de l'industrie chimique (BG RCI), Bochum
- Bettina Tondorf, Institut des Sciences appliquées du travail (ifaa), Düsseldorf
- Reinhard Walleter, fédération patronale Südwestmetall, Stuttgart
- Dr Hanna Zieschang, Institut pour la santé au travail de la DGUV (IAG), Dresde

Résumé de la KAN

Remarque préliminaire : la situation décrite dans cette étude reflète les résultats d'études scientifiques au début de 2017.

Cette étude bibliographique compile une sélection d'études antérieures qui traitent des aspects de l'effet non visuel de la lumière ayant une incidence sur la sécurité et la santé au travail. Pour cela, les points de vue de différentes disciplines ont été pris en compte. En un premier temps, une étude bibliographique a été réalisée du point de vue chronobiologique, puis examinée du point de vue de la médecine du travail et de la technique d'éclairage. Le contenu de ces avis d'experts a été intégré dans cette étude. De plus, l'expertise détaillée relative à la technique d'éclairage est jointe en annexe. Cette expertise présente des principes de base en matière de technique d'éclairage, ainsi que les connaissances actuellement disponibles sur des lésions de l'œil pouvant être causées par des intensités excessives de la composante bleue de la lumière.

Les études disponibles sur les effets non visuels de la lumière ont été pour la plupart réalisées dans des conditions contrôlées (par exemple en laboratoire du sommeil), avec, généralement, un nombre restreint de participants, ou bien ont été effectuées sur des animaux. Ces études conviennent pour la mise en évidence des relations de cause à effet. Ces relations de cause à effet aident, à leur tour, à transposer les conclusions des études à des scénarios autres que ceux qui ont été examinés. Des études effectuées en laboratoire ne peuvent toutefois pas refléter les conditions réelles rencontrées sur le lieu de travail. C'est pourquoi il est important

de procéder à des études complémentaires sur les lieux de travail (études de terrain) avec de nombreux participants, même si ces études peuvent éventuellement subir l'influence de facteurs perturbateurs difficiles à contrôler. De plus, il est important de mener des études qui s'inscrivent sur le long terme.

Différents critères d'exclusion avaient été définis pour la recherche bibliographique (cf. chapitre 3). Treize études ont été examinées de manière plus approfondie (cf. tableau 1). Il s'agit en l'occurrence d'études menées sur le terrain, sur les lieux de travail, avec un minimum de 10 participants. Pour onze de ces treize études, l'éclairage artificiel a été modifié pour les besoins de l'étude. Les deux autres études (n° 1/13 et 2/13) ont porté sur l'influence de la lumière du jour sur le lieu de travail. Trois études (n° 2/13 à 4/13) portent sur le travail de jour, tandis que les dix autres ont été menées pendant le travail de nuit et le travail posté. Les mandataires du projet ont, en outre, procédé à une brève évaluation des études, notamment en ce qui concerne leur conception.

Il est intéressant de constater que de nombreuses études présentent des points faibles, surtout à propos de la technique d'éclairage. Il est ainsi fréquent que la configuration de l'essai soit décrite de manière incomplète, ou que les paramètres radiométriques indiqués soient incorrects.

Se basant sur les résultats disponibles, les mandataires du projet abordent les principes de la loi (allemande) sur la sécurité et la santé au travail (ArbSchG) relatifs aux effets non visuels de la lumière. Évoquant l'Ordonnance sur les lieux de travail (ArbStättV) ainsi que les Règles techniques relatives aux lieux de travail, ils expliquent dans quelle mesure, à leur avis, les exigences contenues dans ces textes peuvent être également transposées à l'effet non visuel de la lumière.

Il ressort de la recherche bibliographique que de nombreuses études pertinentes pour la SST sont encore nécessaires. Il faut d'une part effectuer des études dans le domaine de la recherche fondamentale, par exemple sur la relation dose-effet, sur les différences individuelles, sur les processus d'adaptation ou sur la conception même des études. En outre, des études d'intervention plus spécifiques du point de vue de la médecine du travail sont nécessaires, notamment sur l'influence des médias numériques en tant que sources lumineuses, sur l'influence de la lumière sur le taux d'accidents et d'erreurs, ou encore sur les avantages et les inconvénients de scénarios d'éclairage donnés pendant le poste de nuit. Pour toutes les questions ayant fait jusqu'à présent l'objet de recherches, il serait bon de vérifier systématiquement si des études s'inscrivant sur le long terme sont nécessaires et possibles.

Recommandations de la KAN

La KAN demande au département de la **DGUV en charge du financement des projets de recherche** :

- de lancer et de financer des projets sur des questions de recherche prioritaires concernant les effets non visuels de la lumière du point de vue de la SST, par le biais d'une annonce publique, en prenant en compte les questions soulevées dans la présente étude.

La KAN demande à l'**Institut fédéral de la sécurité et de la santé au travail (BAuA)** :

- de faire des effets non visuels de la lumière un sujet important de la recherche ;
- de tenir compte dans son travail des conclusions décrites dans la présente étude.

La KAN demande aux **institutions de recherche de la prévention et des partenaires sociaux**, ainsi qu'aux **autres institutions de recherche** (par exemple de l'industrie de l'éclairage) :

- d'intégrer dans leur travail de recherche les questions soulevées dans la présente étude et, lors de la réalisation de leurs études, de tenir compte des indications relatives à la technique d'éclairage contenues dans l'annexe.

La KAN demande au **ministère fédéral du Travail et des Affaires sociales (BMAS)** :

- d'examiner les possibilités de financement de la recherche sur les questions de recherche soulevées dans la présente étude ;
- de prendre en compte dans ses travaux (par exemple de réglementation technique) les conclusions décrites dans la présente étude.

La KAN demande au **bureau de la KAN** :

- de demander au **ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBF)** d'examiner les possibilités de financement de la recherche sur les questions de recherche soulevées dans la présente étude.

La KAN demande aux **sous-sections spécialisées concernés de la DGUV** :

- de prendre en compte dans leurs travaux (par exemple de réglementation technique) les conclusions décrites dans la présente étude, et d'en diffuser les contenus ;
- de soutenir la recherche sur les effets non visuels de la lumière.

Il est demandé au **Secrétariat de la KAN** :

- de faire connaître au public les résultats de l'étude (en allemand et en anglais) ;
- de mettre les contenus de l'étude à la disposition du comité de normalisation FNL 27 "Effet de la lumière sur l'individu" au sein du DIN, ainsi que du groupe de travail concerné au sein de l'Union centrale de l'industrie électrotechnique et électronique (ZVEI) et, si nécessaire, de leur présenter ces contenus ;
- de mettre la version anglaise de l'étude à la disposition du secrétariat du comité de normalisation Technique d'éclairage (FNL) au sein du DIN, en lui demandant de la transmettre à la normalisation internationale (ISO/TC 274) ;
- d'examiner quels contenus de l'étude pourraient être intégrés dans des normes, afin de les transmettre ensuite à la normalisation, par exemple des exigences relatives aux méthodes de mesurage et aux produits.

La KAN demande à **PEROSH** :

- de transmettre les questions de recherche aux partenaires européens, et d'en discuter ensemble ;
- le cas échéant, de mettre en place des projets communs.

1 Einleitung

Sonnenlicht – beziehungsweise der Wechsel von Tag und Nacht – ist der dominante Zeitgeber für das zirkadiane System – die innere Uhr – des Menschen. Zur Diskussion steht allerdings die Annahme, dass moderne Lebens- und Arbeitsumgebungen oftmals nicht die Anforderungen einer ausreichenden Versorgung mit dem Zeitgeber Licht für die Ansprüche des zirkadianen Systems erfüllen. Die Folge können Störungen des Schlafes, der Leistungsfähigkeit und der Gesundheit sein. Aufgrund der Bedeutung von Licht für die Biologie des Menschen erlangt die Beleuchtung am Arbeitsplatz große Bedeutung. Die physiologischen Zusammenhänge sowie ihre Bedeutung für den Arbeitsschutz werden in der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Die Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht stammen überwiegend aus Studien unter kontrollierten Bedingungen (z. B. in Schlaflaboren) an meist nur wenigen Teilnehmern, beziehungsweise aus tierexperimentellen Studien. Diese Studien sind gut geeignet, Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aufzudecken. Diese Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge helfen wiederum, Studienergebnisse auf andere Szenarien als die untersuchten zu übertragen. Allerdings können Studien im Schlaflabor nicht die tatsächlichen Gegebenheiten am Arbeitsplatz abbilden. Deshalb sind auch Humanstudien unter natürlichen Bedingungen am Arbeitsplatz (Feldstudien) mit vielen Teilnehmern wichtig, auch wenn solche Studien gegebenenfalls schwer kontrollierbaren Störeinflüssen unterliegen. Allgemein gibt es wesentlich mehr Studien im Schlaflabor als Feldstudien, was u.a. auch durch die schwierigere Durchführbarkeit im Feld begründet ist. In der Einleitung werden zunächst überwiegend Ergebnisse aus Laborstudien (inklusive Tierexperimenten) aufgeführt, um die Prinzipien der Lichtwirkung darzulegen. Für die Literatursuche (Kapitel 3), hinsichtlich der Präsentation von gesicherten Erkenntnissen für den Arbeitsschutz (Kapitel 4), werden ausschließlich Ergebnisse aus Interventionsstudien (Feldstudien) mit menschlichen Teilnehmern herangezogen, um eine bestmögliche Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich primär auf die nichtvisuelle Wirkung von Licht, dessen Wirkungsspitze nach derzeitigem Erkenntnisstand im sichtbaren Spektralbereich zwischen 460 und 490 nm (Nanometer) liegt. Der Fokus liegt auf der nichtvisuellen Wirkung von Licht, aufgenommen über die Augen, auf das zirkadiane System (zirkadian: Latein *circa* = ungefähr und *dies* = Tag) sowie auf physiologische Prozesse, wie z. B. die Melatoninproduktion. Über diese Wirkungen erlangt Licht eine zentrale Bedeutung für den Schlaf und das Aufmerksamkeitsniveau des Menschen. Diese Effekte werden diskutiert hinsichtlich ihrer Relevanz für den Arbeitsschutz. Die vorliegende Arbeit befasst sich nicht mit den Prozessen des Sehens, der visuellen Wahrnehmung der Umwelt sowie der Orientierung im Raum (Licht im

Spektralbereich von 380 bis 780 nm). Zudem bezieht sich die vorliegende Arbeit nicht auf Wirkungen von ultravioletter Strahlung (< 380 nm) oder Infrarotstrahlung (> 780 nm).

1.1 Die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen

Die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen wird zu einem großen Teil über das zirkadiane System vermittelt. Die Schnittstelle zwischen der Umwelt und dem zirkadianen System ist der suprachiasmatische Nukleus (SCN) im Gehirn [1,2]. Der SCN ist ein ungefähr 20 000 Neuronen umfassendes Kerngebiet des vorderen Hypothalamus. Der SCN empfängt und verarbeitet Informationen über die Lichtverhältnisse der Umgebung. Diese Signale werden von melanopsinhaltigen Ganglienzellen (ipRGCs) der Retina (Netzhaut) über den retinohypothalamischen Trakt zum SCN geleitet [3-5].

Die Neuronen des SCN sind biologische Oszillatoren, die gewöhnlich miteinander synchronisiert sind und endogene Rhythmen in Physiologie und Verhalten (z. B. Verdauung, Schlaf, Aufmerksamkeit) orchestrieren [6]. Die endogenen Rhythmen in Physiologie und Verhalten beruhen wiederum ebenfalls auf biologischen Oszillationen in letztlich allen Körperzellen. Die Oszillatoren des SCN und der Peripherie sind endogen durch einen negativen Transkription-Translations-Regelkreis spezifischer Gene geregelt [7]. Wie genau die Synchronisation zwischen Neuronen des SCN und den Körperzellen über humorale, endokrine und molekulare Signalwege erfolgt, ist noch nicht vollständig bekannt. Zur Synchronisation des zirkadianen Systems mit der Umwelt ist ein regelmäßiger Rhythmus von Tag (hell) und Nacht (dunkel) unentbehrlich. [8,9]

Die Wirkung von Licht auf das zirkadiane System ist in einer Vielzahl unabhängiger Studien belegt worden [9-28]. Die ipRGCs sind besonders sensitiv im Spektralbereich zwischen 460 und 490 nm. Helles Licht, vor allem helles Licht im blauen Spektralbereich, unterdrückt besonders effektiv die Melatoninproduktion [8,9,29]. Hinsichtlich der Unterdrückung der Melatoninproduktion ist die Sensitivität des zirkadianen Systems bei 460 nm unter Laborbedingungen bei dunkeladaptierten Teilnehmern am höchsten und erfolgt bereits zwischen $\approx 10^{12}$ Photonen / ($\text{cm}^2 \times \text{s}$), (entspricht 0,18 Lux) und $\approx 10^{10}$ Photonen / ($\text{cm}^2 \times \text{s}$), (entspricht 0,002 Lux) [29]. Inwieweit diese Werte bei nicht dunkeladaptierten Individuen gelten, ist nicht gesichert und muss noch tiefergehend untersucht werden.

Beitrag retinaler Stäbchen und Zapfen an der nichtvisuellen Wirkung von Licht

Neben den ipRGCs sind auch die retinalen Zapfen (Sensitivitätsmaximum der Hellempfindlichkeit bei 555 nm im grünen Spektralbereich) und Stäbchen (Sensitivitätsmaximum bei 505 nm im blau-grünen Spektralbereich) an der nichtvisuellen Wirkung von Licht beteiligt [30]. Rotlicht allein (630 und 700 nm) [31] sowie Rotlicht (627 nm) in Kombination mit Blaulicht (479 nm) zeigte auch bei variablen Intensitäten (10^{13} - 10^{14} Photonen / ($\text{cm}^2 \times \text{s}$), entsprechen 36 – 203 Lux) [32] keine zusätzliche Wirkung hinsichtlich der Unterdrückung von Melatonin. Eine neuere Studie belegte hingegen, dass auch Rotlicht die zirkadiane Phase des DLMO (dim light melatonin onset = Zeitpunkt des natürlichen Anstiegs von Melatonin vor dem Schlaf) verschieben kann [33]. Die Autoren untersuchten bei 24 Teilnehmern in einer Laborstudie den Einfluss von monochromatischem Rotlicht in drei unterschiedlichen Szenarien à sechs Stunden in einer Nacht:

- (1) Rotlicht (631 nm, 10^{13} Photonen / ($\text{cm}^2 \times \text{s}$), entsprechen 5,5 Lux)
- (2) intermittierendes Rotlicht (Periode: 1 Minute)
- (3) 2 500 Lux helles Weißlicht

Die Phase des DLMO verschob sich unter Lichtszenario 1 um $0,68 \pm 0,54$ Stunden und unter Szenario 2 um $0,80 \pm 0,37$ Stunden. Statistisch waren Szenario 1 und 2 nicht signifikant verschieden. Bei zwei der 24 Teilnehmer war die Verschiebung durch das Rotlicht ähnlich stark wie durch Weißlicht (Szenario 3). Im Durchschnitt war der Einfluss von Weißlicht (Szenario 3) mit einer Phasenverschiebung des Melatonins von $2,83 \pm 0,29$ Stunden am stärksten. Rotlicht (Szenarien 1 und 2) führte im Gegensatz zu Weißlicht (Szenario 3) zu keiner Unterdrückung von Melatonin. Anzumerken ist, dass diese Studie kein Cross-Over-Design verwendete. Das heißt, jedes der drei Szenarien wurde von jeweils acht unterschiedlichen Probanden durchlaufen. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der drei Gruppen untereinander. Zudem ist die Interpretation der Ergebnisse dieser Studie dadurch erschwert, dass sich der experimentelle Aufbau der drei Szenarien unterschied. Während das Licht in Szenario 1 und 2 über eine sogenannte Ganzfeld-Apparatur (Lichtexposition in einem Winkelraum von 180°) dargeboten wurde, handelte es sich bei Szenario 3 um eine rein frontale Beleuchtungssituation ohne Ganzfeld.

1.2 Faktoren der Lichtwirkung auf den Menschen

Die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen hängt mindestens von den folgenden fünf Faktoren ab: (i) Lichtintensität, (ii) Lichtspektrum, (iii) Dauer der Lichtexposition, (iv) Dauer vorheriger Lichtexposition (Lichthistorie) und (v) Zeitpunkt der Lichtexposition (Abbildung 1).

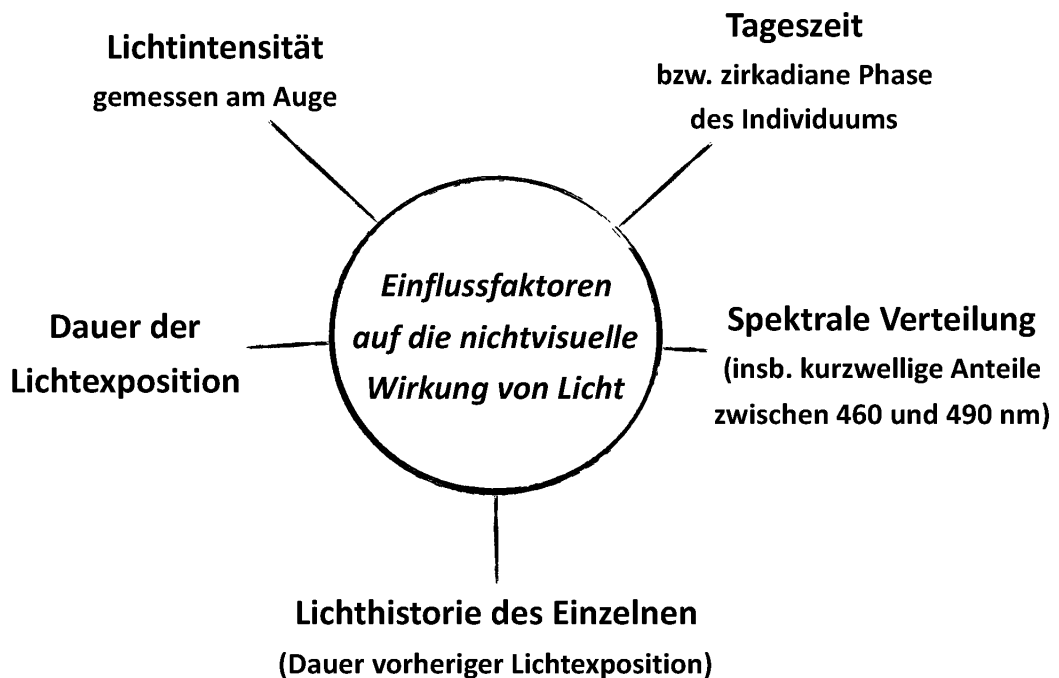


Abbildung 1: Faktoren, die nichtvisuelle Wirkungen von Licht auf den Menschen beeinflussen.

Gegenstand aktueller Forschung sind Untersuchungen zur relativen Bedeutung und Interaktion dieser Faktoren, wie zum Beispiel von Expositionsdauer und Lichtintensität [30,34] sowie des Spektrums [35]. Gesicherte arbeitsschutzrelevante Parameter sind aus diesen Studien jedoch noch nicht abzuleiten, wären aber wichtig für die Gestaltung von Arbeitsplätzen. Die zeitliche und räumliche Veränderung (z. B. Größe der leuchtenden Fläche der Lichtquelle) von Lichtintensität und Lichtspektrum sind bisher nur wenig untersucht.

1.2.1 Einfluss vorheriger Lichtexposition (Lichthistorie)

Die Lichthistorie beeinflusst die Effektgröße einer Lichtintervention [36-39]. Die Reaktion auf einen Lichtstimulus in Abhängigkeit der vorherigen Lichtexposition ist im Elektroenzephalogramm anhand von ereignisbezogenen Potentialen [40] sowie durch zerebrale Blutflussmessungen [41] belegbar. So konnte zudem gezeigt werden, dass ein Aufenthalt mehrerer Stunden in gedimmtem Licht dazu führt, dass das Gehirn und das zirkadiane System auf eine darauffolgende Exposition mit hellem Licht stärker reagiert als nach vorherigem Aufenthalt in hellem Licht [36-38].

Für den Arbeitsschutz bedeutet dies, dass die Reaktion des zirkadianen Systems auf die Arbeitsplatzbeleuchtung (tagsüber wie auch nachts) durch die Lichtexposition vor Arbeitsbeginn beeinflusst sein kann. Ebenso beeinflusst die Arbeitsplatzbeleuchtung somit auch potentiell die Reaktion des zirkadianen Systems auf Licht nach der Arbeit. Dieser zeitliche Zusammenhang ist bei der Bewertung der Arbeitsplatzbeleuchtung und einer nichtvisuellen Wirkung auf das zirkadiane System zu beachten. Für eine präzise Abschätzung der nichtvisuellen Wirkung von Licht muss somit die Lichthistorie (vergangene Exposition zu Licht und Dunkelheit gleichermaßen) mit einbezogen werden. Vereinfacht gesagt: alles Licht zählt.

1.2.2 Einfluss des Zeitpunktes der Lichtexposition

Der Zeitpunkt einer Lichtexposition ist von unmittelbarer Bedeutung für die Effektgröße einer Lichtwirkung [9,22,42]. Die nichtvisuelle Wirkung von Licht ist zu den Zeitpunkten des natürlichen Aufwachens und Schlafanfangs sowie nachts am stärksten. Aus diesem Grund ist Schichtarbeit ein gängiges Studienmodell, um den Einfluss von Licht auf dieselben Individuen zu unterschiedlichen Tages- und Nachtzeiten zu untersuchen. Vor allem Laborstudien haben wichtige Erkenntnisse über den Einsatz von Licht in simulierten Schichtarbeitsstudien erzielt [43-57]. Neben reinen Laborstudien wurden auch kombinierte Labor-Feldstudien [58-61] sowie Studien unter natürlichen Bedingungen (Studien am Arbeitsplatz mit Lichtintervention) durchgeführt [62-69]. Es konnte gezeigt werden, dass eine gezielte Anwendung von Licht in der Nachtschicht zu einer – teilweisen – Anpassung des zirkadianen Systems eingesetzt werden kann [65,70,71]. Unter natürlichen Bedingungen scheinen die Anpassungsraten jedoch individuell und sehr variabel zu sein. Eine Analyse aus dem Jahr 2008 zeigte, dass weniger als drei Prozent Dauernachtschichtarbeiter komplette Anpassung (bezogen auf Melatonin) zeigten, 25 % zeigten teilweise und 72 % keine Anpassung [72]. Eine jüngere Studie mit 15 Streifenpolizisten berichtete hingegen eine Anpassung des zirkadianen Systems in 40 % der Studienteilneh-

mer [73]. Anpassung des zirkadianen Systems in dieser Studie bedeutete eine Anpassung an den Tagschlaf. Für die verbleibenden 60 % der Studienteilnehmer bedeutete dies, dass sie sich nicht bzw. nur wenig angepasst hatten.

Für die Praxis stellt sich allgemein die Frage, wie viele Individuen sich unter welchen Umständen erfolgreich an Schicht- und Nachtarbeit anpassen können. Diese Frage ist aktuell nicht eindeutig zu beantworten, da unter anderem Erhebungsinstrumente fehlen, um aussagekräftige Anpassungsmerkmale zu erfassen. Bekannt ist, dass ein Grund für die Anpassungsschwierigkeiten des zirkadianen Systems die morgendliche Lichtexposition auf dem Heimweg ist, welche der Anpassung des zirkadianen Systems während der vorherigen Nachtschicht entgegenwirken kann.

Grundsätzlich gilt, dass helles Licht in der ersten Hälfte der biologischen Nacht (vor dem Minimum der Körperkerntemperatur) zu einer Nachverschiebung („Späterwerden“) der zirkadianen Phase führt [38]. Helles Licht in der zweiten Hälfte der biologischen Nacht (nach dem Minimum der Körperkerntemperatur) hingegen führt zu einer Vorverschiebung („Früherwerden“) der zirkadianen Phase. Chang et al. (2013) [37] zeigten beispielsweise, dass die nichtvisuelle Wirkung von Licht zudem nicht allein von der Dauer der vorherigen Lichtexposition abhängt, sondern auch von der Intensität. Eine weitere Studie an 123 Krankenschwestern aus dem Jahr 2011 [74] fand beispielsweise keinen Einfluss von Licht auf die Melatoninproduktion, wenn die Werte der Lichtexposition während sowohl Tag- als auch Nachtschichten gemeinsam verrechnet wurden. Nur wenn die Lichtexposition in der Nachtschicht allein betrachtet wurde, fanden die Autoren einen geringen Einfluss auf die Melatoninwerte [74]. Wenn nicht gleichermaßen während der Arbeitszeit und außerhalb der Arbeitszeit Rücksicht auf die Lichtexposition genommen wird, dann ist die nichtvisuelle Wirkung einer bestimmten Lichtquelle nur bedingt zu interpretieren. Tagsüber ist natürlicherweise kein Melatonin in Blut, Speichel oder Urin nachweisbar, so dass per se eine zusätzliche Unterdrückung der Melatoninproduktion durch künstliche Lichtexposition während des Tages nicht zu erwarten ist. Helles Licht kann aber die Wachsamkeit [23,24] und die Daueraufmerksamkeit [75] am Arbeitsplatz erhöhen.

1.2.3 Einfluss von Lichtspektrum und Lichtintensität

Sasseville und Mitarbeiter [76] haben an 20 Teilnehmern in simulierten Nachtschichten untersucht, welchen Einfluss das Tragen von Blaulicht reduzierenden Brillen hat, die kurzwelliges blaues Licht herausfiltern. Die Teilnehmer wurden hierzu in jeweils zwei Nächten zwischen 23:00 und 04:00 Uhr zunächst an gedimmtes Licht adaptiert. In der zweiten Nacht erfolgte um 03:00 Uhr eine von zwei 30-minütigen Lichtinterventionen nach dem Zufallsprinzip:

- Intervention (a) umfasste für fünf Frauen und fünf Männer eine Exposition mit $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (1 420 Lux) ungefiltertem LED-Licht ohne Brille
- Intervention (b) umfasste für sechs Frauen und vier Männer eine Exposition mit $1\,500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (3 600 Lux) von derselben Lichtquelle, jedoch mit Tragen einer Brille, um auf der Retina einen zu Intervention (a) vergleichbaren Wert von $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (1150 Lux) zu erreichen

Das Tragen der Blaulicht reduzierenden Brille hatte keinen Einfluss auf Wachheit (Visual Analogue Scale und Conners' Continuous Performance Test II, CPT-II), Energielevel, Gemütszustand, Ängstlichkeit und Müdigkeit. Unabhängig von der Intervention verbesserten sich die Werte für subjektive Wachheit ($p < 0,001$), Energie ($p < 0,001$) und Müdigkeit ($p < 0,05$) jedoch in der zweiten Testnacht. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass auch helles Licht mit reduzierten kurzwelligen Anteilen bei erhöhter Müdigkeit während der Nachtschicht positive Effekte zeigen kann. Anzumerken ist, dass die Vergrößerung der Bestrahlungsstärke (vor dem Auge) durch eine Reduzierung des Abstandes der Lichtquelle zum Auge erfolgte. Durch die Verkleinerung des Abstands Lichtquelle-Auge bleibt, trotz ansteigender Bestrahlungsstärke vor dem Auge, die Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut konstant. Allerdings wird dafür das Bild der Lichtquelle auf der Netzhaut größer. Es ist somit nicht klar, ob die ermittelten Effekte wegen des Spektrums oder der Winkelgröße der Lichtquelle zustande kamen (vgl. lichttechnische Erläuterungen im Anhang 2).

Eine niederländische Studie [77] untersuchte den Einfluss des dauerhaften Tragens von orangefarbenen Kontaktlinsen (53 % Reduktion des Spektralbereichs zwischen 420 und 500 nm) über 16 Tage/24 h auf die lichtinduzierte Unterdrückung von Melatonin. Nach 30 Minuten Tragen der Kontaktlinsen war die lichtinduzierte Unterdrückung von Melatonin zunächst reduziert (600 Lux am Auge, $190,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$). Nach 16 Tagen/24 h Tragen der Kontaktlinsen war die lichtinduzierte Unterdrückung von Melatonin hingegen vergleichbar zur Kontrollsituation ohne Kontaktlinsen (als wären die Kontaktlinsen nie getragen worden). Es fand also eine Anpassung des Systems an die veränderten Lichtverhältnisse statt. Da keine Zwischenwerte ermittelt wurden, lassen sich aus dieser Studie keine weiteren Hinweise auf die Anpassungsgeschwindigkeit ermitteln.

Rahman und Kollegen [78] haben in einer Studie neun Beschäftigte eines Pflegedienstes (fünf Frauen und vier Männer; Durchschnittsalter $31,3 \pm \text{SD } 4,6$ Jahre) zwei verschiedenen Beleuchtungssituationen ausgesetzt. Zum einen war dies ihre gewöhnliche Arbeitsplatzbeleuchtung ($179,4 \pm \text{SD } 48,3$ Lux) und zum anderen eine Arbeitsplatzbeleuchtung, bei der Wellenlängen unter 480 nm herausgefiltert wurden. Es wird allerdings nicht genannt, wo (am Auge oder auf dem Tisch) und in

welche Richtung gemessen wurde. Außerdem wird durch das Filtern nicht nur das Spektrum verändert, sondern auch die Bestrahlungsstärke reduziert. Somit können bei dem gefundenen Effekt nicht nur die unterschiedlichen Blauanteile eine Rolle spielen, sondern auch die veränderte Intensität des Lichts.

Die Teilnehmer wurden über eine Folge von drei Nachtschichten hinweg untersucht. Die Intervention mit gefiltertem Licht führte zu um 40 Minuten verlängertem Gesamtschlaf, einer Verkürzung der Aufwachzeiten nach dem Einschlafen um 22 Minuten und einer Verkürzung der Zeit bis zum Einschlafen (Schlaflatenz) um acht Minuten. Die Melatoninwerte waren in der ersten und der mittleren (zweiten) Nacht erhöht gegenüber den Nächten ohne Filter. Die subjektive Müdigkeit wurde durch die Lichtfilterung nicht beeinflusst. Die Reaktionszeiten waren im GO/NO-GO-Test für Aufmerksamkeits- und Konzentrationsfähigkeit in den Nächten mit Lichtfilterung auf dem Niveau der Tagesleistungen. Dieser Effekt war nur in der ersten Nacht statistisch signifikant, was auf Anpassungsvorgänge des zirkadianen Systems gegenüber der Arbeitsplatzbeleuchtung schließen lässt. Dieselben Parameter wurden auch während der Tagschlafperioden zwischen den Nachtschichten erfasst, jedoch zeigte die Lichtintervention hierbei keine signifikante Änderung der Messwerte.

Derartige Adaptationsprozesse, wie sie in den oben beschriebenen Studien beobachtet wurden, sind noch nicht ausreichend verstanden. Sie versprechen jedoch – falls in Zukunft tiefergehend untersucht – innovative neue Erkenntnisse für die Praxis.

Aufgrund der zentralen Rolle von Licht für die Regulation des Schlafes kann der Schlaf aufgrund ungenügender Tageslichtexposition und gleichzeitig nicht optimaler Exposition durch künstliche Beleuchtung (durch z. B. Computerbildschirme, Tablets, Smartphones, Umgebungsbeleuchtung) [79,80] beeinträchtigt sein, mit paralleler Wirkung auf das Niveau der Aufmerksamkeit, Müdigkeit sowie körperlichen Leistungsfähigkeit [35,81,82]. Es konnte gezeigt werden, dass Licht von LED-Monitoren am Abend das zirkadiane System beeinflusst (gemessen anhand der Unterdrückung von Melatonin) sowie das Niveau der Wachheit erhöhen kann, was die kognitive Leistungsfähigkeit signifikant verbesserte [83]. Laborstudien lieferten zudem Hinweise darauf, dass Licht von E-Books/Tablets/E-Readern nachts Melatonin unterdrücken kann [79] beziehungsweise abends die Phase des DLMO (dim light melatonin onset = Zeitpunkt des Anstiegs von Melatonin vor dem Schlaf) verschieben kann. Die Konsequenz kann erhöhte Wachheit am Abend und verminderte kognitive Leistung sowie erhöhte Müdigkeit am folgenden Morgen sein [84]. Selbst die gewöhnliche abendliche Beleuchtung zuhause kann den Anstieg des Melatonins vor dem Schlaf vermindern [80].

Hinsichtlich der LED-Technologie weist der vorläufige Bericht des *Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks* der Europäischen Kommission [85] darauf hin, dass der Einfluss auf das zirkadiane System in ähnlicher Weise von den Eigenschaften der emittierten optischen Strahlung und von dem Einsatz (Zeitpunkt und Dauer) der LED abhängt wie bei anderen Lichtquellen und Lichttechnologien auch.

Die Wachheit erzeugende Wirkung von Licht kann am Tag und in der Nacht auftreten [15,86]. In Bezug auf die Nacht testete eine Studie mit zehn Teilnehmern eine 60-minütige Lichtexposition mit Weißlicht (mit Intensitäten von jeweils 1 000, 500 und 30 Lux) bzw. Grünlicht (monochromatisch 530 nm, Roscolux Moss Green Filter #89, mit Intensitäten von jeweils 1 000 und 500 Lux) nachts in der Zeit zwischen 02:00 und 03:00 Uhr [87]. Außerhalb der Lichtintervention hielten sich die Teilnehmer zwischen 18:00 und 06:00 Uhr im Labor bei 30 Lux Umgebungsbeleuchtung auf. Die Autoren bestätigten eine Unterdrückung des Hormons Melatonin unter Weißlicht wie auch unter Grünlicht. Es wurde keine Wirkung der Lichtinterventionen auf die oral gemessene Körpertemperatur, kognitive Leistungsfähigkeit und Gemütsverfassung nachgewiesen.

Zudem konnte in einer anderen Studie [88] gezeigt werden, dass Licht kognitive Leistungen unterschiedlich beeinflusst. So konnte Licht die Reaktionszeit besonders bei solchen Aufgaben erhöhen, die eine konstante Aufmerksamkeit verlangen, jedoch weniger bei Aufgaben, die exekutive Funktionen verlangen [88].

Hoffmann und Kollegen [89] haben diesbezüglich in einer Laborstudie variable Lichtszenarien am Tag untersucht. An der Studie nahmen elf gesunde männliche Probanden (22 bis 34 Jahre) teil. Die maximale Lichtexposition wurde jeweils zwischen 09:30 und 10:30 Uhr sowie zwischen 13:00 und 14:00 Uhr geschaltet.

- Szenario 1 war ein reguläres Beleuchtungssystem mit 500 Lux und einer Farbtemperatur von 4 000 Kelvin (K)
- Szenario 2 war ein Beleuchtungssystem mit 6500 K und konnte zwischen 500 und 1 800 Lux variiert werden

Alle Teilnehmer haben an beiden Beleuchtungssituationen (Szenario 1 und Szenario 2) in einem Cross-Over-Studiendesign teilgenommen. Der Abstand zwischen beiden jeweils drei Tage dauernden Lichtinterventionen betrug elf Tage. Beide Lichtinterventionen (Szenario 1 und Szenario 2) führten zu einer signifikanten Reduktion von Melatonin im Morgenurin. Nach drei Tagen unter Beleuchtungsszenario 2 waren die Melatoninwerte im Urin zu den Zeitpunkten 17:00 Uhr und 9:00 Uhr signifikant erhöht gegenüber drei Tagen unter Beleuchtungsszenario 1. Bezüglich

des subjektiven Gemütszustandes bewerteten die Teilnehmer ihr Gefühl des ‚aktiviert seins‘ an Tag 1 (von 3 Tagen) höher unter dem Licht in Szenario 2 als unter dem Licht in Szenario 1. Hingegen waren die Angaben bezüglich des Gefühls des ‚deaktiviert seins‘ und von ‚Erschöpfung‘ nach Aufenthalt in Szenario 1 erhöht. Über die jeweils drei Studientage je Beleuchtungssituation hinweg konnten die Autoren keinen klaren Trend hinsichtlich der psychologischen Parameter erkennen. Vor allem die Parameter ‚deaktiviert sein‘, ‚aktiviert sein‘ und ‚Konzentrationsfähigkeit‘ veränderten sich in gegenläufiger Richtung über die drei Studientage hinweg. Aufgrund der kurzen Studiendauer und hohen Variabilität der Ergebnisse lassen sich keine gesicherten Aussagen für den Arbeitsschutz ableiten, bis auf die Bestätigung des Einflusses von Licht auf Messwerte von Melatonin.

Eine Lichtintervention über drei simulierte Nachtschichten hinweg konnte in einer anderen Laborstudie [90] eine nur geringe Anpassung von Melatonin und Tagschlaf zeigen. Vor der Intervention schliefen die sechs Teilnehmer für eine Woche zu festen Zeiten (23:30 bis 08:00 Uhr bei < 1 Lux Umgebungsbeleuchtung). In drei simulierten Nachtschichten erfolgte dann im Anschluss eine Intervention mit einer Beleuchtungsstärke von 1 200 Lux am Auge (Vollspektrum) und einer Intensität von 492 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Die Lichtexpositionszeiten für die drei Nächte waren in:

- Nacht 1: 20:00 bis 02:00 Uhr
- Nacht 2: 22:00 bis 04:00 Uhr
- Nacht 3: 24:00 bis 06:00 Uhr

Nach jeweils sechs Stunden Lichtintervention hielten sich alle Teilnehmer für acht Stunden in Dunkelheit bei unter einem Lux Umgebungsbeleuchtung im Labor auf. Eine Exposition mit Tageslicht wurde vermieden. Die Verschiebung des Maximums der Amplitude des Melatonins im Urin (aMT6s) lag bei $2,67 \pm 0,3$ Stunden ($p < 0,001$, fünf Teilnehmer), im Blutplasma bei $2,35 \pm 0,29$ Stunden ($p < 0,001$, sechs Teilnehmer) und im Speichel bei $1,97 \pm 0,32$ Stunden ($p < 0,01$, sechs Teilnehmer). Die Autoren berichten zudem von einer Verschiebung des Maximums der Amplitude des Wachheitsgrades (gemessen via 10 cm Visual Analog Scale, VAS) am ersten Tag nach der Lichtintervention von $3,08 \pm 0,67$ Stunden ($p < 0,01$, sechs Teilnehmer).

In einer weiteren Laborstudie [18] wurde eine Gruppe von 16 Teilnehmern (acht Frauen und acht Männer mit einem Altersdurchschnitt von $23,3 \pm 2,4$ Jahre) einer Anzahl psychologischer und physiologischer Tests unterzogen, um den Einfluss von einmalig 6,5 Stunden monochromatischem blauem (460 nm) und grünem (555 nm) Licht (1 300 Watt Xenonlampe) während der Nacht zu vergleichen. Die Lichtintervention erfolgte 9,25 Stunden vor dem individuellen natürlichen Aufwachzeitpunkt

(bestimmt in der Baseline vor Beginn der Laborstudie). Die Photonendichte war für beide Lichtinterventionen identisch ($2,8 \times 10^{13}$ Photonen $\times \text{cm}^{-2} \times \text{s}^{-1}$). Die Lichtintensitäten am Auge betragen für das grüne Licht $10,0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (68,3 Lux) und für das blaue Licht $12,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (5 Lux). Bei allen Teilnehmern wurden vor der Lichtintervention die Pupillen weitgestellt, um den Lichteinfall in die Augen zu standardisieren. Bei allen Teilnehmern wurde ein Dauer-EEG erfasst, sowie alle 30 bis 60 Minuten psychologische Tests durchgeführt. Zur Bestimmung von Melatonin und Cortisol aus dem Plasma wurden alle 30 Minuten Blutproben entnommen.

Die einmalige Lichtintervention von 6,5 Stunden mit blauem Licht gegenüber der Lichtintervention mit grünem Licht führte zu einer signifikant stärkeren Reduktion der Müdigkeit (Karolinska Sleepiness Scale, KSS) sowie der Reaktionszeit und Fehlerrate in einem akustischen kognitiven Test (10-minütige akustische Psychomotor Vigilance Task, PVT). Die reduzierte Müdigkeit spiegelte sich in einer Reduktion von Alpha-Wellen im EEG (Vitaport-3 Digitalrecorder, TEMEC Instruments B.V., Kerkrade, Niederlande) wider.

Die Exposition mit blauem Licht unterdrückte das Melatonin der Teilnehmer um $87,7 \pm 11,0 \%$. Die Exposition mit grünem Licht unterdrückte das Melatonin der Teilnehmer um $39,1 \pm 34,1 \%$. Die Teilnehmer, bei denen das Melatonin besonders stark unterdrückt war, haben schneller und mit weniger Fehlern sowie unter weniger Müdigkeit die Testbatterie bestritten. Ob Melatonin an den veränderten Leistungswerten beteiligt ist, kann auf Basis dieser Ergebnisse nicht beantwortet werden. Von einem Einfluss von Melatonin auf die Leistung ist zunächst nicht auszugehen. Die Aufmerksamkeitsleistung spiegelte sich zudem in Veränderungen der delta-theta Frequenzen im EEG wider, was auf eine Reduktion des homöostatischen Schlafdrucks hinweist. Kein Einfluss zeigte sich hinsichtlich der Alphawellen im EEG. Die Lichtexposition mit 460 nm gegenüber 555 nm hatte keinen unterschiedlichen Einfluss auf die Werte von Cortisol ($p = 0,5$), was auf keine unterschiedliche Erregung durch die beiden Lichtexpositionen hinweist.

2 Kontext und Ziel der vorliegenden Arbeit

Beispiele für die nichtvisuelle Wirkung von Licht existieren hinsichtlich der Faktoren Schlaf, Wachheit, Aufmerksamkeit sowie einer Reihe physiologischer Parameter (z. B. Melatonin, Cortisol, Körpertemperatur [8,9,20,46,91]). Hinsichtlich der nicht-visuellen Lichtwirkung lassen sich folgende potentielle Zusammenhänge für den Arbeits- und Gesundheitsschutz vermuten:

- Gute Arbeitsfähigkeit und Arbeitssicherheit setzen erholsamen Schlaf voraus [92-95];
- Erholsamer Schlaf definiert sich über Schlafdauer, -tiefe und -qualität sowie die (tages-)zeitliche Lage des Schlafes und hängt von einer ungestörten Funktion des zirkadianen Systems ab [6,91,96];
- Ein Mangel an Tageslicht sowie zu viel künstliche Beleuchtung mit hoher Intensität und/oder hohem Anteil kurzweiliger blauer Spektralbereiche (vor allem zwischen 460 und 490 nm) zu unnatürlichen Zeiten (z. B. vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang) stören das zirkadiane System [79,80,96,97];
- Eine Störung des zirkadianen Systems, sowie durch dieses gesteuerter Hormone (z. B. Melatonin, Cortisol), führt zu Schlafstörungen und erhöhter Müdigkeit [96,98,99], Konzentrations- und Aufmerksamkeitsdefiziten [100-102], erhöhtem Unfallrisiko [93,94,103-105] und kann psychische [106,107] Beanspruchungen [106-108], depressive Störungen [108], kardio-metabolische Störungen [109-112] sowie Übergewicht [6,113] begünstigen.

Trotz Schlüssigkeit dieser potentiellen Zusammenhänge bleibt unbeantwortet, ob die nichtvisuelle Wirkung von Licht tatsächlich praktisch relevant für den Arbeitsschutz ist. Zur Beantwortung dieser Frage wurden in der vorliegenden Arbeit Studien zusammengetragen, die unter natürlichen Bedingungen die Wirkung einer Änderung der Beleuchtung am Arbeitsplatz auf Schlaf, Müdigkeit, Wachheit, Aufmerksamkeit und das zirkadiane System untersucht haben. Vor allem aus Interventionsstudien mit Licht unter realen Bedingungen lassen sich im Vergleich zu reinen Beobachtungsstudien ohne Intervention oder Laborstudien realistische arbeitsschutzrelevante Aussagen treffen. Im Folgenden wird die Methode der Literatursuche dargestellt (Kapitel 3) mit anschließender Darstellung der Ergebnisse (Kapitel 4). Auf Basis der Ergebnisse werden offene Forschungsfragen aufgezeigt (Kapitel 6).

3 Methode der Literatursuche

Die Literatursuche (Stand 17.01.2017) wurde über die Datenbanken Medline/Pubmed und SCOPUS durchgeführt. Die Suchalgorithmen sind im Anhang 1 dieses Dokuments aufgeführt. Der Fokus lag darauf, auf der Basis der publizierten Literatur zu erarbeiten, inwieweit die nichtvisuelle Wirkung von Licht Relevanz für den Arbeitsschutz hat. Aus diesem Grund wurden reine Laborstudien/Simulationsstudien ausgeschlossen, um möglichst anwendungsbezogene und realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Die Literatursuche war auf die Jahre nach 2000 beschränkt (u. a. aufgrund zeitlicher Begrenzung zur Erstellung der vorliegenden Arbeit), wobei Ergebnisse, die vor 2000 publiziert wurden, durch das Hinzuziehen der Sekundärliteratur mit berücksichtigt sind. Die Ausschlusskriterien für die Literatursuche sind untenstehend aufgeführt. Die Suche in Medline/Pubmed erzielte 52 Treffer und in SCOPUS 305 Treffer (Abbildung 2).

Die folgenden **Ausschlusskriterien** fanden Anwendung:

- Laborstudien (z. B. Simulation von Schichtarbeit)
- Studien mit weniger als 10 Teilnehmern
- Studien, die vor dem Jahr 2000 publiziert wurden
- Reviews, Konferenzbeiträge, Editorials, Kommentare
- Studien an Tieren
- Studien an blinden Menschen, Probanden mit Depression, psychischen Beschwerden, Insomnie oder anderen Schlafproblemen
- Studien mit Probanden in der Antarktis, in Polarregionen oder auf Bohrinseln
- Studien zum Thema Flickern

Zusätzlich wurde folgende Sekundärliteratur zum weiteren Abgleich herangezogen:

- Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit, TU Ilmenau 2009 [114]
- Lighting for health and well-being in education, work places, nursing homes, domestic applications, and smart cities; Accelerate SSL Innovation For Europe – 2014 [115]
- Research Roadmap for Healthful Interior Lighting Applications, CIE 218:2016 [116]
- Chancen und Risiken beim Einsatz künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung in Arbeitsstätten, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2016 [117]

Als gesichert werden in der vorliegenden Arbeit Ergebnisse bezeichnet, die in mehr als einer Interventionsstudie gezeigt sind, also Effekte durch eine gezielte Manipulation mit Licht am Arbeitsplatz. Diese Effekte zeigen, dass Licht einen Effekt auf den Menschen hat, auch wenn sich die körperlichen Reaktionen individuell in Richtung (z. B. Vorverschiebungen gegenüber Nachverschiebungen von biologischen Rhythmen) und Ausprägung (z. B. stärkere Wirkung von hellem Licht auf die Reduktion von Müdigkeit in der Nacht gegenüber am Tag) unterscheiden können. Zudem finden die Ergebnisse Konsens in der wissenschaftlichen Community.

Dies resultierte in einer Anzahl von dreizehn Publikationen (Abbildung 2, Tabelle 1), mit 11 bis 13 296 Teilnehmern.

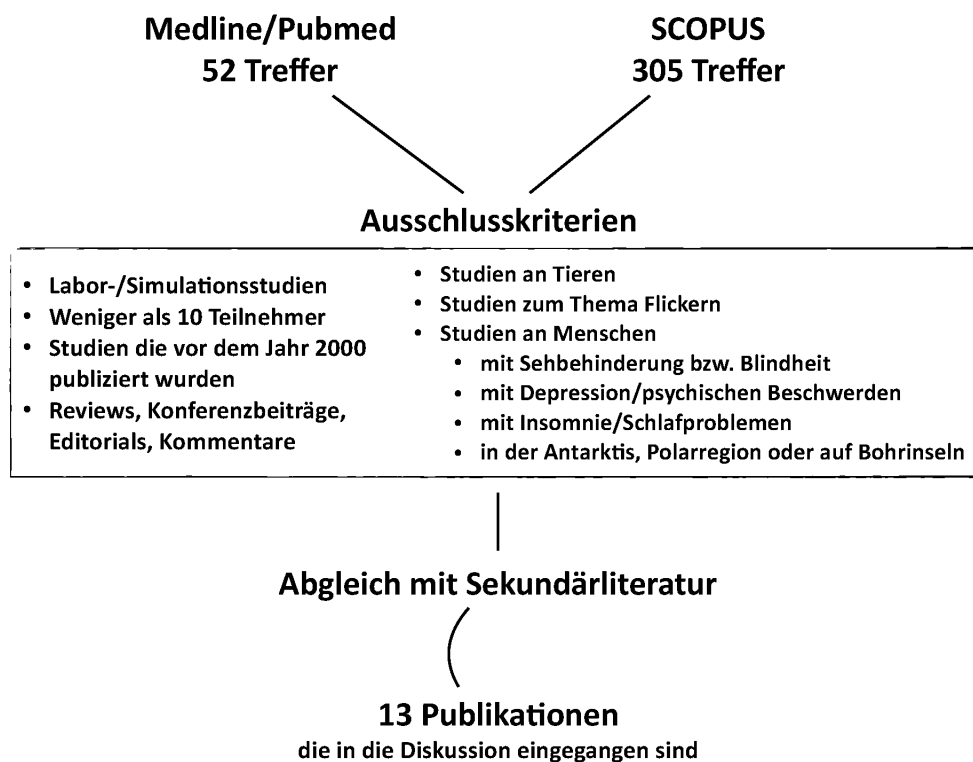


Abbildung 2: Selektion der Literatur

Die finalen dreizehn Publikationen (Tabelle 1) berichten über Ergebnisse aus Feldstudien hinsichtlich der nichtvisuellen Wirkung von Licht im Kontext Arbeit. Elf der dreizehn Studien berichten Ergebnisse einer Intervention mit künstlicher Beleuchtung. Die anderen zwei Studien (Nr. 1/13 und Nr. 2/13) berichten Ergebnisse über

den Einfluss von Tageslicht am Arbeitsplatz. Drei Studien (Nr. 2/13 bis 4/13) behandeln Tagarbeit, zehn fanden im Bereich Nacht- und Schichtarbeit statt. Die vorliegende Arbeit erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit aller Publikationen zu diesem Thema.

Tabelle 1: Übersicht finale 13 Studien aus der Literatursuche (K = Kelvin, mw = Milliwatt, nm = Nanometer, cm = Zentimeter)

#	Population	Anzahl Teilnehmer	Alter Ø	Intervention	Dauer	Ergebnis	Kontrollgruppe	Referenz
1	Beschäftigte eines Verkehrsunternehmens mit Schichtdienst	13 296	39,9	Vergleich Tageslicht am Arbeitsplatz ja/nein	3 Monate	mehr Insomnie, Tagesschläfrigkeit und nicht erholsamer Schlaf	mit/ohne Tageslicht	Leger et al. 2011
2	Büroangestellte ohne Schichtdienst	49	39,5	Vergleich Fenster am Arbeitsplatz ja/nein	2 Wochen	mit Fenster vitaler, weniger physische Beschwerden, besserer/längerer Schlaf	Vergleich mit/ohne Fenster	Boubekri et al. 2014
3	Büroangestellte ohne Schichtdienst	94	36,4	Raumbeleuchtung 4 000 K im Vergleich zu 17 000 K	2 x 4 Wochen	mehr Wachheit, bessere Leistung, Schlafqualität und Befindlichkeit bei 17 000 K	Cross-Over-Design	Viola et al. 2008
4	Büroangestellte ohne Schichtdienst	54	40,2	Deckenbeleuchtung 4 000 K im Vergleich zu 8 000 K	5 Wochen	keine saisonale Anpassung der Schlafzeiten (8 000 K)	N = 27 ohne neues Licht	Vetter et al. 2011
5	Gemischte Population	48	30,0	Vergleich (i) 20 Lux, 7,4 mW/cm ² , 468 nm (ii) Kaffee mit Koffein (iii) Kaffee ohne Koffein	3 Nächte	besseres Spurhaltevermögen bei Nachtfahrten mit blauem Licht	Cross-Over-Design	Taillard et al. 2012
6	Krankenschwestern mit Schichtdienst	12	22,5	Vergleich nachts (i) Raumlicht + Morgenlicht, (ii) Bright Light + Morgenlicht, (iii) Bright Light plus „Brille“ am Morgen	3 x 4 Tage	bessere Leistung und längerer Schlaf bei Szenario iii	Cross-Over-Design	Yoon et al. 2002

Fortsetzung Tabelle 1: Übersicht finale 13 Studien aus der Literatursuche (K = Kelvin, mw = Milliwatt, nm = Nanometer, cm = Zentimeter)

#	Population	Anzahl Teilnehmer	Alter Ø	Intervention	Dauer	Ergebnis	Kontrollgruppe	Referenz
7	Krankenschwestern mit Schichtdienst	87	38,8	4 × 20 Minuten 5 000 Lux während der Nachtschicht	2 Wochen	Nachtschicht weniger belastend, kein Unterschied zwischen Sommer und Winter	vorher-nachher Vergleich	Leppämäki et al. 2003
8	Krankenschwestern mit Schichtdienst	19	41,7	6 Std. 3 243 Lux plus Blaulicht reduzierende Brille (15 % Transmission) am Morgen	12 Nächte	Anpassung von Körpertemperatur und Melatonin an den Tag-schlaf	N = 9 ohne neues Licht	Boivin et al. 2002
9	Krankenschwestern mit Schichtdienst	11	37,1	6 Std. 2 000 Lux + Blaulicht reduzierende Brille am Morgen (15 % Transmission) + im Aufenthalt im Dunkeln nach der Nachtschicht	12 Nächte	Anpassung von Cortisol an den Tagschlaf durch die Intervention	N = 5 ohne neues Licht	James et al. 2004
10	Postmitarbeiter mit Schichtdienst	28	39,7	Blaulicht reduzierende Brille am Morgen zur Reduktion von Wellenlängen <540 nm nach der Nachtschicht	4 Wochen	längerer Tagschlaf, bessere Schlaffeffizienz, weniger Schlaf-fragmentierung	vorher-nachher Vergleich	Sasseville et al. 2009
11	Beschäftigte einer LKW-Produktion mit Schichtdienst	18	36,2	nachts während Pausen 2 500 Lux, 5 000 K im Vergleich zu 300 Lux	4 Wochen	weniger Müdigkeit nachts, längerer Schlaf tagsüber	vorher-nachher Vergleich	Lowden et al. 2004
12	Krankenschwestern mit Schichtdienst	61	29,7	10 Minuten helles Licht am Morgen vor der Arbeit (zwischen 8 826 und 5 444 Lux)	2 Monate	weniger Müdigkeit, und Erschöpfung, bessere Leistung	Cross-Over-Design	Tanaka et al. 2011
13	Beschäftigte im Kernkraftwerk mit Schichtdienst	23	48,1	Dynamische Beleuchtung: Vergleich (i) weiß-blau 745 Lux, 6 000 K (ii) gelb 650 Lux, 4 000 K (iii) gelb 700 Lux, 4 000 K	8 Tage	spätere Aufwachzeit, weniger Müdigkeit durch dynamische Beleuchtung	N = 16 ohne neues Licht	Lowden et al. 2012

4 Ergebnisse der Literatursuche

Im Folgenden sind die finalen dreizehn Publikationen der Literatursuche aufgeführt (angegeben als Studie X/13 mit Bezug zu Tabelle 1). Ein direkter Vergleich der Studien untereinander ist aufgrund der Heterogenität der Studienprotokolle, Studienpopulationen, Laufzeiten und Interventionen nicht möglich. Kommentare der Autoren dieser Literaturstudie zu den jeweiligen Studien sind *kursiv* hervorgehoben.

Zugang zu Tageslicht am Arbeitsplatz

Studie 1/13 Eine Studie aus dem Jahr 2011 [118] hat bei 13 296 Angestellten eines französischen Verkehrsunternehmens das Vorkommen von Insomnie und Hypersomnie (mindestens eine der vier Beschwerden (1) Einschlafschwierigkeit, (2) regelmäßiges nächtliches Erwachen, (3) frühes Erwachen, (4) nicht erholsamer Schlaf plus Auswirkungen auf die Tagesverfassung) und Müdigkeit in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Tageslicht am Arbeitsplatz untersucht. Die Lichtexposition vor und nach der Arbeit sowie während der Arbeitspausen wurde nur für eine Teilgruppe gemessen.

Die Autoren identifizierten zwei Gruppen:

- kein Zugang zu Tageslicht während der Arbeit (N = 4 635, 34,9 %; z. B. U-Bahnfahrer und Wachpersonal die unter der Erde arbeiteten)
- regelmäßiger Zugang zu Tageslicht (N = 8 661; z. B. Busfahrer, die über der Erde arbeiteten)

Die Angestellten ohne Tageslicht zeigten im Vergleich zu den Angestellten mit Tageslicht signifikant höhere Prävalenzen von nichterholsamem Schlaf (36,8 % vs. 29,5 %; $p < 0,0001$), Insomnie (28,8 % vs. 24,8 %, $p < 0,0001$), schwerer Insomnie (14,1 % vs. 10,9 %, $p < 0,0001$) und Tagesschläfrigkeit (6,8 % vs. 4,3 %, $p < 0,0001$). Nach multivariater Analyse unter Kontrolle für Alter, Geschlecht und sozioökonomischem Status blieb das Ergebnis von mehr Insomnie (OR = 1,8; 95 % Konfidenzintervall (KI) 1,3 bis 2,3, $p < 0,01$) und Hypersomnie (OR = 1,9; 95 % KI = 1,3 bis 2,4; $p < 0,01$) bei der Gruppe ohne Tageslicht statistisch signifikant. Nichterholsamer Schlaf, Insomnie und Hypersomnie waren besonders ausgeprägt bei Arbeitern im Schichtdienst (64 % der Teilnehmer).

Die gefundenen, vermeintlichen Lichtwirkungen könnten auch anderen Einflussgrößen zugeschrieben werden, wie z. B. einem unterschiedlichen Tätigkeitsbild (z. B. Häufigkeit des Kundenkontakts, Autonomie) zwischen Busfahrern und U-Bahnfahrern.

Studie 2/13 Boubekri und Kollegen [97] haben an 49 Büroangestellten zeigen können, dass diejenigen mit Fenster am Arbeitsplatz sich im Vergleich zu ihren Kollegen ohne Fenster am Arbeitsplatz signifikant vitaler fühlten (36 % Unterschied zur Gruppe ohne Fenster) und weniger eingeschränkt waren in ihrer Arbeitskraft aufgrund von körperlichen Beschwerden (42 % Unterschied zur Gruppe ohne Fenster). Die körperlichen Beschwerden wurden über den Fragebogen ‚Short Form 36‘ (SF-36) erhoben. Der SF-36 ist ein Fragebogen, der 36 Aspekte zur körperlichen und psychosozialen Gesundheit erfasst, mit Bezug zu den persönlichen Erfahrungen, Überzeugungen sowie Wahrnehmungen der Befragten. Zudem berichteten diejenigen mit Fenster am Arbeitsplatz über eine bessere Schlafqualität sowie im Durchschnitt 46 Minuten längeren Schlaf in Nächten der Arbeitswoche ($p = 0,02$) und 93 Minuten längeren Schlaf zwischen arbeitsfreien Tagen ($p = 0,005$).

Unklar bei dieser Studie ist, wie entschieden wurde, wer einen Fensterplatz bekommt und wer nicht. Denn Fensterplätze sind beliebter als Arbeitsplätze im Rauminnern. Wer einen Fensterplatz erhält, könnte von der Stellung im Betrieb oder der Dauer der Betriebszugehörigkeit abhängen. In beiden Fällen kann sich das Verhalten beider Gruppen unabhängig vom Licht unterscheiden. Inwieweit ein höherer oder niedriger Status mit den in dieser Studie erhobenen Merkmalen assoziiert ist, müsste wiederum in Folgestudien untersucht werden.

Einfluss von künstlicher Beleuchtung tagsüber am Arbeitsplatz auf Leistung und Schlaf

Studie 3/13 Viola und Kollegen [119] haben im Jahr 2008 eine Arbeit publiziert, die Ergebnisse einer zweimal vier Wochen dauernden Lichtintervention – durch Austausch der Deckenbeleuchtung – im realen Büroalltag beschreibt. An 94 Teilnehmern konnten die Autoren zeigen, dass die Exposition über jeweils vier Wochen hinweg mit blau angereichertem Weißlicht, im Vergleich zu einer Exposition mit nicht blau angereichertem Weißlicht (Cross-Over-Studiendesign), das Niveau von Wachheit, Gemütszustand, Arbeitsfähigkeit, Erschöpfung am Abend, Nervosität, Konzentrationsfähigkeit und Augenbeschwerden signifikant positiv beeinflusste. Zudem wurden die Werte von Tagesmüdigkeit reduziert und die Schlafqualität wurde unter dem blau angereicherten Weißlicht als signifikant besser bewertet. Unter statistischer Kontrolle für die Erwartungshaltung der Teilnehmer gegenüber dem blau angereicherten Weißlicht blieben die Ergebnisse für die Variablen Wachheit, Arbeitsfähigkeit, Erschöpfung am Abend, Nervosität, Konzentrationsfähigkeit und Augenbeschwerden statistisch signifikant verschieden im Vergleich zu der 4 000-K-

Beleuchtung. Ein Einfluss auf die Tagesmüdigkeit und Schlafqualität war nach Kontrolle für die Erwartungshaltung gegenüber blau angereichertem Weißlicht nicht mehr nachweisbar.

Das blau angereicherte Licht sollte nach Angabe des Herstellers 17 000 K entsprechen (Philips Master TL-D Activiva Active, Philips, Roosendaal, Niederlande); tatsächlich wiesen diese Lampen nur 13 650 K auf, was infolge von Reflexionen im Raum eine noch geringere Farbtemperatur am Auge bedeutet. Das nicht blau angereicherte Licht sollte eine Farbtemperatur von 4 000 K aufweisen (Philips Master TL-D super 80). In der Kondition mit dem blau angereicherten Weißlicht variierten die tatsächlichen Beleuchtungswerte um $310,35 \pm SD 98,90$ Lux. In der Kondition mit 4 000 K variierte die tatsächliche Beleuchtungsstärke um $421,07 \pm SD 128,55$ Lux. Ein weiterer Einflussfaktor könnte sein, dass eine Gruppe die „neue Beleuchtung“ im ersten Teil erhält und ihr diese im zweiten Teil „weggenommen“ wird, während die zweite Gruppe dieses Erlebnis des „Downgradings“ nicht hat.

Studie 4/13 Eine deutsche Studie aus dem Jahr 2011 [120] konnte bei 54 Büroangestellten (24 bis 63 Jahre) zeigen, dass eine Deckenbeleuchtung mit erhöhtem Blauanteil im Januar/Februar (Winter) während der Arbeitszeit zu Anpassungen von Schlaf- und Aktivitätszeiten an die neue Beleuchtung führen kann. Die Studie zeigte, dass die Nachtschlafzeiten der Büroangestellten (27 Teilnehmer) durch den Einsatz einer Beleuchtung mit erhöhtem Blauanteil (statisch 8 000 K mit 760 Lux im Vergleich zu statisch 4 000 K mit 715 Lux ohne erhöhten Blauanteil) sich nicht saisonal anpassten im Vergleich zur Kontrollgruppe (27 Teilnehmer) ohne erhöhten Blauanteil in ihrer Bürobeleuchtung. Die Autoren wiesen darauf hin, dass künstliche Beleuchtung am Arbeitsplatz im Winter in Konkurrenz zum Tageslicht treten und die Synchronisation des zirkadianen Systems beeinflussen kann. Die Arbeit gibt aus diesem Grund die Empfehlung, dynamische Beleuchtung gegenüber statischer Beleuchtung (wie in der hier diskutierten Studie eingesetzt) zu bevorzugen.

Anzumerken ist, dass in dieser Arbeit kein systematischer Vergleich zwischen dynamischer und statischer Beleuchtung durchgeführt wurde, weshalb die Empfehlung der Autoren zunächst Theorie bleibt und der praktischen Überprüfung bedarf. Leistungsparameter wurden nicht erfasst, weshalb eine konkrete Aussage hinsichtlich des Arbeitsschutzes nicht möglich ist. Zudem sei darauf hingewiesen, dass diese Studie im Winter durchgeführt wurde, was keine Aussage über entsprechende Effekte zu anderen Jahreszeiten zulässt.

Die Beleuchtungsstärken wurden vertikal am Auge gemessen. Die 715 Lux vertikal am Auge entsprechen ca. 1 000 Lux horizontal auf der Arbeitsfläche. Dies ist ein

sehr hoher Wert im Vergleich zu Beleuchtungsstärken in üblichen Büroumgebungen.

Einfluss von künstlicher Beleuchtung auf die nächtliche Fahrleistung

Studie 5/13 Eine Studie eines französisch-schwedischen Forscherteams aus dem Jahr 2012 [121] hat unter realen Bedingungen die Fahrleistung von 48 gesunden männlichen Teilnehmern (Alter 20 bis 50 Jahre) während nächtlicher Autofahrten über eine Distanz von 400 km unter dem Einfluss der folgenden drei Szenarien untersucht:

- monochromatisch blaues Licht (goLITE BLU[®], Philips, Niederlande; spektrale Wellenlänge ≈ 468 nm; die leuchtende Fläche hatte eine Größe von 12 cm x 7,2 cm und befand sich in der Mitte des Armaturenbretts 25° unterhalb der Blickrichtung, ca. 75 cm vom Auge entfernt)
- Kaffee (200 mg Koffein) während jeweils zwei Fahrtpausen
- Placebo (entkoffeinierter Kaffee) während jeweils zwei Fahrtpausen

Alle Teilnehmer haben im Abstand von einer Woche an allen drei Szenarien teilgenommen (randomisiertes Cross-Over-Studiendesign). Das goLITE BLU[®] war im Abstand von ca. 75 cm zum Auge auf dem Armaturenbrett installiert (somit nimmt die Quelle einen Sehwinkel von $9^\circ \times 5,5^\circ$ ein). Die Lichtexposition am Auge betrug ca. 20 Lux mit einer Intensität von $7,4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. *Wobei die beiden Werte nicht zusammenpassen: 20 Lux entsprechen hier etwa $35 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Da kein Messgerät angegeben wurde, ist nicht klar, welcher Wert der richtige ist.*

Im Fokus der Studie stand die Erfassung, wie gut die Fahrer die Spur halten konnten, durch Messung der Anzahl von unerlaubten Überkreuzungen der Fahrbahnmarkierungen. Ein Fahrlehrer begleitete die Studienteilnehmer, um in kritischen Situationen eingreifen zu können. Das Spurhaltevermögen wurde objektiv mittels eines Videosystems erfasst. Acht Fahrer (17 %) zeigten signifikant mehr unerlaubte Überkreuzungen der Fahrbahnmarkierungen (Anzahl: $102,38 \pm 13,22$) als die übrigen Fahrer (Anzahl: $14,58 \pm 2,22$). Diese Abweichung im Fahrverhalten war unter dem Einfluss von blauem Licht gegenüber nicht-blauem Licht signifikant erhöht (unerlaubte Überkreuzungen der Fahrbahnmarkierungen während der ersten Fahrt: 67 ± 17 versus $37,5 \pm 16$, $p = 0,04$; während der zweiten Fahrt: 138 ± 10 versus 46 ± 11 , $p = 0,01$, im Vergleich unter dem Einfluss von blauem Licht gegenüber Placebo). Diese acht Teilnehmer berichteten über Blendung durch das goLITE BLU[®]. Die Autoren haben die acht Teilnehmer, die über Blendung klagten, aus der weiteren Analyse der Daten ausgeschlossen, was die finale Anzahl an Datensätzen von

48 auf 40 reduzierte. Die finalen 40 Fahrer zeigten alle weniger unerlaubte Überkreuzungen der Fahrbahnmarkierungen unter dem Einfluss von Koffein (12,51; 95 % KI, 5,86 - 19,66, $p = 0,001$) und unter dem Fahren mit blauem Licht (14,58; 95 % KI, 8,75 - 22,58, $p = 0,003$) als während der Fahrten mit entkoffeiniertem Kaffee (26,42; 95 % Konfidenzintervall (KI), 19,90 - 33,71).

Die Blendung durch das blaue Licht ist sicherlich ein kritischer Aspekt für den Arbeitsschutz. Eine Übertragung dieser Ergebnisse in die Praxis bedarf weiterer Forschung zur Verfeinerung des Studiendesigns.

Einfluss von künstlicher Beleuchtung im Kontext von Schicht- und Nachtarbeit

Studie 6/13 Eine koreanische Studie [52] mit zwölf Krankenschwestern im Nachtschichtdienst untersuchte den Einfluss von drei verschiedenen Lichtinterventionen (Lichtquelle: Apollo Brite Lite III, Vollspektrum ohne UV-Anteile) während der Nacht (vier Stunden zwischen 01:00 und 05:00 Uhr) auf den Tagschlaf nach der Nachtschicht (via Aktigraphie) sowie auf die Wachheit (via Visual Analog Scale) und Leistungsfähigkeit (computerisierte Tests: backward masking test (BMT) und digit symbol substitution test (DSST)) während der Nachtschicht.

Die drei Lichtinterventionen gestalteten sich wie folgt:

- Lichtintervention 1 umfasste das gewöhnliche Raumlicht (100 bis 500 Lux) plus Exposition mit Tageslicht oder 10 000 Lux künstlicher Beleuchtung (Abstand zum Auge zwischen 80 und 100 cm) nach der Nachtschicht zwischen 08:30 und 09:30 Uhr.
- Lichtintervention 2 umfasste eine Exposition mit 4 000 bis 6 000 Lux während der vier Stunden zwischen 01:00 und 05:00 Uhr plus Exposition mit Sonnenlicht oder 10 000 Lux künstlicher Beleuchtung (Abstand zum Auge zwischen 80 und 100 cm) nach der Nachtschicht zwischen 08:30 und 09:30 Uhr.
- Lichtintervention 3 umfasste eine Exposition mit 4 000 bis 6 000 Lux während der vier Stunden zwischen 01:00 und 05:00 Uhr (Abstand der Lichtquelle zum Auge zwischen 80 und 100 cm) plus Tragen einer Blaulicht reduzierenden Brille nach der Nachtschicht (Transmissionswerte zwischen 15,6 und 27,5 %).

Jede der drei Lichtinterventionen dauerte vier Tage. Jede Teilnehmerin hatte alle drei Lichtinterventionen durchlaufen (Cross-Over-Studiendesign). Die Autoren berichten über keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Schlaflatenz (Zeit bis

zum Einschlafen) beim Tagschlaf unter dem Einfluss der drei Lichtinterventionen. Die Schlafdauer war nach Lichtintervention 3 signifikant länger im Vergleich zu Lichtintervention 1 und 2: Schlafdauer Lichtintervention (1) = $275,8 \pm 71,8$ Minuten, Schlafdauer Lichtintervention (2) = $308,3 \pm 65,0$ Minuten und Schlafdauer Lichtintervention 3 = $375,2 \pm 53,5$ Minuten ($p < 0,05$, ANOVA). Die Schlafeffizienz (= die Gesamtschlafzeit in Stunden geteilt durch die Gesamtzeit im Bett in Stunden) war nach Lichtintervention 1 am geringsten und unterschied sich statistisch nicht zwischen Lichtintervention 1 und 2. Die Leistung während der Nachtschicht war durch das hellere Licht (Interventionen 2 und 3) gegenüber der gewöhnlichen Beleuchtung (Intervention 1) signifikant besser. Die Autoren schließen daraus, dass der gezielte Einsatz von Licht in der Nachtschicht in Kombination mit der gezielten Unterdrückung von Licht nach der Nachtschicht den Tagschlaf und die Leistung während der Nachtschicht signifikant verbessern kann.

Hier kann auch vermutet werden, dass sich die zirkadiane Phase verschoben hat.

Studie 7/13 Eine finnisch-niederländische Studie aus dem Jahr 2003 [67] hat 87 Krankenschwestern (22 bis 57 Jahre) einer zweiwöchigen Lichtintervention in der Nachtschicht unterzogen (55 Watt Fluoreszenzleuchte (Philips Ltd, Eindhoven, Niederlande) mit kaltweißem Licht, 5 000 Lux am Auge). Die Krankenschwestern waren angehalten, sich vier Mal für jeweils 20 Minuten dem Licht auszusetzen in den Zeiten von:

- 22:00 und 23:00 Uhr
- 24:00 und 01:00 Uhr
- 02:00 und 03:00 Uhr
- 04:00 und 05:00 Uhr

Jeden Morgen nach der Nachtschicht, sowie vor Beginn der Nächte mit Lichtintervention (Baseline), füllten die Teilnehmerinnen Fragebögen aus. Die Studie wurde zur Erhebung saisonaler Effekte im Sommer (Mai bis Juni) und Winter (November bis Dezember) durchgeführt. Siebenunddreißig Krankenschwestern nahmen im Sommer und Winter teil. Die vier mal 20-minütige Lichtintervention während der Nachtschicht konnte das Empfinden der Belastung durch die Nachtschicht signifikant verringern. Der Effekt war besonders ausgeprägt bei 26 Krankenschwestern, die über saisonale Gemütschwankungen klagten. Zwischen den Ergebnissen zum

Empfinden der Belastung durch die Nachtschicht, die im Sommer und Winter gesammelt wurden, konnte kein signifikanter Unterschied ermittelt werden. Acht Teilnehmerinnen berichteten über Kopfschmerzen und zwei über Augenirritationen.

Weitere Studien sind notwendig, bevor diesbezüglich von gesicherten Erkenntnissen gesprochen werden kann.

Studie 8/13 Boivin und James [58] zeigen, dass eine kontrollierte Lichtexposition während der Nacht in Kombination mit einer Blaulicht reduzierenden Brille (nachfolgend als „Brille“ bezeichnet) nach der Nachtschicht auf dem Heimweg erfolgreich sein kann, um das zirkadiane System an den Tagschlaf teilweise anzupassen. Die Messungen von Körpertemperatur und Melatonin erfolgten im Labor vor und nach der Intervention. Durch die Bestimmung der Melatoninwerte vor der Lichtintervention war es möglich, individuelle Profile für die Lichtintervention zu erstellen. Jeder Teilnehmer wurde aufgefordert, sich in den ersten sechs Stunden der jeweils acht Stunden dauernden Nachtschicht vor eine helle Lichtquelle zu setzen (ca. 2 000 Lux, Sunbox 30'' × 18'', Sunsquare 23'' × 24'', und SunRayII 23'' × 15,5'', Sunbox Company, Gaithersburg, MD, USA). Der Zeitpunkt der Lichtexposition lag somit für jeden Teilnehmer ca. eine Stunde vor dem individuellen Mittelpunkt der Ausschüttung von Melatonin. Die Studienleiter stellten sicher, dass die Teilnehmer nachts genügend lange in die helle Lichtquelle schauten.

Für den Heimweg nach der Nachtschicht wurden die Teilnehmer mit Brillen ausgestattet (Astrospec 3 000 oder Flashback, jeweils mit Spectrum Control Technology® grauen Linsen, 15 % visuelle Lichttransmission, Uvex, Smithfield, RI, USA), um die Lichtwirkung durch das Tageslicht zu reduzieren. Die neun Teilnehmer in der Interventionsgruppe (acht Teilnehmer in der Kontrollgruppe ohne Intervention) waren zudem angehalten, sich nach der Nachtschicht zu Hause im Dunkeln aufzuhalten sowie möglichst bei Dunkelheit zu schlafen. Durch die Intervention (helles Licht in der Nacht plus Brille auf dem Weg nach Hause plus Aufenthalt im Dunkeln zu Hause) haben sich die Rhythmen der Körpertemperatur (Interventionsgruppe: $-9,32 \pm 1,06$ Stunden gegenüber der Kontrollgruppe: $-4,09 \pm 1,94$ Stunden) und des Melatonins (Interventionsgruppe: $-11,31 \pm 1,13$ Stunden gegenüber der Kontrollgruppe: $-5,08 \pm 2,32$ Stunden) signifikant mehr in Richtung Tagschlafperiode verschoben als im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne Intervention.

Dies deutet auf eine Anpassung des zirkadianen Systems an den Tagschlaf nach der Nachtschicht hin und bestätigt somit die Ergebnisse früherer Studien, z. B. [122].

Studie 9/13 In einer Folgestudie [123] haben James und Kollegen an elf Teilnehmern die Anpassung des Hormons Cortisol bei der kombinierten Intervention von hellem Licht während der ersten Stunden der Nachtschicht plus Tragen einer Blaulicht reduzierenden Brille mit entweder einem Transmissionsgrad (τ) von 15 % (=Interventionsgruppe) oder 90 % (=Kontrollgruppe) nach der Nachtschicht, plus dem zügigen Sich-in-Dunkelheit-begeben bis zum Schlafanfang nach der Nachtschicht untersucht.

Interventionsgruppe (N=6):

- 0 Uhr bis 6 Uhr: $2\,590 \pm 1\,370$ Lux
- 6 Uhr bis 8 Uhr: 104 ± 58 Lux
- Tragen einer speziellen Brille nach der Nachtschicht $\tau = 15\%$

Kontrollgruppe (N=5):

- 0 Uhr bis 6 Uhr: 131 ± 122 Lux
- 6 Uhr bis 8 Uhr: 104 ± 58 Lux
- Tragen einer speziellen Brille nach der Nachtschicht $\tau = 90\%$

Die Autoren ermittelten eine Verschiebung des Rhythmus von Cortisol (Interventionsgruppe: $-11:04 \pm 1:16$ Stunden gegenüber der Kontrollgruppe: $-3:03 \pm 2:07$ Stunden), was als eine Anpassung an die Nachtschicht/den Tagschlaf nach der Nachtschicht interpretiert wurde. Dieser Effekt ist auf den Einfluss des manipulierten Licht-Dunkel Zyklus (relativ heller während der Nacht, relativ dunkler nach der Nachtschicht) zurückzuführen. Die Anpassung der Rhythmen von Melatonin [58] und Cortisol [123] war ohne diese kombinierte Intervention in den Kontrollgruppen um 50 % bis 60 % geringer.

Ein Kritikpunkt an diesem Studiendesign ist die geringe Trennschärfe, um abschließend zu bewerten, welchen Anteil allein die Lichtintervention an den gemessenen Effekten hat, da es sich hier um eine kombinierte Intervention handelte. Inwieweit eine kontrollierte Lichtexposition in der Nacht, das Tragen einer Blaulicht reduzierenden Brille auf dem Heimweg und ein kontrollierter Aufenthalt im Dunkeln zu Hause nach der Nachtschicht in der Praxis umgesetzt werden können, ist unklar. Auch wenn die letzten beiden Punkte möglicherweise von einigen Schichtarbeitern bereits routiniert praktiziert werden, ist eine personalisierte Lichtexposition in der Nacht noch keine Routine. Ein weiterer problematischer Punkt ist die große Streuung der Beleuchtungsstärken.

Studie 10/13 Der Effekt des alleinigen Tragens einer Blaulicht reduzierenden Brille („Brille“) nach der Nachtschicht, um Licht der Wellenlänge <540 nm zu unterdrücken, wurde in einer kanadischen Studie an 28 Teilnehmern getestet [124]. Acht Schichtarbeiter (32–56 Jahre) der Quebec City’s Canada Post in Dauernachtschicht nahmen während des Sommers teil und 20 weitere (24–55 Jahre) nahmen im Herbst und Winter teil. Über vier Wochen hinweg wurde der Tagschlaf (Zeitpunkt, Fragmentierung, Wirksamkeit/Erholsamkeit) via Aktigraphie (objektive Messung von Ruhe-Aktivitätsrhythmen) untersucht. In der Herbst/Winter-Gruppe wurde zudem nach der Nachtschicht eine Erhebung der subjektiven Vigilanz durchgeführt. Die ersten zwei Wochen waren Baseline (keine Intervention) und während der letzten zwei Wochen trugen die Teilnehmer die Brillen nach dem Ende ihrer Nachtschicht auf dem Heimweg. Sollten sich die Teilnehmer tagsüber draußen aufgehalten haben, so wurden sie angewiesen, die Brillen bis 16 Uhr zu tragen. Der Tagschlaf nach dem Tragen der Brille war gegenüber dem Tagschlaf ohne vorheriges Tragen der Brille im Sommer um $32 \pm \text{SD } 29$ Minuten länger und im Herbst/Winter um $34 \pm \text{SD } 60$ Minuten länger.

Ebenso verbesserten sich die Werte der Schlaffeffizienz (Schlafzeit gegenüber der gesamten im Bett verbrachten Zeit) (Sommer ($1,95 \pm 2,17$) %; Herbst/Winter ($4,56 \pm 6,1$) %) und Schlaffragmentierung (Sommer ($1,74 \pm 1,36$) %; Herbst/Winter ($4,22 \pm 9,16$) %).

Studie 11/13 Der Einfluss einer Lichtintervention während der Arbeitspause in der Nachtschicht wurde an 18 Beschäftigten ($36,2 \pm 3,0$ Jahre) einer schwedischen LKW-Produktionsfirma in einer Cross-Over-Studie untersucht [66]. Im Fokus stand die Erhebung von Müdigkeit, Schlafzeiten (via Aktigraphie) und Melatonin (gemessen im Abstand von zwei Stunden an einem Tag vor, während und nach der Nachtschichtperiode) zur Ermittlung, inwieweit die Lichtintervention in den Arbeitspausen die Anpassung an eine folgende Tagschicht ermöglicht. Die Teilnehmer wurden entweder 2 500 Lux am Auge (5 000 K, Vollspektrum TL-D90 58W/950, Philips, Eindhoven, Niederlande, indirekt aus dem gesamten weißen Raum erzeugt) oder der gewöhnlichen Raumbeleuchtung (300 Lux) in den Pausen von 20 Minuten zwischen 03:00 und 04:00 Uhr ausgesetzt.

Das Müdigkeitsniveau war zwischen 04:00 und 06:00 Uhr durch das helle Licht signifikant reduziert. Ebenso war der Tagschlaf (Hauptschlaf plus Nickerchen) mit $6,53 \pm 0,10$ Stunden im Durchschnitt signifikant länger als der Schlaf der Kontrollgruppe, wenn die Arbeiter nachts während ihrer Pause dem hellen Licht ausgesetzt waren. Die Schlaflänge war besonders in der vierten und der letzten Nacht verlän-

gert. Nach der vierwöchigen Nachtschichtperiode konnten die Autoren keinen Unterschied in der 24-h-Gesamtschlafzeit (Hauptschlaf plus Nickerchen) feststellen. Die nächtliche Intervention mit hellem Licht unterdrückte das Melatonin der Teilnehmer über die Studientage hinweg signifikant, besonders um 02:00 Uhr.

Studie 12/13 Tanaka et al. [125] untersuchten den Einfluss einer 10-minütigen Lichtintervention (Travelite, Northern Light Technologies, Montreal, Canada) am Morgen zwischen 07:30 und 08:00 Uhr vor der Tagschicht über einen Monat bei 61 Schichtarbeiterinnen. Die Autoren berichten von reduzierter Müdigkeit bei den Teilnehmerinnen um 10:00 Uhr morgens ($-0,55 \pm -0,91$ bis $-0,20$, Karolinska Sleepiness Scale, KSS), besserer Selbsteinschätzung des Nachtschlafes nach Tagschichten ($0,37 \pm 0,04$ bis $0,70$, Visual Analog Scale, VAS) sowie weniger subjektiver Erschöpfung ($-2,13 \pm -3,78$ bis $-0,48$, Checklist Individual Strength Questionnaire). Die durchschnittliche Reaktionszeit in einem computerisierten Aufmerksamkeitstest (Psychomotor Vigilance Task, PVT) war durch das hellere Licht am Morgen signifikant um durchschnittlich 28,2 Millisekunden verbessert. Die Ergebnisse des objektiven PVT-Tests sind relevant für den Arbeitsschutz, weil sie Rückschlüsse auf das Niveau der Müdigkeit erlauben. Eine Verbesserung der Reaktionszeiten beim PVT-Test lassen auf erhöhte Aufmerksamkeit und reduzierte Müdigkeit schließen. Keinen Einfluss hatte das hellere Licht am Morgen hingegen auf Müdigkeit um 14:00 Uhr sowie die Fehlerrate beim PVT-Test. Je nach Distanz der Lichtquelle zum Auge (zwischen 30 und 40 cm) variierte die Lichtexposition zwischen $8\,826 \pm 104$ Lux (bei 30 cm Abstand) und $5\,444 \pm 44$ Lux (bei 40 cm Abstand).

Das heißt, die Lichtexpositionen streuten für eine Person zwischen 5 400 Lux und 8 930 Lux, wobei ein leichtes Schließen der Augen die Intensität auf der Netzhaut zusätzlich reduziert.

Studie 13/13 Der Einfluss einer dynamischen Beleuchtung in der Nachtschicht wurde 2012 von den schwedischen Wissenschaftlern Lowden und Åkerstedt an 23 Arbeitern eines Nuklearkraftwerkes untersucht [65]. Im Fokus stand die Erfassung von subjektiver Wachheit mittels Fragebogen (Karolinska Sleepiness Scale alle zwei Stunden), Schlaf (objektiv via Aktigraphie und subjektiv via Schlaftagebuch) und Melatonin (alle zwei Stunden während einer Nachtschicht und die ersten drei Stunden während einer Frühschicht) zur Bestimmung der Adaptation an die Schichtarbeit. Die dynamische Beleuchtung wurde in einem Kontrollraum ohne Fenster des Nuklearkraftwerkes installiert. Die herkömmliche Beleuchtung war ≈ 200 Lux (vertikal am Auge gemessen) eines warmweißen Lichts mit 3 000 K (Philips Master TLD 36W 830).

Die folgenden drei Lichtszenarien wurden verwendet, um eine dynamische Beleuchtung zu simulieren (Details des Beleuchtungsprotokolls in Abbildung 3):

- weißes/blauges helles Licht mit 745 Lux und 6 000 Kelvin (K)
- moderat gelbes Licht mit 700 Lux und 4 000 K
- schwach gelbes Licht mit 650 Lux und 4 000 K

Die dynamische Beleuchtung wurde über drei Nachtschichten, zwei freie Tage, zwei Frühschichten und eine Spätschicht hinweg (NNN + FFS) getestet. Es handelte sich um eine Studie mit Cross-Over-Design, mit sieben Wochen Pause zwischen den beiden Konditionen mit beziehungsweise ohne dynamische Beleuchtung. Um den Einfluss des Tageslichts zu minimieren, wurde die Studie im Winter durchgeführt. Die Wachheit war während der zweiten Nachtschicht signifikant erhöht (Interaktion zwischen Studiengruppe × Licht × Zeit, $p < 0,01$). Die Aufwachzeit nach der dritten Nachtschicht war signifikant später durch die dynamische Beleuchtung, mit zudem mehr Aufwachmomenten nach dem Einschlafen und einer Tendenz zu geringerer Schlafeffizienz. Aufgrund der kleinen Stichprobe sind die Effekte der dynamischen Beleuchtung auf das Melatonin nicht eindeutig interpretierbar. Dennoch befürworten die Autoren ihre Intervention als Möglichkeit, die Anpassung an ein schnell rotierendes Schichtsystem (im Winter) zu erleichtern.

Weitere Studien in größeren Stichproben und mit längeren Studienzeiträumen – in unterschiedlichen Jahreszeiten – sind notwendig, um die Ergebnisse dieser Studie zu verifizieren.

Anzumerken ist zu diesem Studiendesign, dass das „Gelblicht“ aufgrund der angegebenen Werte nicht einmal „moderat“ und einmal „schwach“ gewesen sein kann. Der einzige Unterschied sind die Beleuchtungsstärken, die aber angesichts üblicher großer Streuungen kaum signifikant unterschiedlich sind (zwischen 650 Lux und 700 Lux ist sogar im direkten visuellen Vergleich kaum ein Helligkeitsunterschied wahrnehmbar). Es kann daher nicht erwartet werden, dass das zweite und dritte Szenarium unterschiedliche Wirkungen erzeugt. Als verwendeter Lampentyp wurde für beide Lichtquellen mit gelbem Licht die "Philips TL5 827" angegeben. Dies würde einem Licht mit 2 700 K Farbtemperatur entsprechen und nicht den in der Studie angegebenen 4 000 K. Die Angaben sind daher widersprüchlich, und es ist nicht klar, welche Angabe ("4 000 K" oder "Philips TL5 827") falsch ist.

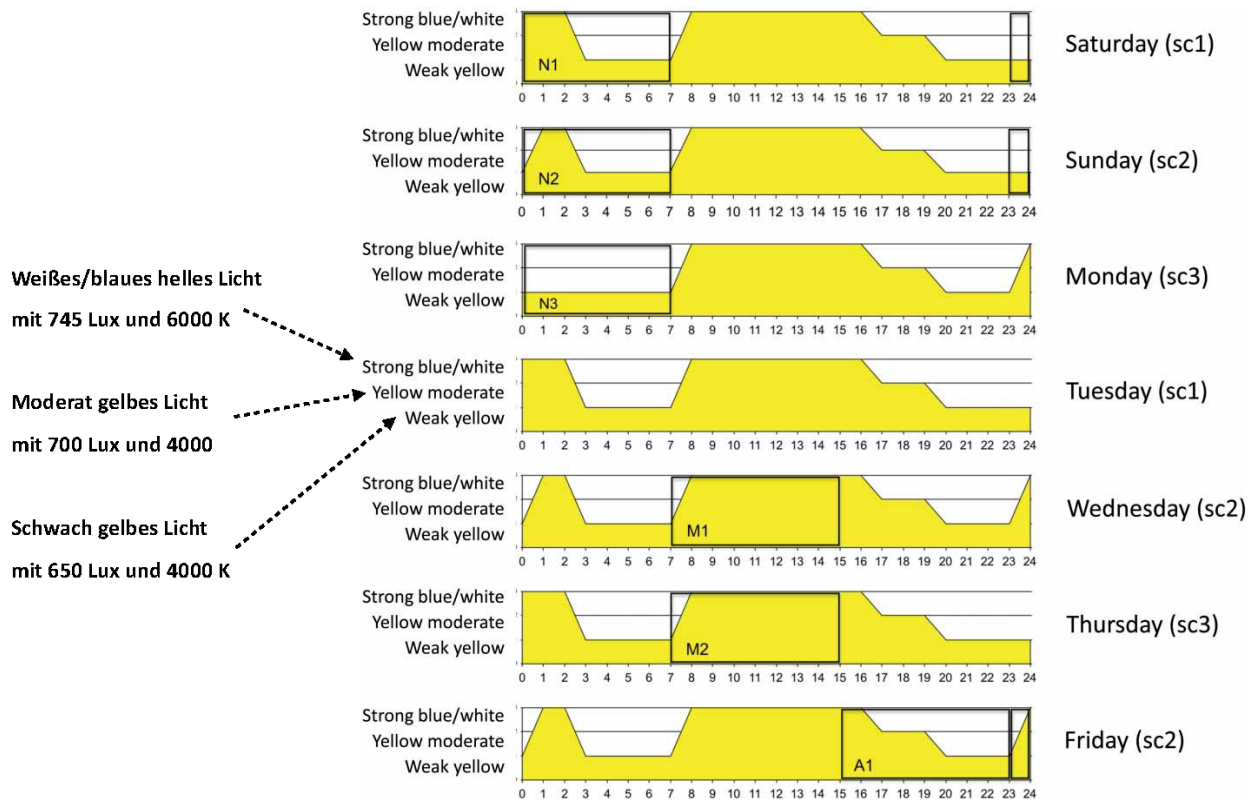


Abbildung 3: Beispiel für dynamische Beleuchtung bei Schichtarbeit [65]

5 Wichtige Bezüge zum Arbeitsschutz

In diesem Kapitel gehen die Autoren dieser Literaturstudie auf die Grundsätze des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) in Hinblick auf nichtvisuelle Wirkungen von Licht ein. Für die Arbeitsstättenverordnung und die Technischen Regeln für Arbeitsstätten erläutern sie, inwiefern aus ihrer Sicht die darin enthaltenen Anforderungen auch auf die nichtvisuelle Wirkung von Licht übertragen werden können.

Das ArbSchG *„dient dazu, Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit durch Maßnahmen des Arbeitsschutzes zu sichern und zu verbessern“* (ArbSchG §1, Absatz 1, Satz 1). Die *„Maßnahmen des Arbeitsschutzes im Sinne dieses Gesetzes sind Maßnahmen zur Verhütung von Unfällen bei der Arbeit und arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren einschließlich Maßnahmen der menschengerechten Gestaltung der Arbeit“* (ArbSchG §2, Absatz 1).

Zur Erfüllung der Maßnahmen nach §2 Absatz 1 des ArbSchG gelten nach §4 des ArbSchG die folgenden acht allgemeinen Grundsätze für den Arbeitgeber:

1. „Die Arbeit ist so zu gestalten, daß eine Gefährdung für das Leben sowie die physische und die psychische Gesundheit möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung möglichst gering gehalten wird;
2. Gefahren sind an ihrer Quelle zu bekämpfen;
3. Bei den Maßnahmen sind der Stand von Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen;
4. Maßnahmen sind mit dem Ziel zu planen, Technik, Arbeitsorganisation, sonstige Arbeitsbedingungen, soziale Beziehungen und Einfluß der Umwelt auf den Arbeitsplatz sachgerecht zu verknüpfen;
5. Individuelle Schutzmaßnahmen sind nachrangig zu anderen Maßnahmen;
6. Spezielle Gefahren für besonders schutzbedürftige Beschäftigtengruppen sind zu berücksichtigen;
7. Den Beschäftigten sind geeignete Anweisungen zu erteilen;
8. Mittelbar oder unmittelbar geschlechtsspezifisch wirkende Regelungen sind nur zulässig, wenn dies aus biologischen Gründen zwingend geboten ist.“

Im Folgenden werden die arbeitsschutzrelevanten Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen im Kontext der Punkte 1 bis 8 (§4 ArbSchG) kurz diskutiert.

Zu 1) „Die Arbeit ist so zu gestalten, daß eine Gefährdung für das Leben sowie die physische und die psychische Gesundheit möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung möglichst gering gehalten wird.“

- a) Gefährdungen für das Leben sind durch die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen nicht belegt.
- b) Gefährdungen für die physische und die psychische Gesundheit werden im Zusammenhang mit der nichtvisuellen Wirkung von Licht diskutiert.
- c) Die nichtvisuelle Wirkung von Licht bietet die Möglichkeit, die Gefährdungen für die physische und die psychische Gesundheit am Arbeitsplatz zu beeinflussen. Allerdings sind Angaben zu Lichtintensität, -qualität, -spektrum und zeitlicher Verteilung sowie Dauer einer Lichtexposition aktuell noch nicht gesichert.

Zu 2) „Gefahren sind an ihrer Quelle zu bekämpfen.“

Die Gestaltung der Arbeitsplatzbeleuchtung hinsichtlich der nichtvisuellen Wirkung von Licht ist Gegenstand aktueller Forschung. Als gesichert gilt, dass die Arbeitsplatzbeleuchtung potentiell und in Anteilen für Gefährdungen der physischen und psychischen Gesundheit verantwortlich sein kann. Ein Verständnis der Zusammenhänge setzt jedoch voraus, dass die gesamtägliche Lichtexposition betrachtet wird, denn Licht wirkt nicht zu jeder Tages- und Nachtzeit identisch. Deshalb spielt auch Licht vor und nach der Arbeit eine Rolle. Bis dato wurde in keiner Feldstudie untersucht, inwieweit sich die Wirkungen von Licht während der Arbeit und außerhalb der Arbeitszeit gegenseitig beeinflussen. Dies bedeutet, dass es keine gesicherten Erkenntnisse darüber gibt, wie groß allein der Anteil der Arbeitsplatzbeleuchtung für die physische und psychische Gesundheit sowie den Arbeitsschutz ist. Letzteres gilt vor allem für die Bereiche Schicht- und Nachtarbeit.

Zu 3) „Bei den Maßnahmen sind der Stand von Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen.“

Bezüglich der vorliegenden Arbeit sind hierzu keine Anmerkungen hinzuzufügen.

Zu 4) „Maßnahmen sind mit dem Ziel zu planen, Technik, Arbeitsorganisation, sonstige Arbeitsbedingungen, soziale Beziehungen und Einfluß der Umwelt auf den Arbeitsplatz sachgerecht zu verknüpfen.“

Bezüglich der vorliegenden Arbeit sind hierzu keine Anmerkungen hinzuzufügen.

Zu 5) „Individuelle Schutzmaßnahmen sind nachrangig zu anderen Maßnahmen.“

Die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf die Gesundheit des Menschen hängt von vielen individuellen Faktoren ab, deren Interaktion noch nicht ausreichend verstanden ist. Werden an einem Arbeitsplatz Personen einer in Bezug auf Lichtwirkungen sehr heterogenen Gruppe tätig, muss die entsprechende Gefährdungsbeurteilung den Schutz aller gewährleisten.

**Zu 6) „Spezielle Gefahren für besonders schutzbedürftige Beschäftigten-
gruppen sind zu berücksichtigen.“**

Da es keine Studien über die nichtvisuelle Wirkung von Licht an besonders schutzbedürftigen Personen gibt, können zu diesem Punkt keine Ergänzungen gemacht werden.

Zu 7) „Den Beschäftigten sind geeignete Anweisungen zu erteilen.“

Maßnahmen der Wissensvermittlung und Aufklärung von Beschäftigten über die Wirkung von Licht auf den Menschen liegt in der Verantwortung des Arbeitsgebers. Eine aktive Unterstützung bei der Umsetzung von Empfehlungen durch Beschäftigte wird geraten. Lichtsteuerungssysteme sollten so gebrauchstauglich gestaltet sein, dass eine vorhersehbare Fehlanwendung und dadurch für die Gesundheit und Leistungsfähigkeit nachteilige Beleuchtungsszenarien vermieden werden.

Zu 8) „Mittelbar oder unmittelbar geschlechtsspezifisch wirkende Regelungen sind nur zulässig, wenn dies aus biologischen Gründen zwingend geboten ist.“

Bezüglich der vorliegenden Arbeit sind hierzu keine Anmerkungen hinzuzufügen.

Allgemeine Anmerkung

Während die Gestaltung der Arbeitsplatzbeleuchtung hinsichtlich der visuellen Anforderungen in der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) sowie hinsichtlich gesundheitlicher Risiken durch ultraviolette, sichtbare und infrarote optische Strahlung, in der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) definiert

ist, bestehen keine expliziten Regelungen zur nichtvisuellen Wirkung von Licht in den Regelwerken des Arbeitsschutzes. Es bestehen aber Bezüge an verschiedenen Stellen unter den allgemeinen Schutzziele, wie z. B. *„Die Beleuchtungsanlagen sind so auszuwählen und anzuordnen, dass dadurch die Sicherheit und die Gesundheit der Beschäftigten nicht gefährdet werden“*. Diese könnten in Zukunft durch die Ergebnisse aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse ergänzt werden.

Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, 12.08.2004, zuletzt geändert 30.11.2016) hat zum Ziel, Beschäftigte in Arbeitsstätten zu schützen und zur Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten beizutragen. Außerdem dient sie der menschengerechten Gestaltung der Arbeit, indem sie Anforderungen an gesundheitlich zuträgliche Luft-, Klima- und Beleuchtungsverhältnisse, an einwandfreie soziale Einrichtungen, insbesondere Sanitär- und Erholungsräume, und den Nichtraucherschutz enthält. Die besonderen Belange von Menschen mit Behinderung wie die Barrierefreiheit sind zu berücksichtigen (§ 3a Abs. 2 ArbStättV). Im Anhang der ArbStättV sind Anforderungen und Maßnahmen für Arbeitsstätten nach § 3 Absatz 1 geregelt (Fundstelle des Originaltextes: BGBl. I 2004, 2182-2188). Unter Anhang 3 wird dem Arbeitgeber unter **3.4 Beleuchtung und Sichtverbindung** vorgeschrieben, dass er nur solche Räume als Arbeitsräume betreiben darf, die möglichst ausreichend Tageslicht erhalten und die eine Sichtverbindung nach außen haben (Ausnahmen von dieser Anforderung sind in der ArbStättV angegeben).

Die Technische Regel für Arbeitsstätten „Beleuchtung“ (ASR A3.4) konkretisiert im Rahmen des Anwendungsbereichs die Anforderungen der Verordnung über Arbeitsstätten. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnung erfüllt sind.

Die aktuell gültige Technische Regel beruht auf der BGR 131, Teil 2 „Leitfaden zur Planung und zum Betrieb der Beleuchtung“ des Fachausschusses „Einwirkungen und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren“ der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV). Der Ausschuss für Arbeitsstätten hat die grundlegenden Inhalte der BGR 131, Teil 2 in Anwendung des Kooperationsmodells (BArbBl. 6/2003 S. 48) als ASR in sein Regelwerk übernommen. Technische Regeln sind Empfehlungen und technische Vorschläge, vornehmlich auf dem Gebiet des Arbeits- und Gesundheitsschutzes, die einen Weg zur Einhaltung eines Gesetzes, einer Verordnung, eines technischen Ablaufes usw. empfehlen. Sie sind keine Rechtsnormen und haben damit auch nicht zwangsläufig den Charakter von gesetzlichen Vorschriften.

Anforderungen in Bezug auf die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen für die Sicherheit, Gesundheit und das Wohlbefinden von Beschäftigten sind in der aktuellen Arbeitsstättenverordnung (zuletzt geändert 30. November 2016) zwar

nicht explizit genannt, aber an mehreren Stellen indirekt gefordert: Wie im Bezug zur Gefährdungsbeurteilung, zu Sichtverbindung und Tageslicht und zu Bildschirmarbeitsplätzen.

Im § 3 Absatz 1 heißt es: *„Bei der Gefährdungsbeurteilung hat er (der Arbeitgeber) die physischen und psychischen Belastungen sowie bei Bildschirmarbeitsplätzen insbesondere die Belastungen der Augen oder die Gefährdung des Sehvermögens der Beschäftigten zu berücksichtigen.“* Die Anforderung, die nichtvisuelle Wirkung an Arbeitsplätzen zu berücksichtigen, ist hinsichtlich der Gefährdungsbeurteilung sowie zum Betrieb der Arbeitsstätten somit bereits indirekt vorhanden. Das momentane Gestaltungswissen bezieht sich hauptsächlich auf die Anordnung und Größe der verglasten Flächen sowie den Sonnen- und Blendschutz. In der Technischen Regel zur Gefährdungsbeurteilung (ASR V3) wird die Beleuchtung an mehreren Stellen explizit erwähnt. So wird hier auch ein geringer Tageslichtanteil als mögliche Gefährdung aufgezählt.

Die Bedeutung von Tageslicht und der Sichtverbindung nach außen spiegelt sich im Anhang *Anforderungen und Maßnahmen für Arbeitsstätten nach § 3 Absatz 1* (Gefährdungsbeurteilung) sowie im Normenwerk zum Tageslicht wider. Im Anhang zu *Anforderungen und Maßnahmen für Arbeitsstätten nach § 3 Absatz 1* wird unter 3.4 „Beleuchtung und Sichtverbindung“ folgendes ausgeführt:

„(1) Der Arbeitgeber darf als Arbeitsräume nur solche Räume betreiben, die möglichst ausreichend Tageslicht erhalten und die eine Sichtverbindung nach außen haben.“

(4) In Arbeitsräumen muss die Stärke des Tageslichteinfalls am Arbeitsplatz je nach Art der Tätigkeit reguliert werden können.

(5) Arbeitsstätten müssen mit Einrichtungen ausgestattet sein, die eine angemessene künstliche Beleuchtung ermöglichen, so dass die Sicherheit und der Schutz der Gesundheit der Beschäftigten gewährleistet ist.

(6) Die Beleuchtungsanlagen sind so auszuwählen und anzuordnen, dass dadurch die Sicherheit und die Gesundheit der Beschäftigten nicht gefährdet werden.“

Im Anhang 6.1 Allgemeine Anforderungen an Bildschirmarbeitsplätze heißt es: *„Bildschirmarbeitsplätze sind so einzurichten und zu betreiben, dass die Sicherheit und der Schutz der Gesundheit der Beschäftigten gewährleistet sind.“* Selbstleuchtende Geräte wie Smartphones, Tablets, eReader, Computerbildschirme und Bildschirme (Displays) an Maschinen nehmen einen wesentlichen Beitrag an der Lichtexposition von Beschäftigten ein und sollten vor dem Hintergrund der in die ArbStättV integrierten Bildschirmarbeitsverordnung berücksichtigt werden.

Die ASR A3.4 „Beleuchtung“, Ausgabe April 2011 (zuletzt geändert GMBI 2014, S. 287) enthält keine spezifischen Ausführungen zu künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung. Wie aber in der Zielstellung der ASR ausgeführt, dient diese ASR zur Beleuchtung *„der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz der Beschäftigten am Arbeitsplatz und beschreibt für ausgewählte Tätigkeiten die erforderliche Beleuchtung zur gesundheitsgerechten Erledigung der Sehaufgaben“*. In Kapitel 4 der ASR A3.4 „Beleuchtung mit Tageslicht“ wird ausgeführt, dass *„Arbeitsstätten möglichst ausreichend Tageslicht erhalten“* müssen. Hierbei ist die Beleuchtung mit Tageslicht einer ausschließlich künstlichen Beleuchtung vorzuziehen. In Kapitel 5 der ASR A3.4 „Künstliche Beleuchtung in Gebäuden“ wird ausgeführt: *„Die Arbeitsstätten müssen mit Einrichtungen für eine der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz der Beschäftigten angemessenen künstlichen Beleuchtung ausgestattet sein. Eine Verringerung des individuellen Sehvermögens, z. B. mit zunehmendem Alter, kann eine höhere Anforderung an die Beleuchtungsqualität (z. B. eine höhere Beleuchtungsstärke und höhere Anforderungen an die Begrenzung der Blendung) erfordern“*. Hinsichtlich der Beleuchtungsstärke wird angeführt, dass *„beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten die Mindestwerte der Beleuchtungsstärken des Anhanges 1 (ASR A3.4) eingehalten werden müssen“* und dass eine Gefährdungsbeurteilung der Arbeitsstätten hinsichtlich der Mindestwerte der Beleuchtungsstärke durchzuführen ist. So ist im Anhang 1 *„Beleuchtungsanforderungen für Arbeitsräume, Arbeitsplätze und Tätigkeiten“* z. B. der Mindestwert der Beleuchtungsstärke für einen Büroarbeitsplatz mit der Tätigkeit *„Schreiben, Lesen, Datenverarbeitung“* mit 500 Lux angegeben. Dabei darf dann an keiner Stelle im Bereich des Büroarbeitsplatzes ein Einzelwert der Beleuchtungsstärke von 300 Lux unterschritten werden (s. Kap. 5, Abs. 6).

Ein möglicher Bezug zu der nichtvisuellen Wirkung von Licht ist ebenfalls in der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) zu finden. So wird in der OStrV Folgendes gefordert: *„Bei der Beurteilung der Arbeitsbedingungen nach §5 des Arbeitsschutzgesetzes hat der Arbeitgeber zunächst festzustellen, ob künstliche optische Strahlung am Arbeitsplatz von Beschäftigten auftritt oder auftreten kann. Ist dies der Fall, hat er alle hiervon ausgehenden Gefährdungen für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten zu beurteilen.“*

6 Empfehlungen für die Forschung und Forschungsfragen

Die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren von Licht (Intensität, Spektrum, Dauer, Zeitpunkt, Lichthistorie; Kapitel 1.2.) auf das zirkadiane System, den Schlaf sowie Wachheit und Leistungsfähigkeit bieten der Forschung und der praktischen Umsetzung eine Vielzahl an Möglichkeiten. Eine Herausforderung ergibt sich allerdings aus dem Zirkelschluss zwischen Lichtexposition, Schlaf und Leistungsfähigkeit. Wenn zum Beispiel ein Individuum aufgrund einer ausreichenden Lichtexposition am Tag erholsamer schläft und am Folgetag bessere Leistungsfähigkeit zeigt, bleibt zunächst unklar, ob die bessere Leistungsfähigkeit auf den erholsameren Schlaf zurückgeht und/oder ob die Lichtexposition sowohl vor als auch während der Arbeitszeit eine Rolle spielt. Diese Effekte sind oft schwer auseinanderzuhalten, sollten jedoch bedacht werden bei der Abschätzung von Effektgrößen einer Lichtintervention. Grundsätzlich gilt es, neben einer Verbesserung der Lichtverhältnisse so oder so für erholsamen Schlaf zu sorgen.

Darüber hinaus sind konkrete Angaben hinsichtlich der Faktoren Lichtintensität, -qualität, -spektrum sowie der zeitlichen Verteilung und Dauer einer Lichtintervention bisher nicht gesichert. Grundsätzlich besteht hinsichtlich der optimalen Lichtexposition für gesunde, tagaktive Menschen Klärungsbedarf. Ebenso sollten die Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz auch auf die jeweiligen Bedürfnisse von Arbeitnehmern z. B. mit Linsentrübung, unterschiedlichem Blendungsempfinden oder altersbedingten Veränderungen hin untersucht werden. Notwendig sind Studien, in denen diese Lichtcharakteristika systematisch getestet werden. Dazu wiederum unumgänglich ist auch eine akkurate Bestimmung der individuellen zirkadianen Phase der Lichtexponierten. Ein etablierter Marker zur Bestimmung der zirkadianen Phase ist der ‚dim light melatonin onset‘ (DLMO, der Zeitpunkt an dem Melatonin bei gedimmtem Licht natürlicherweise ansteigt) [126]. Der DLMO korreliert signifikant mit dem Chronotypen, der aus subjektiven Schlafzeiten berechnet wird [127,128]. Theoretisch kann jeder physiologische Parameter (z. B. Cortisol, Blutdruck, Herzrate, Körpertemperatur) als Referenzpunkt herangezogen werden, allerdings hat sich Melatonin als robust gegenüber den meisten Störfaktoren erwiesen [126]. Die Melatoninproduktion wird allerdings durch Licht unterdrückt, weshalb es unumgänglich ist, entsprechende Proben (aus Speichel, Blutserum oder Urin) bei möglichst unter 10 Lux Umgebungshelligkeit zu sammeln. Protokolle für eine solide Datenerfassung unter unterschiedlichen natürlichen Bedingungen müssen für den Bereich des Arbeitsschutzes noch entwickelt werden. Zudem ist eine saubere lichttechnische Durchführung und Dokumentation der Studien für die Vergleichbarkeit wichtig. Hierzu sollten die Anmerkungen des lichttechnischen Gutachtens im Anhang 2 berücksichtigt werden.

Das Einbeziehen chronobiologischer, lichttechnischer und arbeitsmedizinischer Expertisen ist für eine nachhaltige und sichere Planung und Durchführung derartiger Vorhaben empfohlen.

Die folgenden Fragen zur nichtvisuellen Lichtwirkung im Kontext des Arbeitsschutzes sind noch unbeantwortet:

Grundlagenforschung:

1. Welche Lichtcharakteristika (Intensität, Spektrum, Expositionsdauer) spielen eine Rolle hinsichtlich Schlaf, Müdigkeit und Aufmerksamkeit im Kontext des Arbeitsschutzes? Bestehen hierzu Dosis-Wirkungs-Beziehungen?
 - Die Wirkung von Licht ist nicht für alle Parameter und Funktionen identisch [71]. Polychromatisches Licht, welches sich innerhalb von 30 Minuten vor dem Aufwachen (Dawn Simulation) von 0 auf 250 Lux erhöht, mit Lichtwerten von ca. 250 Lux für 20 Minuten nach dem Aufwachen, verbesserte in einer Laborstudie gegenüber dem Aufwachen in Dämmerlicht die Leistung in einer motorischen Tracking-Übung signifikant über den gesamten Tag hinweg (Testzeitpunkte alle zwei Stunden) [129]. Kein Einfluss zeigte sich auf die Reaktionszeit in einem computerisierten Aufmerksamkeitstest (Psychomotor Vigilance Task, PVT) sowie die Selbsteinschätzung von Müdigkeit, mentalem Anspruch, Konzentration und Motivation. Schlechtere Ergebnisse erzielten die Teilnehmer, die mit dem ‚Dawn Simulator‘ geweckt wurden, in einem ‚digit symbol substitution test‘.
2. Welche Ansprüche müssen Beleuchtungssysteme erfüllen, um den Erkenntnissen über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen gerecht zu werden?
 - Noch nicht gesichert – aber als potentiell relevant hinsichtlich der Gestaltung der Arbeitsplatzbeleuchtung – könnte sich der Einfluss der Lichteinfallrichtung in das Auge herausstellen [130-132].
 - Dies betrifft auch die dynamische Gestaltung der Beleuchtung [65].
 - Leichtfried und Kollegen [133] konnten bei 33 gesunden Teilnehmern (zwischen 18 und 45 Jahre) im Labor zeigen, dass sich helles Licht (5 000 Lux, 6 500 K, 1 500 cd/m²) am Morgen ab 7:40 Uhr für 30 Minuten gegenüber gedimmtem Licht (400 Lux, 4 000 K, 850 cd/m²) negativ auf die Aufmerksamkeitsleistung auswirkte, was auf eine visuelle Störung durch das helle Licht (Blendung) hinwies. Wachheit und Gemütszustand

wurden durch das helle Licht positiv beeinflusst. Keinen Einfluss zeigte die Lichtintervention auf die Unterdrückung der Melatoninproduktion. Um den Einfluss des Tageslichts zu minimieren, wurde die Studie im Winter durchgeführt. Die Autoren schreiben, dass eine gute Lichtplanung sowohl die visuelle als auch die nichtvisuelle Wirkung von Licht berücksichtigen sollte.

- Das Problem von Nebenwirkungen (wie im vorherigen Punkt erwähnt) wurde auch in zwei Arbeiten, die in Kapitel 4 dieses Dokuments beschrieben werden, thematisiert: (i) Blendung durch blaues Licht während einer Autofahrt in der Nacht [121] und (ii) Kopfschmerzen sowie Augenirritationen durch eine Lichtintervention während der Nachtschicht bei Krankenschwestern [67].
 - Welchen Einfluss haben moderne Lampen- und Leuchtentechnologien, wie z. B. (*Organic*) *Light Emitting Diodes (OLED/LED)*, auf die Lichtcharakteristika und damit auf die Gesundheit des Menschen? Welcher Einfluss ist dabei auf mögliche Blauanteile im Licht zurückzuführen?
3. Welche Geräte, Methoden, Fragebögen und Protokolle werden benötigt, um Lichtqualität und Lichtquantität bestmöglich zu messen? Inwieweit müssen hierbei die unterschiedlichen Lichtemittenten (Tageslicht, Lampen, Bildschirme), aber auch die Lichtreflexion von Arbeitsflächen und Arbeitsumgebung, gesondert berücksichtigt werden?
- Es besteht dahingehend Konsens, dass die Maßeinheit Lux (die für die Sehleistung der retinalen Stäbchen und Zapfen definiert ist) die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf die ipRGCs nicht optimal beschreibt [133]. Die Beleuchtungsstärke in Lux oder die Bestrahlungsstärke in W/m^2 (oder $\mu W/cm^2$) vor dem Auge in Blickrichtung zu messen ist nicht korrekt. Diese Größen beschreiben nicht, welche Intensitäten auf die Netzhaut gelangen. Je nach Größe der Lichtquelle kann das vor dem Auge gemessene Licht im Extremfall auf eine kleine Netzhautstelle fokussiert oder über die gesamte Netzhaut verteilt sein. Die photometrisch bzw. radiometrisch richtigen Größen wären die Leuchtdichte in cd/m^2 oder die Strahldichte z. B. in $W/(m^2 \times sr)$. Dies wird bei der Bewertung für Blaulichtschädigung bereits so praktiziert.

4. Über welche physiologischen Wege (neben den bekannten Strukturen des zirkadianen Systems) werden die nichtvisuellen Wirkungen von Licht im Körper vermittelt? Welche genaue Rolle spielen hierbei beispielsweise Hormone wie Melatonin, Serotonin und Dopamin?
5. Gibt es interindividuelle Unterschiede in der nichtvisuellen Wirkung von Licht auf Schlaf und Arbeitssicherheit bzgl. Chronotyp, Profil der Gene des zirkadianen Systems, Lichtsensitivität, Lichthistorie und Anpassungsverhalten des zirkadianen Systems, Geschlecht, Alter oder Gesundheitszustand (z. B. Linsentrübung bei Katarakt)? Welche Biomarker eignen sich zur Bewertung der nichtvisuellen Wirkung von Licht auf den Menschen?
 - Die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf das Wachheitsniveau unterscheidet sich möglicherweise bei Menschen mit unterschiedlichen genetischen Profilen. Studien zu Polymorphismen des PER3-Gens (PER5/5 vs. PER4/4) zeigen, dass Träger des PER5/5-Polymorphismus stärker in ihrer Wachheit durch Licht beeinflusst wurden als Träger des PER4/4-Polymorphismus [129]. Die Exposition mit blauem Licht (460 nm), jedoch nicht mit grünem Licht (550 nm), konnte mit der Expression des Gens PER2 in Zellen der Mundschleimhaut assoziiert werden [130].
 - Zudem scheint die Pupillenreaktion tageszeitabhängig zu sein [131], sowie Rückschlüsse auf die Robustheit des zirkadianen Systems zuzulassen [132], mit allerdings noch unklarer Bedeutung für den Arbeitsschutz.
6. Inwieweit verändert sich die nichtvisuelle Wirkung von Licht unter dem Einfluss von Schlafmangel und/oder zirkadianer Desynchronisation?
7. Generell fehlt es an Wissen bezüglich der „Spätwirkungen“ von Licht. Einige Hinweise zu Licht am Tag auf den Schlaf in der folgenden Nacht sind durch weitere Studien zu ergänzen, die unter anderem ermitteln, zu welcher Tageszeit das Licht dafür besonders wirksam ist. Ziel ist die Ermittlung einer tageszeitabhängigen Dosis-Wirkungs-Beziehung.
8. Wie nachhaltig sind die nichtvisuellen Wirkungen von Licht auf den Menschen (über Tage, Wochen, Monate, Jahre, Jahrzehnte hinweg)? Welche Auswirkungen haben langjährige Lichtinterventionen am Arbeitsplatz auf den Menschen in

Bezug auf chronische Erkrankungen (z. B. Krebserkrankungen, Herz-Kreislaufkrankungen, Muskel-Skelett-Erkrankungen, psychische Störungen)?

9. Wie dynamisch müssen Beleuchtungslösungen gestaltet sein?
10. Die Literaturstudie zeigt an mehreren Stellen, insbesondere in Kapitel 1.2.1 zur Lichthistorie, dass das nichtvisuelle System auf die Helligkeit adaptiert. Es reagiert z. B. empfindlicher auf Licht, wenn das Auge zuvor dunkeladaptiert war. Je nach Lichthistorie ergibt sich damit eine andere Dosis-Wirkungs-Beziehung. Studien müssen das zeitliche Verhalten dieser Prozesse untersuchen und böten auch die Gelegenheit, die spärlich vorhandenen Studien zu nichtvisuellen Lichtwirkungen am Tag zu ergänzen.
11. Für die gezielte Auslösung der nichtvisuellen Wirkung von Licht kann es sein, dass teilweise Licht mit erhöhten Blauanteilen in der Praxis eingesetzt wird. Dieser Blauanteil könnte sich negativ auf das visuelle System auswirken. Der noch wenig bzw. nur im klinischen Umfeld untersuchte langfristig wirkende Einfluss von Licht auf altersbedingte Makuladegeneration (AMD) ist verstärkt zu untersuchen. Hier sind Wirkungsspektren, Wirkungsschwellen, Dosis-Wirkungs-Beziehungen von negativ wirkendem blauem und positiv wirkendem rotem Licht die Forschungsthemen.

Zusätzliche Fragen für Interventionsstudien aus arbeitsmedizinischer Sicht

12. Können auf Grundlage der o. g. Forschungsergebnisse gesundheitsorientierte Empfehlungen für die Beleuchtung durch Tageslicht und künstliches Licht abgeleitet werden (siehe auch Beleuchtungsanforderungen für Arbeitsräume, Arbeitsplätze und Tätigkeiten, Anhang 1 ArbStättV)? Ein besonderes Augenmerk sollte hierbei auf der zunehmenden Verwendung digitaler Medien liegen („Bildschirmarbeit“ an Smartphones, Tablet-PCs, E-Readern usw.), da diese Geräte Licht emittieren, welches besonders stark auf das zirkadiane System wirken kann.
13. Wie wirken sich mögliche Empfehlungen zur Beleuchtungsgestaltung auf die Unfall- und Fehlerraten am Arbeitsplatz aus (z. B. Personal- und Patientensicherheit in einer Nachtschicht im Krankenhaus)? Lassen sich Effekte messen

bezüglich der Häufigkeit von Wegeunfällen (z. B. Beinahe-Unfälle) in Verbindung mit z. B. Wachheitsgrad, Schlafdauer und Lichtexposition?

14. Welche positiven oder negativen Effekte sind durch das Tragen orangefarbener Brillen nach der Nachtschicht festzustellen (z. B. hinsichtlich Wachheit, Konzentrationsfähigkeit, Sehfähigkeit)?
15. Wie wirken sich mögliche Empfehlungen zur Beleuchtungsgestaltung auf Arbeitszufriedenheit, Wohlbefinden, Arbeitsmotivation, Arbeitsfähigkeit und mentale Gesundheit der Arbeitnehmer aus?
16. Welche besonderen Anforderungen an die Beleuchtungsgestaltung sind in Bezug auf verschiedene Schichtsysteme (Tagdienst, Früh- und Spätdienst, geteilte Dienstformen, Wechselschichtsysteme, Nachtschicht) zu berücksichtigen?
17. Die meisten Studien zu Schicht- und Nachtarbeit behandeln die mögliche Rhythmusverschiebung durch Licht, nicht aber die Rhythmusstabilisierung, die für kurze Schichten angezeigt ist. Die Vor- und Nachteile von Licht zur Rhythmusstabilisierung (z. B. Schlafdruck während risikoreicher Tätigkeiten) müssen verstärkt untersucht werden.
18. Können Arbeitnehmer durch „evidenzbasierte Beleuchtungsplanung“ eine hohe Wachsamkeit und Aufmerksamkeit in der Nachtschicht bewahren, ohne dass dadurch die zirkadiane Rhythmik und der Schlaf nach der Schicht negativ beeinflusst werden?
19. Welche Beleuchtungsgestaltung ist zu wählen, wenn unterschiedliche Menschen mit verschiedenen Schichtformen und individuellen Lichtbedürfnissen unter derselben Beleuchtungsgestaltung zusammenarbeiten müssen?
20. Welche besonderen Maßnahmen können Nachtschichtarbeitnehmern helfen bzw. helfen nicht, Störungen der zirkadianen Rhythmik bzw. Schlafstörungen und deren Auswirkungen zu minimieren? Welche Empfehlungen zur Arbeitsplatz- und Schichtplangestaltung inklusive Ruhezeiten zwischen den Diensten

und Maßnahmen der Schlafhygiene können auf Grundlage neuerer Erkenntnisse abgeleitet werden (verdunkelte Ruheräume am Arbeitsplatz, Ruhezeiten für Power Napping, Verdunklung des Schlafzimmers, individuelle Maßnahmen)?

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Ziel des Arbeitsschutzes ist der Erhalt der Arbeitsfähigkeit und die Prävention von arbeitsbedingten Erkrankungen durch die Vermeidung von Risiken für die Gesundheit. Hierzu zählt unter anderem die Reduktion von Unfallhäufigkeit und Unfallschwere durch weniger Schlafmangel und Müdigkeit sowie die Reduktion physischer und psychischer Belastungen durch die Arbeitsumstände. Die Beleuchtung am Arbeitsplatz erlangt in diesem Kontext Bedeutung aufgrund der unmittelbaren Wirkung von Licht auf den Schlaf und die Arbeitsfähigkeit sowie die Gesundheit des Menschen.

Wie in der vorliegenden Arbeit dargelegt, erfüllen moderne Lebens- und Arbeitsumgebungen oftmals nicht die Anforderungen einer ausreichenden Versorgung mit dem Zeitgeber Licht für die Ansprüche des zirkadianen Systems. Dieser Situation kann durch intelligent angewendete Beleuchtung (während und außerhalb der Arbeitszeit) entsprochen werden. Unklar ist gegenwärtig, welche genauen Lichtintensitäten, spektralen Verteilungen und zeitlichen Kriterien für welche spezifischen Funktionen (z. B. Aufmerksamkeit, Wachheit, Schlaf, zirkadiane Rhythmik) notwendig sind. Die Forderungen aus der ArbStättV, z. B. eine ausreichende Versorgung mit Tageslicht und eine Sichtverbindung nach außen sicherzustellen, sind vorrangig zu erfüllen. Eine zusätzliche künstliche Beleuchtung stellt nur eine Ergänzung dar.

Eine Herausforderung für die Wissenschaft ist, die zentralen Kriterien einer arbeitsschutzrelevanten nichtvisuellen Wirkung von Licht zu erfassen, um diese für die Praxis aufzubereiten. Laborstudien sind hierzu notwendig, um die Mechanismen der nichtvisuellen Wirkung von Licht auf den Menschen unter kontrollierten Bedingungen detailliert zu untersuchen. Ebenfalls notwendig sind Feldstudien am Arbeitsplatz, mit möglichst vielen Teilnehmern. Empfohlen sind beispielsweise prospektive Langzeiterfassungen der Effekte eines kontrollierten Einsatzes einer dynamischen Beleuchtung, die relativ den natürlichen Lichtverhältnissen des Tages nachempfunden ist. Solche Studien müssen sorgfältig geplant und begleitet werden, um die bekannten methodischen Limitationen, die Feldstudien mit sich bringen können, unter Berücksichtigung geschlechtsspezifischer Aspekte bestmöglich zu kontrollieren.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Van den Pol AN. The hypothalamic suprachiasmatic nucleus of rat: intrinsic anatomy. *J Comp Neurol.* 1980;191: 661-702.
- [2] Abrahamson EE, Leak RK, Moore RY. The suprachiasmatic nucleus projects to posterior hypothalamic arousal systems. *Neuroreport.* 2001;12: 435-440.
- [3] Hatori M, Panda S. The emerging roles of melanopsin in behavioral adaptation to light. *Trends Mol Med.* 2010;16: 435-446.
- [4] Panda S, Sato TK, Castrucci AM, Rollag MD, DeGrip WJ, Hogenesch JB, et al. Melanopsin (Opn4) requirement for normal light-induced circadian phase shifting. *Science.* 2002;298: 2213-2216.
- [5] Hattar S, Liao HW, Takao M, Berson DM, Yau KW. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science.* 2002;295: 1065-1070.
- [6] Archer SN, Oster H. How sleep and wakefulness influence circadian rhythmicity: effects of insufficient and mistimed sleep on the animal and human transcriptome. *J Sleep Res.* 2015;24: 476-493.
- [7] Zhang EE, Kay SA. Clocks not winding down: unravelling circadian networks. *Nat Rev Mol Cell Biol.* 2010;11: 764-776.
- [8] Thapan K, Arendt J, Skene DJ. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol.* 2001;535: 261-267.
- [9] Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, et al. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci.* 2001;21: 6405-6412.
- [10] Gronfier C, Wright KP, Jr., Kronauer RE, Jewett ME, Czeisler CA. Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2004;287: E174-81.
- [11] Rufiange M, Beaulieu C, Lachapelle P, Dumont M. Circadian light sensitivity and rate of retinal dark adaptation in indoor and outdoor workers. *J Biol Rhythms.* 2007;22: 454-457.

- [12] Münch M, Kobialka S, Steiner R, Oelhafen P, Wirz-Justice A, Cajochen C. Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2006;290: R1421-8.
- [13] Revell VL, Burgess HJ, Gazda CJ, Smith MR, Fogg LF, Eastman CI. Advancing human circadian rhythms with afternoon melatonin and morning intermittent bright light. *J Clin Endocrinol Metab.* 2006;91: 54-59.
- [14] Rimmer DW, Boivin DB, Shanahan TL, Kronauer RE, Duffy JF, Czeisler CA. Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2000;279: R1574-9.
- [15] Rüger M, Gordijn MC, Beersma DG, de Vries B, Daan S. Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: comparison of daytime and nighttime exposure. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2006;290: R1413-20.
- [16] Zeitzer JM, Khalsa SB, Boivin DB, Duffy JF, Shanahan TL, Kronauer RE, et al. Temporal dynamics of late-night photic stimulation of the human circadian timing system. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2005;289: R839-44.
- [17] Zeitzer JM, Dijk DJ, Kronauer R, Brown E, Czeisler C. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *J Physiol.* 2000;526 Pt 3: 695-702.
- [18] Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D. Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep.* 2006;29: 161-168.
- [19] Cajochen C, Dijk DJ, Borbely AA. Dynamics of EEG slow-wave activity and core body temperature in human sleep after exposure to bright light. *Sleep.* 1992;15: 337-343.
- [20] Cajochen C, Münch M, Kobialka S, Krauchi K, Steiner R, Oelhafen P, et al. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab.* 2005;90: 1311-1316.
- [21] Cajochen C, Knoblauch V, Krauchi K, Renz C, Wirz-Justice A. Dynamics of frontal EEG activity, sleepiness and body temperature under high and low sleep pressure. *Neuroreport.* 2001;12: 2277-2281.

- [22] Rüger M, St Hilaire MA, Brainard GC, Khalsa SB, Kronauer RE, Czeisler CA, et al. Human phase response curve to a single 6.5 h pulse of short-wavelength light. *J Physiol*. 2013;591: 353-363.
- [23] Sahin L, Figueiro MG. Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon. *Physiol Behav*. 2013;116-117: 1-7.
- [24] Sahin L, Wood BM, Plitnick B, Figueiro MG. Daytime light exposure: effects on biomarkers, measures of alertness, and performance. *Behav Brain Res*. 2014;274: 176-185.
- [25] Beaulieu C, Rufiange M, Dumont M, Lachapelle P. Modulation of ERG retinal sensitivity parameters with light environment and photoperiod. *Doc Ophthalmol*. 2009;118: 89-99.
- [26] Chang AM, Santhi N, St Hilaire M, Gronfier C, Bradstreet DS, Duffy JF, et al. Human responses to bright light of different durations. *J Physiol*. 2012;590: 3103-3112.
- [27] Lall GS, Revell VL, Momiji H, Al Enezi J, Altimus CM, Guler AD, et al. Distinct contributions of rod, cone, and melanopsin photoreceptors to encoding irradiance. *Neuron*. 2010;66: 417-428.
- [28] Jewett ME, Rimmer DW, Duffy JF, Klerman EB, Kronauer RE, Czeisler CA. Human circadian pacemaker is sensitive to light throughout subjective day without evidence of transients. *Am J Physiol*. 1997;273: R1800-9.
- [29] Vartanian GV, Li BY, Chervenak AP, Walch OJ, Pack W, Ala-Laurila P, et al. Melatonin Suppression by Light in Humans Is More Sensitive Than Previously Reported. *J Biol Rhythms*. 2015;30: 351-354.
- [30] Gooley JJ, Rajaratnam SM, Brainard GC, Kronauer RE, Czeisler CA, Lockley SW. Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light. *Sci Transl Med*. 2010;2: 31ra33.
- [31] Hanifin JP, Stewart KT, Smith P, Tanner R, Rollag M, Brainard GC. High-intensity red light suppresses melatonin. *Chronobiol Int*. 2006;23: 251-268.
- [32] Papamichael C, Skene DJ, Revell VL. Human nonvisual responses to simultaneous presentation of blue and red monochromatic light. *J Biol Rhythms*. 2012;27: 70-78.
- [33] Ho Mien I, Chua EC, Lau P, Tan LC, Lee IT, Yeo SC, et al. Effects of exposure to intermittent versus continuous red light on human circadian

- rhythms, melatonin suppression, and pupillary constriction. *PLoS One*. 2014;9: e96532.
- [34] Dewan K, Benloucif S, Reid K, Wolfe LF, Zee PC. Light-induced changes of the circadian clock of humans: increasing duration is more effective than increasing light intensity. *Sleep*. 2011;34: 593-599.
- [35] Vandewalle G, Gais S, Schabus M, Balteau E, Carrier J, Darsaud A, et al. Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure. *Cereb Cortex*. 2007;17: 2788-2795.
- [36] Hébert M, Martin SK, Lee C, Eastman CI. The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *J Pineal Res*. 2002;33: 198-203.
- [37] Chang AM, Scheer FA, Czeisler CA, Aeschbach D. Direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans depend on prior light history. *Sleep*. 2013;36: 1239-1246.
- [38] Chang AM, Scheer FA, Czeisler CA. The human circadian system adapts to prior photic history. *J Physiol*. 2011;589: 1095-1102.
- [39] Jasser SA, Hanifin JP, Rollag MD, Brainard GC. Dim light adaptation attenuates acute melatonin suppression in humans. *J Biol Rhythms*. 2006;21: 394-404.
- [40] Münch M, Plomp G, Thunell E, Kawasaki A, Scartezzini JL, Herzog MH. Different colors of light lead to different adaptation and activation as determined by high-density EEG. *Neuroimage*. 2014;101: 547-554.
- [41] Perrin F, Peigneux P, Fuchs S, Verhaeghe S, Laureys S, Middleton B, et al. Nonvisual responses to light exposure in the human brain during the circadian night. *Curr Biol*. 2004;14: 1842-1846.
- [42] Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA. High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab*. 2003;88: 4502-4505.
- [43] Boivin DB, Czeisler CA. Resetting of circadian melatonin and cortisol rhythms in humans by ordinary room light. *Neuroreport*. 1998;9: 779-782.
- [44] Campbell SS, Dawson D. Enhancement of nighttime alertness and performance with bright ambient light. *Physiol Behav*. 1990;48: 317-320.
- [45] Campbell SS. Effects of timed bright-light exposure on shift-work adaptation in middle-aged subjects. *Sleep*. 1995;18: 408-416.

- [46] Daurat A, Aguirre A, Foret J, Gonnet P, Keromes A, Benoit O. Bright light affects alertness and performance rhythms during a 24-h constant routine. *Physiol Behav.* 1993;53: 929-936.
- [47] Dawson D, Encel N, Lushington K. Improving adaptation to simulated night shift: timed exposure to bright light versus daytime melatonin administration. *Sleep.* 1995;18: 11-21.
- [48] Dollins AB, Lynch HJ, Wurtman RJ, Deng MH, Lieberman HR. Effects of illumination on human nocturnal serum melatonin levels and performance. *Physiol Behav.* 1993;53: 153-160.
- [49] Santhi N, Aeschbach D, Horowitz TS, Czeisler CA. The impact of sleep timing and bright light exposure on attentional impairment during night work. *J Biol Rhythms.* 2008;23: 341-352.
- [50] Santhi N, Duffy JF, Horowitz TS, Czeisler CA. Scheduling of sleep/darkness affects the circadian phase of night shift workers. *Neurosci Lett.* 2005;390: 187-187.
- [51] Kayumov L, Casper RF, Hawa RJ, Perelman B, Chung SA, Sokalsky S, et al. Blocking low-wavelength light prevents nocturnal melatonin suppression with no adverse effect on performance during simulated shift work. *J Clin Endocrinol Metab.* 2005;90: 2755-2761.
- [52] Yoon IY, Jeong DU, Kwon KB, Kang SB, Song BG. Bright light exposure at night and light attenuation in the morning improve adaptation of night shift workers. *Sleep.* 2002;25: 351-6.
- [53] Daurat A, Foret J, Benoit O, Mauco G. Bright light during nighttime: effects on the circadian regulation of alertness and performance. *Biol Signals Recept.* 2000;9: 309-318.
- [54] Dawson D, Campbell SS. Timed exposure to bright light improves sleep and alertness during simulated night shifts. *Sleep.* 1991;14: 511-516.
- [55] Eastman CI, Liu L, Fogg LF. Circadian rhythm adaptation to simulated night shift work: effect of nocturnal bright-light duration. *Sleep.* 1995;18: 399-407.
- [56] Eastman CI, Stewart KT, Mahoney MP, Liu L, Fogg LF. Dark goggles and bright light improve circadian rhythm adaptation to night-shift work. *Sleep.* 1994;17: 535-543.

- [57] Horowitz TS, Cade BE, Wolfe JM, Czeisler CA. Efficacy of bright light and sleep/darkness scheduling in alleviating circadian maladaptation to night work. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2001;281: E384-91.
- [58] Boivin DB, James FO. Circadian adaptation to night-shift work by judicious light and darkness exposure. *J Biol Rhythms.* 2002;17: 556-567.
- [59] Crowley S, Lee C, Tseng C, Fogg L, Eastman C. Complete or partial circadian re-entrainment improves performance, alertness, and mood during night-shift work. *Sleep.* 2004;27: 1077-87.
- [60] Czeisler CA, Johnson MP, Duffy JF, Brown EN, Ronda JM, Kronauer RE. Exposure to bright light and darkness to treat physiologic maladaptation to night work. *N Engl J Med.* 1990;322: 1253-1259.
- [61] Crowley SJ, Lee C, Tseng CY, Fogg LF, Eastman CI. Combinations of bright light, scheduled dark, sunglasses, and melatonin to facilitate circadian entrainment to night shift work. *J Biol Rhythms.* 2003;18: 513-523.
- [62] Costa G, Ghirlanda G, Minors DS, Waterhouse JM. Effect of bright light on tolerance to night work. *Scand J Work Environ Health.* 1993;19: 414-420.
- [63] Bjorvatn B, Stangenes K, Oyane N, Forberg K, Lowden A, Holsten F, et al. Randomized placebo-controlled field study of the effects of bright light and melatonin in adaptation to night work. *Scand J Work Environ Health.* 2007;33: 204-214.
- [64] Budnick LD, Lerman SE, Nicolich MJ. An evaluation of scheduled bright light and darkness on rotating shiftworkers: trial and limitations. *Am J Ind Med.* 1995;27: 771-782.
- [65] Lowden A, Åkerstedt T. Assessment of a new dynamic light regimen in a nuclear power control room without windows on quickly rotating shiftworkers--effects on health, wakefulness, and circadian alignment: a pilot study. *Chronobiol Int.* 2012;29: 641-649.
- [66] Lowden A, Åkerstedt T, Wibom R. Suppression of sleepiness and melatonin by bright light exposure during breaks in night work. *J Sleep Res.* 2004;13: 37-43.
- [67] Leppämäki S, Partonen T, Piironen P, Haukka J, Lonnqvist J. Timed bright-light exposure and complaints related to shift work among women. *Scand J Work Environ Health.* 2003;29: 22-26.

- [68] Borugian MJ, Gallagher RP, Friesen MC, Switzer TF, Aronson KJ. Twenty-four-hour light exposure and melatonin levels among shift workers. *J Occup Environ Med.* 2005;47: 1268-1275.
- [69] Papantoniou K, Pozo OJ, Espinosa A, Marcos J, Castano-Vinyals G, Basagana X, et al. Circadian variation of melatonin, light exposure, and diurnal preference in day and night shift workers of both sexes. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 2014;23: 1176-1186.
- [70] Neil-Sztramko SE, Pahwa M, Demers PA, Gotay CC. Health-related interventions among night shift workers: a critical review of the literature. *Scand J Work Environ Health.* 2014;40: 543-556.
- [71] van de Werken M, Gimenez MC, de Vries B, Beersma DG, Gordijn MC. Short-wavelength attenuated polychromatic white light during work at night: limited melatonin suppression without substantial decline of alertness. *Chronobiol Int.* 2013;30: 843-854.
- [72] Folkard S. Do permanent night workers show circadian adjustment? A review based on the endogenous melatonin rhythm. *Chronobiol Int.* 2008;25: 215-24.
- [73] Boivin DB, Boudreau P, Tremblay GM. Phototherapy and orange-tinted goggles for night-shift adaptation of police officers on patrol. *Chronobiol Int.* 2012;29: 629-640.
- [74] Grundy A, Tranmer J, Richardson H, Graham CH, Aronson KJ. The influence of light at night exposure on melatonin levels among Canadian rotating shift nurses. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 2011;20: 2404-2412.
- [75] Smolders KC, de Kort YA, Cluitmans PJ. A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Physiol Behav.* 2012;107: 7-16.
- [76] Sasseville A, Martin JS, Houle J, Hébert M. Investigating the contribution of short wavelengths in the alerting effect of bright light. *Physiol Behav.* 2015;151: 81-87.
- [77] Gimenez MC, Beersma DG, Bollen P, van der Linden ML, Gordijn MC. Effects of a chronic reduction of short-wavelength light input on melatonin and sleep patterns in humans: evidence for adaptation. *Chronobiol Int.* 2014;31: 690-697.
- [78] Rahman SA, Shapiro CM, Wang F, Ainlay H, Kazmi S, Brown TJ, et al. Effects of filtering visual short wavelengths during nocturnal shiftwork on sleep and performance. *Chronobiol Int.* 2013;30: 951-962.

- [79] Wood B, Rea MS, Plitnick B, Figueiro MG. Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression. *Appl Ergon.* 2012;44: 237-40.
- [80] Santhi N, Thorne HC, van der Veen DR, Johnsen S, Mills SL, Hommes V, 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: 47-59.
- [81] Vandewalle G, Balteau E, Phillips C, Degueldre C, Moreau V, Sterpenich V, et al. Daytime light exposure dynamically enhances brain responses. *Curr Biol.* 2006;16: 1616-1621.
- [82] An M, Huang J, Shimomura Y, Katsuura T. Time-of-day-dependent effects of monochromatic light exposure on human cognitive function. *J Physiol Anthropol.* 2009;28: 217-223.
- [83] Cajochen C, Frey S, Anders D, Späti J, Bues M, Pross A, et al. Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J Appl Physiol* (1985). 2011;110: 1432-1438.
- [84] Chang AM, Aeschbach D, Duffy JF, Czeisler CA. Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2015;112: 1232-1237.
- [85] Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER). Opinion on Potential risks to human health of Light Emitting Diodes (LEDs). 2018.
- [86] Phipps-Nelson J, Redman JR, Dijk DJ, Rajaratnam SM. Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. *Sleep.* 2003;26: 695-700.
- [87] Whitmore JN, French J, Fischer JR. Psychophysiological effects of a brief nocturnal light exposure. *J Hum Ergol (Tokyo).* 2001;30: 267-272.
- [88] Chellappa SL, Steiner R, Blattner P, Oelhafen P, Gotz T, Cajochen C. Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert? *PLoS One.* 2011;6: e16429.
- [89] Hoffmann G, Gufler V, Griesmacher A, Bartenbach C, Canazei M, Staggli S, et al. Effects of variable lighting intensities and colour temperatures on sulphatoxymelatonin and subjective mood in an experimental office workplace. *Appl Ergon.* 2008;39: 719-728.

- [90] Deacon SJ, Arendt J. Phase-shifts in melatonin, 6-sulphatoxymelatonin and alertness rhythms after treatment with moderately bright light at night. *Clin Endocrinol (Oxf)*. 1994;40: 413-420.
- [91] Roenneberg T, Kantermann T, Juda M, Vetter C, Allebrandt KV. Light and the human circadian clock. *Handb Exp Pharmacol*. 2013;217: 311-331.
- [92] Tucker P, Albrecht S, Kecklund G, Beckers DG, Leineweber C. Work time control, sleep & accident risk: A prospective cohort study. *Chronobiol Int*. 2016;33: 619-629.
- [93] Lee ML, Howard ME, Horrey WJ, Liang Y, Anderson C, Shreeve MS, et al. High risk of near-crash driving events following night-shift work. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2016;113: 176-181.
- [94] Folkard S. Shift work, safety, and aging. *Chronobiol Int*. 2008;25: 183-98.
- [95] van de Ven HA, Bültmann U, de Looze MP, Koolhaas W, Kantermann T, Brouwer S, et al. Need for recovery among male technical distal on-call workers. *Ergonomics*. 2015;58: 1927-1938.
- [96] Van Someren EJ, Kessler A, Mirmiran M, Swaab DF. Indirect bright light improves circadian rest-activity rhythm disturbances in demented patients. *Biol Psychiatry*. 1997;41: 955-963.
- [97] Boubekri M, Cheung IN, Reid KJ, Wang CH, Zee PC. Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study. *J Clin Sleep Med*. 2014;10: 603-611.
- [98] Kim MJ, Lee JH, Duffy JF. Circadian Rhythm Sleep Disorders. *J Clin Outcomes Manag*. 2013;20: 513-528.
- [99] Bernsmeier C, Weisskopf DM, Pflueger MO, Mosimann J, Campana B, Terracciano L, et al. Sleep Disruption and Daytime Sleepiness Correlating with Disease Severity and Insulin Resistance in Non-Alcoholic Fatty Liver Disease: A Comparison with Healthy Controls. *PLoS One*. 2015;10: e0143293.
- [100] Goel N, Basner M, Dinges DF. Phenotyping of neurobehavioral vulnerability to circadian phase during sleep loss. *Methods Enzymol*. 2015;552: 285-308.
- [101] Banks S, Van Dongen HP, Maislin G, Dinges DF. Neurobehavioral dynamics following chronic sleep restriction: dose-response effects of one night for recovery. *Sleep*. 2010;33: 1013-1026.
- [102] Lim J, Dinges DF. Sleep deprivation and vigilant attention. *Ann N Y Acad Sci*. 2008;1129: 305-322.

- [103] Mitler MM, Carskadon MA, Czeisler CA, Dement WC, Dinges DF, Graeber RC. Catastrophes, sleep, and public policy: consensus report. *Sleep*. 1988;11: 100-109.
- [104] Costa G. Sleep deprivation due to shift work. *Handb Clin Neurol*. 2015;131: 437-446.
- [105] Kantermann T, Haubruge D, Skene DJ. The Shift-Work Accident Rate is More Related to the Shift Type than to Shift Rotation. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2013;9:6: 1586.
- [106] Albrecht U. Circadian clocks and mood-related behaviors. *Handb Exp Pharmacol*. 2013;(217): 227-239.
- [107] Wirz-Justice A. Biological rhythm disturbances in mood disorders. *Int Clin Psychopharmacol*. 2006;21 Suppl 1: S11-5.
- [108] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt – Beleuchtung. Forschung Projekt F 2353. 2016.
- [109] Davies SK, Ang JE, Revell VL, Holmes B, Mann A, Robertson FP, et al. Effect of sleep deprivation on the human metabolome. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2014;111: 10761-10766.
- [110] Scheer FA, Hu K, Evoniuk H, Kelly EE, Malhotra A, Hilton MF, et al. Impact of the human circadian system, exercise, and their interaction on cardiovascular function. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2010;107: 20541-6.
- [111] Brown SA. Circadian Metabolism: From Mechanisms to Metabolomics and Medicine. *Trends Endocrinol Metab*. 2016;27: 415-426.
- [112] Perelis M, Ramsey KM, Marcheva B, Bass J. Circadian Transcription from Beta Cell Function to Diabetes Pathophysiology. *J Biol Rhythms*. 2016;31: 323-336.
- [113] Roenneberg T, Allebrandt KV, Meroo M, Vetter C. Social jetlag and obesity. *Curr Biol*. 2012;22: 939-943.
- [114] C. Vandahl, K. Bieske, S. Neuhäuser, Ch. Schierz, TU Ilmenau. Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit. TU Ilmenau - Fakultät Maschinenbau Fachgebiet Lichttechnik. 2009.
- [115] SSL-erate Consortium. Lighting for health and well-being in education, work places, nursing homes, domestic applications, and smart cities. ACCELERATE SSL INNOVATION FOR EUROPE. 2014;FP7-ICT-2013-11-619249.

- [116] International Commission on Illumination (CIE). Research Roadmap for Healthful Interior Lighting Applications. CIE. 2016;218 - ISBN 978-3-902842-58-9.
- [117] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Chancen und Risiken beim Einsatz künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung in Arbeitsstätten. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. 2016.
- [118] Leger D, Bayon V, Elbaz M, Philip P, Choudat D. Underexposure to light at work and its association to insomnia and sleepiness: a cross-sectional study of 13,296 workers of one transportation company. *J Psychosom Res.* 2011;70: 29-36.
- [119] Viola AU, James LM, Schlangen LJ, Dijk DJ. Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scand J Work Environ Health.* 2008;34: 297-306.
- [120] Vetter C, Juda M, Lang D, Wojtysiak A, Roenneberg T. Blue-enriched office light competes with natural light as a zeitgeber. *Scand J Work Environ Health.* 2011;37: 437-45.
- [121] Taillard J, Capelli A, Sagaspe P, Anund A, Åkerstedt T, Philip P. In-car nocturnal blue light exposure improves motorway driving: a randomized controlled trial. *PLoS One.* 2012;7: e46750.
- [122] Eastman CI, Martin SK. How to use light and dark to produce circadian adaptation to night shift work. *Ann Med.* 1999;31: 87-98.
- [123] James FO, Walker CD, Boivin DB. Controlled exposure to light and darkness realigns the salivary cortisol rhythm in night shift workers. *Chronobiol Int.* 2004;21: 961-972.
- [124] Sasseville A, Benhaberou-Brun D, Fontaine C, Charon MC, Hébert M. Wearing blue-blockers in the morning could improve sleep of workers on a permanent night schedule: a pilot study. *Chronobiol Int.* 2009;26: 913-925.
- [125] Tanaka K, Takahashi M, Tanaka M, Takanao T, Nishinoue N, Kaku A, et al. Brief morning exposure to bright light improves subjective symptoms and performance in nurses with rapidly rotating shifts. *J Occup Health.* 2011;53: 258-266.
- [126] Arendt J. Melatonin: characteristics, concerns, and prospects. *J Biol Rhythms.* 2005;20: 291-303.

- [127] Kantermann T, Sung H, Burgess HJ. Comparing the Morningness-Eveningness Questionnaire and Munich ChronoType Questionnaire to the Dim Light Melatonin Onset. *J Biol Rhythms*. 2015;30: 449-453.
- [128] Kitamura S, Hida A, Aritake S, Higuchi S, Enomoto M, Kato M, et al. Validity of the Japanese version of the Munich ChronoType Questionnaire. *Chronobiol Int*. 2014;31: 845-850.
- [129] Gabel V, Maire M, Reichert CF, Chellappa SL, Schmidt C, Hommes V, et al. Dawn simulation light impacts on different cognitive domains under sleep restriction. *Behav Brain Res*. 2015;281: 258-266.
- [130] Rüger M, Gordijn MC, Beersma DG, de Vries B, Daan S. Nasal versus temporal illumination of the human retina: effects on core body temperature, melatonin, and circadian phase. *J Biol Rhythms*. 2005;20: 60-70.
- [131] Visser EK, Beersma DG, Daan S. Melatonin suppression by light in humans is maximal when the nasal part of the retina is illuminated. *J Biol Rhythms*. 1999;14: 116-121.
- [132] Glickman G, Hanifin JP, Rollag MD, Wang J, Cooper H, Brainard GC. Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans. *J Biol Rhythms*. 2003;18: 71-79.
- [133] Leichtfried V, Mair-Raggautz M, Schaeffer V, Hammerer-Lercher A, Mair G, Bartenbach C, et al. Intense illumination in the morning hours improved mood and alertness but not mental performance. *Appl Ergon*. 2015;46 Pt A: 54-59.

Anhang 1 - Suchalgorithmen

Suchalgorithmus Medline/Pubmed

nonvisual[All Fields] OR non-visual[All Fields] AND (((("light"[MeSH Terms] OR "light"[All Fields]) AND exposure[All Fields]) OR ("lighting"[MeSH Terms] OR "lighting"[All Fields] OR "illumination"[All Fields] OR "light"[MeSH Terms] OR "light"[All Fields]) OR (short[All Fields] AND wavelength[All Fields]) OR (blue[All Fields] AND ("light"[MeSH Terms] OR "light"[All Fields])) OR (bright[All Fields] AND ("light"[MeSH Terms] OR "light"[All Fields])) OR (dim[All Fields] AND ("light"[MeSH Terms] OR "light"[All Fields])) OR (experimental[All Fields] AND ("lighting"[MeSH Terms] OR "lighting"[All Fields] OR "light"[MeSH Terms] OR "light"[All Fields])) OR (controlled[All Fields] AND ("light"[MeSH Terms] OR "light"[All Fields]) AND exposure[All Fields]) OR (("light"[MeSH Terms] OR "light"[All Fields]) AND intensity[All Fields])) AND (("health"[MeSH Terms] OR "health"[All Fields]) OR ("sleep"[MeSH Terms] OR "sleep"[All Fields]) OR performance[All Fields] OR ("wakefulness"[MeSH Terms] OR "wakefulness"[All Fields] OR "vigilance"[All Fields]) OR ("melatonin"[MeSH Terms] OR "melatonin"[All Fields]) OR ("hydrocortisone"[MeSH Terms] OR "hydrocortisone"[All Fields] OR "cortisol"[All Fields]) OR (("body temperature"[MeSH Terms] OR ("body"[All Fields] AND "temperature"[All Fields]) OR "body temperature"[All Fields]) AND ("physiology"[Subheading] OR "physiology"[All Fields] OR "physiology"[MeSH Terms])) OR alertness[All Fields]) NOT review[Publication Type] AND "humans"[Filter]

Suchalgorithmus SCOPUS

nonvisual OR non-visual AND light OR light exposure OR lighting OR illumination OR short wavelength light OR blue light OR bright light OR dim light OR experimental light OR controlled light OR light intensity AND health OR sleep OR performance OR wakefulness OR vigilance OR melatonin OR cortisol OR body temperature OR physiology OR alertness

Anhang 2 - Gutachten aus lichttechnischer Sicht

Autor: Univ.-Prof. Dr. sc. nat. habil.
Christoph Schierz
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik

1 Ausgangslage

Die Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN) beauftragte eine Literaturrecherche „Gesicherte arbeitsschutzrelevante Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen“, mit dem Ziel, die erforderlichen arbeitsschutzrelevanten gesicherten Erkenntnisse, offene Forschungsfragen und Argumente für eine Positionierung gegenüber der Normung hinreichend genau zu definieren. Ziel dieses Gutachtens ist, die Ergebnisse dieser Literaturrecherche, welche aus Sicht der Chronobiologie geschrieben wurde, aus lichttechnischer Sicht kritisch zu überprüfen und ggf. zu ergänzen. Das Gutachten soll zudem den Wissensstand über eine mögliche Schädigung des Auges durch zu hohe Intensitäten des Blauanteils im Licht darlegen. Hierbei wird geklärt, ob eine Schädigung des Auges bei „üblichen“ Beleuchtungsstärken möglich ist.

Um wissenschaftliche Erkenntnisse über gesundheitliche Gefahren von den nichtvisuellen Wirkungen von Licht und anderen Wirkungen, die vom gleichen Licht ausgehen könnten, im Sinne des Arbeitsschutzes umzusetzen, sind folgende vier aufeinander bezogenen Schritte notwendig:

1. **Identifizieren des Gefährdungspotentials** bzw. der gesundheitlichen Zielgrößen: Derzeit steht hier einerseits der nichtvisuelle Wirkungspfad, mit u. a. den Endpunkten circadianer Rhythmus (bzw. davon abhängige Größen) und direkte Unterdrückung von Melatonin (z. B. bzgl. Krebs) im Vordergrund, andererseits die energetische Lichtwirkung auf biologische Systeme, mit photothermischer und photochemischer Schädigung als Endpunkte.
2. **Ermitteln von Dosis-Wirkungs-Beziehungen**, die auch die Wirkungsspektren umfassen und gegebenenfalls Wirkungsschwellen, ab denen erst eine Gefährdung eintritt. Letzteres ist z. B. gegeben, solange der gesunde Organismus in der Lage ist, durch Reparatur- und Erneuerungsprozesse einer schädlichen Belastung entgegenzuwirken. Hier ist auch nach lang-, mittel- und kurzfristigen Wirkungen zu unterscheiden.

3. **Abschätzen der üblichen Expositionen am Arbeitsplatz.** Erst wenn die Verteilung der zeitlichen, örtlichen und spektralen Belastung bekannt ist, kann mit Hilfe der Dosis-Wirkungs-Beziehungen bzw. der Wirkungsschwellen über eine gesundheitliche Relevanz und über Handlungsbedarf eine Aussage getroffen werden.
4. **Risikocharakterisierung,** bei der es um eine abschließende, entscheidungsorientierte Aufbereitung der gewonnenen Erkenntnisse geht, die dem Bedarf und den Interessen von Entscheidungsträgern und möglicherweise von Betroffenen entsprechen sollte. Solche abschließenden Bewertungen sind gesundheitspolitischer und nicht wissenschaftlicher Art, werden aber mit Vorteil wissenschaftlich begleitet.

Die vom Gutachter aus der Literaturstudie und den Ergänzungen in diesem Gutachten abzuleitenden Forschungsbedarf wurde bereits in die Literaturstudie eingearbeitet und wird hier nicht nochmals dargestellt. Ergänzend dazu werden im Folgenden einige Beobachtungen ausgeführt, die sich aus der Analyse der Literaturstudie ergeben. Sie betreffen die Art der lichttechnischen Beschreibung in den zitierten Arbeiten (Kap. 2). In Kap. 3 wird der Wissensstand über mögliche Schädigungen des Auges durch „Blaulicht“ behandelt. In Kap. 4 folgen Schlussfolgerungen und in Kap. 5 ein Literaturverzeichnis.

Absätze, die eine Bewertung oder Empfehlung des Gutachters beinhalten, sind links mit einem Pfeil (→) gekennzeichnet.

2 Diskussion der lichttechnischen Beschreibungen

2.1 Einführung und Bedeutung

„There are published experimental and clinical studies that were conducted with good scientific methodology, but they did not describe the light source; therefore these studies cannot be repeated or extended by another author. Such a paper is useless.“ [1]

→ Die Problematik, welche sich in diesem Zitat widerspiegelt, ist auch in vielen der Arbeiten aus der Literaturstudie erkennbar: Lichttechnische Messgrößen fehlen, sind oft falsch oder werden nur als Label behandelt (z. B. „mit Tageslicht“ und „ohne Tageslicht“). Wenn Messgrößen präsentiert werden, weisen sie oft sehr große Streuungen auf, insbesondere, wenn sie an realen Arbeitsplätzen unter kaum kontrollier-

ten Bedingungen ermittelt wurden. Ein Teil dieser Streuungen entsteht aber vermutlich auch durch undefinierte Messbedingungen (z. B. nicht einheitliche Ausrichtung eines Luxmetermesskopfes).

Große Streuungen in den erklärenden Variablen können dazu führen, dass sich unterschiedliche Szenarien, Testblöcke oder Interventionen lichttechnisch nicht mehr statistisch voneinander unterscheiden. Gegebenenfalls dennoch statistisch signifikante Resultate sind dann nicht mehr notwendigerweise dem Licht als Ursache zuzuschreiben. Um dieser Problematik zu entgehen, werden entweder Störgrößen mit Hilfe von Laborversuchen kontrolliert und dadurch die Streuung reduziert, oder es werden besonders extreme Lichtszenarien miteinander verglichen (z. B. 2 200 K bei 200 lx vs. 12 000 K bei 1 000 lx am Auge [2]). Beiden Methoden kann vorgeworfen werden, nicht praxisrelevant zu sein, z. B. im Hinblick auf Beleuchtungen am Arbeitsplatz. Werden mit diesen Methoden jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede gefunden, ist dies ein Hinweis, dass kein Einfluss vorliegt oder dass dieser durch andere Variablen kompensiert wurde (z. B. bei Leistungstests durch zusätzliche Anstrengung der Personen bei schwierigeren Bedingungen). Eine dritte Methode ist, die Anzahl Versuchspersonen zu erhöhen, bis hin zu epidemiologischen Studien mit u. U. mehreren 1 000. Diese sind teuer und weisen weitere Nachteile auf.

- Ein wissenschaftliches Gesamtbild für das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs kann daher erst entstehen, wenn Studien unterschiedlicher Methodik von verschiedenen unabhängigen Forschergruppen zusammengeführt werden: Interventionsstudien im Labor und im Feld ebenso wie Beobachtungsstudien im Feld oder auch Untersuchungen an Zellen oder Tieren, um die relevanten biologischen Prozesse zu verstehen.
- In jedem Fall müssen aber wissenschaftliche Untersuchungen so beschrieben sein, dass erkennbar ist, ob der Versuchsaufbau Fehler aufweist, wie groß Messfehler sind, ob die Zahl der Untersuchungspersonen bzw. -objekte ausreichend groß ist, wie die einzelnen Schritte der Untersuchung abliefen und ob die Schlussfolgerungen durch die Versuchsergebnisse belegt sind. Eine publizierte Studie sollte auf Grund der Beschreibung von anderen Wissenschaftlern repliziert werden können.

Eine vorbildliche lichttechnische Beschreibung enthält z. B. die Arbeit Nr. 4/13 der Literaturstudie. Sie orientiert sich an Abs. 5.3 der DIN SPEC 5031-100 [3]. Danach sind zur vereinfachten Beschreibung der Lichtexposition von Personen (hier „Beobachter“ genannt) durch einfache Lichtquellen in wissenschaftlichen Experimenten und in Praxisanwendungen die leuchtenden Teile der Lichtquellen S zu beschreiben mit:

- a) Position im Gesichtsfeld des Beobachters bezüglich der Blickrichtung (Quer- und Höhenabstand);
- b) Größe der leuchtenden Flächen A_S ;
- c) Entfernungen zu den Augen des Beobachters;
- d) Hinweise zur Form der leuchtenden Fläche;
- e) Beleuchtungsstärke E in lx am Auge des Beobachters (Messfläche steht senkrecht zur Blickrichtung);
- f) melanopische Wirkungsfaktoren $a_{mel, v}$ der verwendeten Lampen oder am Auge des Beobachters, [...];
- g) genaue Typkennzeichnung der verwendeten Lampen, inklusive Herstellerangabe;
- h) zeitlicher Verlauf und Dauer der Lichtexposition;
- i) mittlere Leuchtdichten der leuchtenden Teile der Lichtquellen (zusätzlich für Vergleichszwecke)

Lichttechnische Messgrößen sollen im Folgenden detaillierter erläutert werden.

2.2 Messgrößen und Maßeinheiten

→ Die Literaturstudie zeigt, dass viele der in der Literatur angegebenen radiometrischen Größen fehlerhaft sind. Das liegt vermutlich an falsch angewendeten Umrechnungen, insbesondere wenn das verwendete Messgerät Ergebnisse in einer anderen Maßeinheit liefert als man in der Publikation verwenden möchte. Eine Rekonstruktion des richtigen Werts ist manchmal möglich, wenn in mehreren Maßeinheiten dokumentiert wird. Oft fehlt aber auch eine Angabe zu dem verwendeten Messgerät (Firma und Typ), so dass nicht klar ist, welches die ursprüngliche Maßeinheit war. Es kann dann nur vermutet werden, dass die Beleuchtungsstärke in Lux die ursprüngliche Maßeinheit war, da diese Geräte am weitesten verbreitet sind (z. B. in Nr. 5/13 der Literaturstudie).

Folgende drei Systeme von Maßeinheiten haben sich in der wissenschaftlichen Literatur zu biologischen Strahlungswirkungen am Auge eingebürgert:

- Die Photonenbestrahlungsstärke (oft in Photonen \cdot cm⁻² \cdot s⁻¹) bzw. deren dekadischer Logarithmus. Sie beschreibt, wie viele Photonen pro Sekunde und Quadratzentimeter auf das betrachtete Gewebe eintreffen. Sie ist besonders dort sinnvoll, wo molekulare Veränderungen untersucht werden.

- Die (energetische) Bestrahlungsstärke (oft in $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$). Sie berücksichtigt nicht nur die Anzahl der Photonen, sondern auch, dass jedes Photon einen Energiebeitrag ins absorbierende Gewebe einbringt. Dieser Energiebeitrag ist von der Wellenlänge abhängig: Photonen kurzwelliger Strahlung transportieren höhere Energien als solche langwelliger Strahlung.
- Die Beleuchtungsstärke (in Lux, bzw. lx). Hierbei handelt es sich um eine mit der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ spektral gewichtete Bestrahlungsstärke. Sie wurde zur Beschreibung der Wahrnehmung von Helligkeit entwickelt. Für die Beleuchtungsstärke gibt es relativ kostengünstige Messgeräte, was ihre Verbreitung erklärt. Diese werden darum auch dann oft verwendet, wenn die betrachtete Strahlungswirkung nicht die Hellempfindung des Sehvorgangs ist.

Für monochromatische Strahlung, also auch näherungsweise für farbige, schmalbandige LED-Strahlung, lassen sich die Maßeinheiten mit den folgenden beiden Formeln <1> und <2> ineinander umrechnen.

Umrechnung der Photonenbestrahlungsstärke in (energetische) Bestrahlungsstärke:

$$E_e = E_p \cdot \frac{1,986 \cdot 10^{-10} \mu\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{nm}}{\lambda} \quad <1>$$

mit:

E_e (energetische) Bestrahlungsstärke..... in $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$

E_p Photonenbestrahlungsstärke..... in Photonen $\cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

λ Wellenlänge..... in nm

Umrechnung der (energetischen) Bestrahlungsstärke in Beleuchtungsstärke (nur bei Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich):

$$E_v = E_e \cdot 6,83 \frac{\text{lx}}{\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}} \cdot V(\lambda) \quad <2>$$

mit:

E_v Beleuchtungsstärke..... in lx

E_e	(energetische) Bestrahlungsstärke.....	in $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$
$V(\lambda)$	Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion	--
λ	Wellenlänge	in nm

Spektren von polychromatischem Licht, wie etwa von weißen, leuchtstoffkonvertierten LEDs oder von Leuchtstoff- und Glühlampen, müssen rechnerisch erst spektral zerlegt werden, um für jeden Wellenlängenbereich die Formeln <1> oder <2> anwenden zu können. Anschließend werden die spektralen Bereiche jeweils entsprechend ihrem Anteil im Spektrum wieder aufsummiert.

2.3 Ort und Richtung der Bestrahlungsmessung

→ Die gemessene Bestrahlung ist (anders als z. B. bei einer Messung der Raumtemperatur) stark vom Ort und der Ausrichtung des Messgeräts abhängig. Die fehlende Dokumentation von Ort und Ausrichtung des Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärkemessgeräts in einigen zitierten Arbeiten der Literaturstudie (z. B. [4]) zeigt, dass deren Bedeutung nicht erkannt wird. Das mag auch einen Teil der großen Messstreuung erklären: So können z. B. bei 500 lx auf der Arbeitsfläche in Augenhöhe Richtung Fenster 1 350 lx und in Richtung fensterabgewandte Wand nur 130 lx auftreten [5].

Für zwei spezielle Messrichtungen wurden in der Photometrie die Begriffe horizontale und vertikale Beleuchtungsstärke eingeführt. Diese werden von lichttechnischen Laien manchmal verwechselt (z. B. vermutlich in Nr. 1/13 der Literaturstudie, wo „horizontally at the level of the eyes“ gemessen wurde). Die horizontale Beleuchtungsstärke misst die Strahlung, die auf eine horizontale Ebene fällt (siehe Abbildung 1) – das Messgerät „schaut“ somit nach oben, was aber auf Augenhöhe keinen Sinn macht. Entsprechend misst vertikale Beleuchtungsstärke die Strahlung auf eine vertikale Ebene.

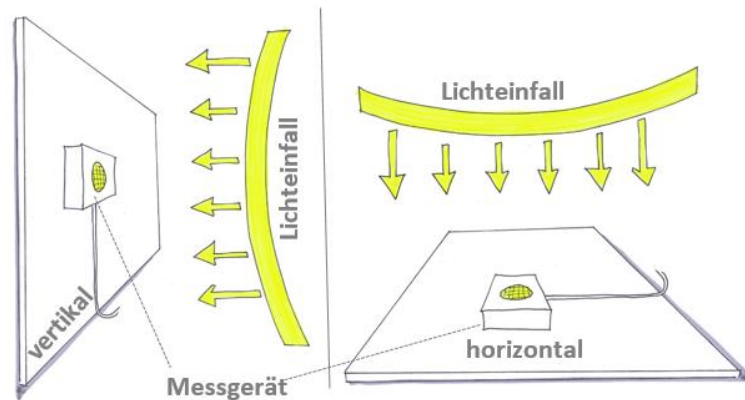


Abbildung 1: Zur Definition der horizontalen Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke und der vertikalen Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke. (Bildquelle: Michael Hüter)

- In der Literatur zu biologischen Lichtwirkungen ist die Messung der vertikalen Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke am Ort des Auges in Blickrichtung verbreitet (Höhe über Boden ca. 1,2 m im Sitzen oder ca. 1,6 m im Stehen). Messungen der Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz, z. B. nach ASR A3.4, erfolgen jedoch in der Ebene der Sehaufgaben, also meistens als horizontale Beleuchtungsstärke in etwa 0,8 m Höhe. Die Werte können daher nicht eins zu eins übertragen werden. Messwerte beider Größen gibt z. B. ein Anhang von Nr. 4/13 der Literaturstudie.

2.4 Bestrahlung der Hornhaut (Cornea) vs. Bestrahlung der Netzhaut (Retina)

- Zur Bewertung der Hornhautschädigung des Auges ist die Messung der Bestrahlungsstärke in Blickrichtung vor dem Auge eine sinnvolle Größe. Sowohl für die nichtvisuellen Lichtwirkungen als auch für die Netzhautschädigung durch Blaulicht und IR-Strahlung müsste jedoch die Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut bekannt sein. Da diese sich nicht direkt messen lässt, gehen die meisten Autoren davon aus, sie ebenfalls durch die Bestrahlungsstärke vor dem Auge ersetzen zu können. Diese Ansicht ist wegen der abbildenden Optik des Auges falsch.

Die retinale Bestrahlungsstärke steht mit der Bestrahlungsstärke vor dem Auge (auf der Hornhaut) in folgendem rechnerischen Zusammenhang:

$$E_{Retina} = E_{Cornea} \cdot \frac{r^2}{A_{LQ}} \cdot \frac{\pi \cdot \tau \cdot d_p^2}{4 \cdot f^2} \quad <3>$$

mit:

E_{Retina}	Bestrahlungsstärke bzw. Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut.....	in $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ bzw. lx
E_{Cornea}	Bestrahlungsstärke bzw. Beleuchtungsstärke vor der Hornhaut	in $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ bzw. lx
A_{LQ}	Leuchtende Fläche der Lichtquelle ⁷	in m^2
r	Entfernung des Auges von der Lichtquelle ⁸	in m
τ	Transmissionsgrad des Auges.....	--
d_p	Pupillendurchmesser	in mm
f	Brennweite des Auges	in mm

Für den Transmissionsgrad τ des Auges wurde im sichtbaren Bereich ein Wert von 0,9 vorgeschlagen [6]. Er ist jedoch von der Wellenlänge der Strahlung abhängig [7], was aber üblicherweise in den Wirkungsspektren der betrachteten biologischen Wirkung bereits berücksichtigt wird. Für den Pupillendurchmesser d_p des helladaptierten Auges werden für die Blaulicht- und IR-Gefährdung der Netzhaut 3 mm angenommen [8]. Sowohl der Transmissionsgrad als auch der Pupillendurchmesser des Auges sind vom Alter der Person abhängig. Diesbezügliche Korrekturfaktoren für nichtvisuelle Lichtwirkungen gibt [3]. Die Brennweite f des Auges hängt zwar etwas von der Entfernung ab, auf die das Auge fokussiert ist, sowie von der Wellenlänge der Strahlung. Aber in guter Näherung wird dafür der konstante Wert 17 mm angenommen.

Nicht durch Konstanten ersetzt werden können jedoch die Fläche der Lichtquelle A_{LQ} und deren Entfernung zum Auge r . Eine große Lichtquelle und eine kleine Lichtquelle erzeugen unterschiedlich große Bestrahlungsstärken auf der Netzhaut, auch wenn die Bestrahlungsstärken auf der Hornhaut übereinstimmen (siehe Abbildung 2).

Für die Bewertung der Netzhautbelastung, z. B. durch Blaulicht, wird dies mit den Grenzwerten bereits berücksichtigt (Kap. 3.4). Bei den nichtvisuellen Lichtwirkun-

⁷ Bei stark gewölbter Lichtquelle ist es die Fläche ihrer Projektion auf eine Ebene senkrecht zur Blickrichtung

⁸ Genau genommen vom Lichtquellenrand, wobei die Lichtquelle gegebenenfalls durch eine flächengleiche Kreisfläche ersetzt wird

gen hingegen ist im Detail noch unbekannt, wie die einzelnen Erregungen der Netzhautstellen neuronal zusammengerechnet werden. Bekannt ist, dass sich im Bereich des schärfsten Sehens (Fovea) keine melanopisch wirksamen Ganglienzellen (ipRGC) befinden. Außerdem gibt es graduelle Unterschiede zwischen oberen und unteren, sowie zwischen nasalen und schläfenseitigen Netzhautbereichen. Hohe konzentrierte Bestrahlungsstärken wie in Abbildung 2 oben könnten die Rezeptoren übersteuern, während das bei dem verteilten Licht unten weniger wahrscheinlich ist.

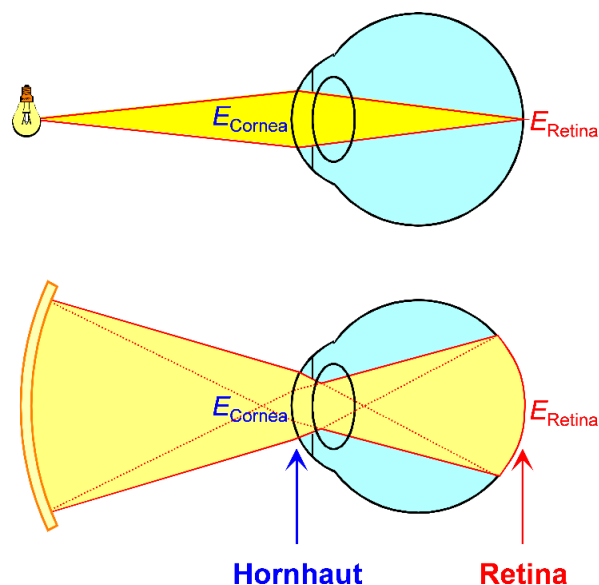


Abbildung 2: Angenommen, die Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärken E_{Cornea} vor der Hornhaut seien in beiden Fällen gleich groß. Bei der großen Quelle (unten) wird das Licht im Vergleich zur kleinen Quelle (oben) auf einen größeren Bereich der Netzhaut (Retina) abgebildet, wodurch es sozusagen „verdünnt“ wird, mit einer entsprechend geringeren Bestrahlungsstärke E_{Retina} auf der Netzhaut.

- Aus der Gleichsetzung von Cornea- und Retinabeleuchtungsstärke folgt auch ein Fehlschluss in der Arbeit [9], ebenso z. B. in [10]: Durch Verkleinerung des Abstands r der Lichtquelle zum Auge steigt die Bestrahlungs- bzw. die Beleuchtungsstärke E_{Cornea} an der Hornhaut des Auges zwar an – näherungsweise mit $1/r^2$. Dies wird aber gemäß Formel <3> für die Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke E_{Retina} auf der Netzhaut mit dem Faktor r^2 gerade wieder kompensiert. Oder in anderen Worten: Durch die Verkürzung des Abstands Lichtquelle-Auge bleibt trotz ansteigender Hornhautbestrahlung die Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut konstant. Allerdings wird dafür das Bild der Lichtquelle auf der Netzhaut größer.
- Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass in wissenschaftlichen Arbeiten neben der üblichen Angabe einer Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke am Auge auch die

Größe der leuchtenden Fläche der Lichtquelle und deren Entfernung zum Auge dokumentiert werden müssen [3].

Diese Problematik wird in der Radiometrie bzw. der Photometrie durch die Verwendung der Leuchtdichte bzw. der Strahldichte gelöst, die durch folgende Formel gegeben ist:

$$L_{LQ} = E_{Cornea} \cdot \frac{r^2}{A_{LQ}} \quad <4>$$

mit:

L_{LQ}	Strahldichte bzw. Leuchtdichte der Lichtquelle	in $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ bzw. $cd \cdot m^{-2}$
E_{Cornea}	Bestrahlungsstärke bzw. Beleuchtungsstärke, wie in <3>	in $W \cdot m^{-2}$ bzw. lx
A_{LQ}	Fläche der Lichtquelle, wie in <3>	in m^2
r	Entfernung des Auges von der Lichtquelle, wie in <3>.....	in m

Diese Größe lässt sich mit Strahldichte- bzw. Leuchtdichterradiometern direkt messen, wodurch sich die Formel <3> vereinfachen lässt. Solche Messgeräte sind meist abbildende Geräte, wodurch sie deutlich teurer sind als Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärkemesser. Eine Weiterentwicklung als ortsauflösende Leuchtdichtemesskamera ermöglicht auch die Beschreibung von inhomogen strahlenden Quellen oder etwa die Leuchtdichteverteilung im gesamten Gesichtsfeld eines Beschäftigten am Arbeitsplatz.

2.5 Zeitpunkt und Dauer der Lichtexposition

Da das Ausmaß nichtvisueller Lichtwirkungen vom Zeitpunkt (von der biologischen „Uhrzeit“) und der Vorgeschichte einer Lichtexposition abhängig ist, ist der zeitliche Verlauf der Bestrahlung über den gesamten Versuchszeitraum zu dokumentieren. Dies erfolgt in den Arbeiten recht zuverlässig, z. B. bei Interventionsstudien durch Angabe von Expositionsintervallen (von...bis) und Zeitprotokollen in Form von Balkendiagrammen.

- Bei Beobachtungsstudien finden oft mobile Geräte Verwendung, welche die Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärken in regelmäßigen Zeitintervallen aufzeichnen.

Diese sollten idealerweise in Augenhöhe in Blickrichtung messen (siehe z. B. [11]). Oft findet ein am Handgelenk getragenes Gerät von der Art einer Acti-Watch (Fa. Philips) Verwendung, das eigentlich zur Aufzeichnung körperlicher Aktivität entwickelt wurde. Der bei einigen Typen zusätzlich enthaltene „light-monitor“ soll den Verlauf der Beleuchtungsstärke aufzeichnen. Für korrekte Messungen ist dieser aber nicht geeignet. Er zeigt meist in eine andere Richtung als das Auge blickt, ist nicht spektral korrigiert, ist nicht Cosinus-korrigiert und wird gelegentlich vom Ärmel verdeckt. Er erlaubt aber etwa, die Dauer im Freien bei Tageslicht grob abzuschätzen, wie z. B. in Nr. 10/13 der Literaturstudie.

2.6 Spektrum

Für die Vergleichbarkeit von Studien untereinander und für die Umsetzung in die Beleuchtungspraxis sind Informationen über die verwendeten spektralen Strahlungsverteilungen wesentlich. Die Notwendigkeit ergibt sich dadurch, dass die untersuchten biologischen Wirkungsspektren nicht mit der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ übereinstimmen, die den photometrischen Größen Lux oder $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ zu Grunde liegt. Das heißt, dass z. B. bläuliches Licht mit 500 lx Beleuchtungsstärke am Auge eine größere nichtvisuelle Wirkung hat als gelbliches Licht ebenfalls mit 500 lx am Auge.

- Bei Annahme einer spektralen Wirkungsfunktion für nichtvisuelle Lichtwirkungen lässt sich dies durch einen Korrekturfaktor ausdrücken, den melanopischen Wirkungsfaktor $a_{\text{mel},v}$ (siehe [3]). Dieser Faktor nimmt für Beleuchtungen am Arbeitsplatz Werte zwischen etwa 0,4 (Glühlampe) bis 0,9 (Tageslicht) an. Obwohl es dafür derzeit noch keine Norm gibt⁹, werden in der Arbeit Nr. 4/13 der Literaturstudie solche Werte angegeben. Bei sichtbarer Strahlung können entsprechende Faktoren auch für andere biologische Wirkungen (z. B. „BLH-Ausbeute der sichtbaren Strahlung“ für Blaulichtschädigung) definiert werden [12].

In der Literaturstudie zeigt sich, dass die Arbeiten oft keine relevanten Angaben zu den verwendeten Lichtspektren dokumentieren. Neben den Fällen ohne Angabe (in Nr. 12/13) finden sich Aussagen wie „full-spectrum“ (in Nr. 6/13), „Blue Light“ (in Nr. 5/13), „blue/white light“ bzw. „yellow light“ (in Nr. 13/13), „cool white, fluorescent lamps“ (in Nr. 7/13), die eher als Label für die entsprechende Lichtsituation zu verstehen sind. Die Beschreibung „full spectrum fluorescent tubes emitting light mimicking the visible spectrum of sunlight and ultraviolet filter“ (in Nr. 8/13)

⁹ DIN SPEC ist eine Spezifikation, keine Norm. Sie hat nicht die umfassenden Abstimmungsverfahren einer Norm durchlaufen.

ist in sich widersprüchlich, weil Fluoreszenzlampen mit ihren spektralen Spitzen kein Tageslichtspektrum nachbilden.

- Die Angabe einer ähnlichsten Farbtemperatur z. B. „17 000 K“ (in Nr. 3/13) ist etwas hilfreicher, da diese mit dem Wirkungsfaktor korreliert. Tatsächlich weisen diese Lampen aber nur 13 650 K auf – und am Auge gemessen dürfte der Wert wegen der Reflexionen im Raum und an den Gegenständen nochmal deutlich geringer sein. Daher sind Messungen der ähnlichsten Farbtemperatur am Auge zu fordern, zusammen mit der Beleuchtungsstärke. Die alleinige Angabe der ähnlichsten Farbtemperatur ist eine starke Vereinfachung, die aber angesichts der großen Streuung bei den gemessenen Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz vertretbar ist.
- Bei monochromatischen LED- oder Laserspektren kann die Peakwellenlänge zusammen mit der Halbwertsbreite angegeben werden.

Eine andere Möglichkeit ist die Angabe der verwendeten Lichtquellen, z. B. „OSRAM 880 LUMILUX SKYWHITE“ in Nr. 4/13. Fachleute der Lichttechnik erkennen daran, dass eine Leuchtstofflampe mit 8 000 K Farbtemperatur und Farbwiedergabeindex zwischen 80 und 90 verwendet wurde. Ebenso „TL-D 90 58W/950“ in Nr. 11/13 (Farbtemperatur 5 000 K, Farbwiedergabeindex >90). Aber das Wissen darüber ist nicht verbreitet und wird mit dem Ausphasen der Leuchtstofflampen mit der Zeit verloren gehen. Standardisierte Bezeichnungen für LED-Spektren sind bis heute nicht festgelegt worden und dürften wegen deren Vielfalt auch schwierig einzuführen sein.

- Eine weitere Möglichkeit ist die grafische Darstellung von Spektren (z. B. im Anhang von Nr. 4/13 oder in Nr. 10/13). Diese sind ohne weitere Angaben aber nicht auswertbar, solange man die Daten nicht z. B. über einen Internetlink herunterladen kann. Dies wäre besonders hilfreich, wenn in Zukunft weitere biologische Lichtwirkungen mit noch nicht bekannten Wirkungsfunktionen entdeckt würden. Auch eine Grafik des spektralen Transmissionsgrades einer Brille in Nr. 10/13 ohne Datensatz hilft nur bedingt. Der spektrale Transmissionsgrad ist zudem nur zusammen mit dem Spektrum der Beleuchtung aussagekräftig.

3 Wissensstand über mögliche Schädigungen des Auges

3.1 Einleitung

Photobiologische Wirkungen sind strahlungsbedingte Veränderungen in der chemischen Struktur, der Gestaltbildung oder im Stoffwechsel und Hormonhaushalt von Organismen. Viele dieser Wirkungen sind für die normale Funktion des Organismus

notwendig (z. B. Vitamin-D₃-Bildung). Optische Strahlung kann durch photobiologische Wirkung die Oberflächen – oder je nach wellenlängenabhängiger Eindringtiefe – das Innere von Auge und Haut schädigen. Es gelangt durch die Pupille und die Augenlinse ins Auge und gefährdet damit dessen Netzhaut. Dabei dürfen mögliche im Spektrum zusätzlich zum sichtbaren Bereich (VIS) vorhandene ultraviolette (UV) oder infrarote (IR) Anteile nicht außer Acht gelassen werden. Man spricht daher nicht von Licht, sondern von optischer Strahlung. Mögliche Gefährdungen des Auges zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Strahlungsgefährdung des Auges

Wellenlängenbereich	Strahlungswirkung
UV-C	Hornhautentzündung (Photokeratitis) Bindehautentzündung (Photokonjunktivitis)
UV-B	Hornhautentzündung (Photokeratitis) Bindehautentzündung (Photokonjunktivitis) Linsentrübung (grauer Star, Katarakt)
UV-A	Linsentrübung (grauer Star, Katarakt)
Sichtbare Strahlung	Photochemische „Blaulichtschädigung“ der Netzhaut Photothermische Schädigung der Netzhaut
IR-A	Linsentrübung (grauer Star, Katarakt) Thermische Schädigung der Netzhaut
IR-B	Linsentrübung (grauer Star, Katarakt) Thermische Schädigung der Hornhaut
IR-C	Thermische Schädigung der Hornhaut

Ein kontinuierliches Monitoring der wissenschaftlichen Literatur und allenfalls benötigte Anpassungen der Grenzwerte bezüglich Blaulichtschädigung werden von der Wissenschaftsorganisation ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) in Zusammenarbeit mit der CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) und der WHO durchgeführt. So wurde die 2009 erschienene Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 [13] im Jahr 2002 vom Technischen Komitee TC 6-47 der CIE erarbeitet, 2006 von der IEC und 2008 von CEN übernommen. Die

Arbeiten der ICNIRP sind auch Grundlage für die 2006 erlassene EU-Richtlinie 2006/25/EG (siehe Anhang I in [14]).

Maßgebend für photobiologische Wirkungen ist die effektiv absorbierte Strahlungsenergie H pro bestrahlte Fläche (= Bestrahlung in $J \cdot m^{-2}$, bzw. Bestrahlungsstärke mal Zeit in $W \cdot m^{-2} \cdot s$). Diese hängt von der Bestrahlungsstärke E , dem Energiespektrum $E_\lambda(\lambda)$ bzw. $L_\lambda(\lambda)$ der Strahlung, der Bestrahlungsdauer t und der spektralen Empfindlichkeit des betrachteten biologischen Prozesses ab. Zur Bewertung des Strahlungsspektrums werden drei Wirkungsspektren $S(\lambda)$, $B(\lambda)$ und $R(\lambda)$ verwendet [14]. Ein Wirkungsspektrum ist eine Darstellung der relativen Wirksamkeit unterschiedlicher Wellenlängen für eine bestimmte biologische Reaktion. $S(\lambda)$ bewertet die Wirkung von UV-Strahlung bezüglich der Schädigung von Haut und äußerem Auge, $B(\lambda)$ die photochemische Netzhautgefährdung durch blaues Licht und $R(\lambda)$ die thermische Netzhautgefährdung (siehe Abbildung 3). Wirkungsspektren zur altersbedingten Makuladegeneration (AMD) werden in Kap. 3.5 behandelt.

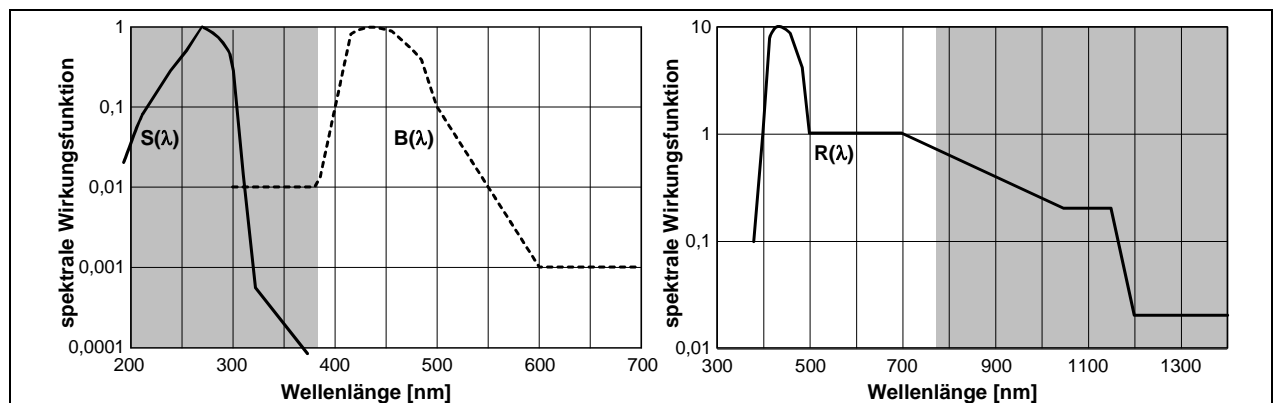


Abbildung 3: Wirkungsspektren zur Gewichtung von Bestrahlungsspektren in logarithmischer Darstellung. Links: $S(\lambda)$ und $B(\lambda)$, grau = UV-Bereich. Rechts: $R(\lambda)$, grau = IR-Bereich.

Während bei gegebener Einwirkungsdauer t für Oberflächen wie Haut oder äußeres Auge die Bestrahlungsstärken E (in $W \cdot m^{-2}$) begrenzt werden müssen, ist für den Schutz der Netzhaut des Auges (Retina) zu berücksichtigen, dass das Auge die Strahlungsquelle optisch auf die Netzhaut abbildet. Dadurch wird die Größe der Strahlungsquelle (bzw. ihres Abbildes) bedeutsam und es müssen statt Bestrahlungsstärken Strahldichten L (in $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) begrenzt werden. Die Unterscheidung zwischen Bestrahlungsstärke und Strahldichte bereitet erfahrungsgemäß lichttechnischen Laien Schwierigkeiten. Zur Bewertung der Netzhautgefährdung genügt die Angabe einer Bestrahlungsstärke am Auge nicht, es muss mindestens zusätzlich die Größe der strahlenden Quellenfläche und deren Abstand berücksichtigt werden (siehe Kap. 2.4).

Eine Gefährdung der Netzhaut besteht nur, wenn sich die Strahlungsquelle im Gesichtsfeld befindet – es ist dafür aber nicht notwendig, dass direkt in die Strahlungsquelle geblickt wird, diese kann sich auch im peripheren Gesichtsfeld befinden [15]. Die Einwirkungsdauer auf eine Stelle der Netzhaut ist bei kleinen Quellen im Allgemeinen sehr kurz, da die Stelle sich mit jeder Kopf- bzw. Augenbewegung verändert. Je größer die Quelle ist, eine desto geringere Rolle spielen die Blickbewegungen und desto größer können die Einwirkungsdauer und damit das Risiko an einer bestimmten Netzhautstelle werden.

- Während die Grenzwerte an sich weitgehend unbestritten sind, kann deren Umsetzung in Messlaboren und bezüglich Messungen an Arbeitsplätzen Schwierigkeiten bereiten. Relativ einfach ist die Messung von Bestrahlungsstärken zur Bewertung der Bestrahlung der Haut oder des äußeren Auges, falls man ein auch im UV- bzw. IR-Bereich spektral auflösendes Messgerät zur Verfügung hat. Diese sind auf Grund der Kosten im Bereich des Arbeitsschutzes wenig verbreitet. Eine Überschreitung der Grenzwerte ist aber bei der Beleuchtung und bei Bildschirmen nicht zu erwarten (Kap. 3.2 bis 3.4), nur in bekannten Sonderfällen (z. B. Laser).
- Deutlich aufwändiger ist die Messung der Strahldichte zur Bewertung der Netzhautbelastung, insbesondere bei großen, inhomogenen Strahlungsquellen (z. B. Bühnenscheinwerfer). Hier muss in der leuchtenden Fläche bei vorgegebenem kleinem Messwinkel die maximale Strahldichte gesucht werden. Dafür wären ortsauflösende Strahldichtekameras hilfreich, wenn sie mit den passenden Wirkungsspektren (Abbildung 3) und kalibrierten Graufiltern zur Reduktion der hohen Intensitäten versehen sind. Solche Geräte sind derzeit höchstens als Sonderanfertigungen verfügbar.
- Zur vermeintlichen Vereinfachung wurden daher in DIN EN 62471 [13] sogenannte Risikogruppen für Strahlungsquellen eingeführt (Tabelle 2). Diese klassifizieren die Quellen auf Grund von Messwerten entweder in 0,2 m Abstand oder in einem Abstand mit 500 lx Beleuchtungsstärke. Um am Arbeitsplatz die Strahlung am Auge zu beurteilen, ist beides nicht sinnvoll¹⁰. Zudem waren die Risikogruppen nie dafür gedacht, auf das Risiko am Arbeitsplatz schließen zu können [16]. Auch gibt die Abstufung der Risikogruppen einen falschen Eindruck bezüglich ihrer Bedeutung: Risikogruppe 2 bedeutet am Arbeitsplatz bei normalem üblichem Verhalten der Beschäftigten keine Überschreitung der Grenzwerte. So bezeichnen Sliney et al. [16] RG 2 im Gegensatz zur Norm als „low risk“ und RG 3 als „medium or significant risk“.

¹⁰ Um 500 lx am Auge (= vertikale Beleuchtungsstärke) zu erzeugen, muss auf üblichen von oben beleuchteten Arbeitsplätzen eine horizontale Beleuchtungsstärke von etwa 900 lx bis 1 500 lx vorliegen.

Tabelle 2: Risikogruppen nach DIN EN 62471.

Lampen- gruppe	Risiko- gruppe	Beschreibung
Freie Gruppe (kein Risiko)	RG0 „exempt“	Sind unter allen Umständen sicher.
Risikogruppe 1 (Risiko gering)	RG1 „low risk“	Sind aufgrund von normalen Einschränkungen durch das Verhalten der Personen sicher.
Risikogruppe 2 (Risiko mittel)	RG2 „mod risk“	Sind sicher, solange Abwendungsreaktionen wegen Blendung oder thermischen Unbehagens die Expositionsdauer begrenzen.
Risikogruppe 3 (Risiko hoch)	RG3 „high risk“	Sind auch bei kurzzeitiger Exposition gefährlich.

3.2 Photothermische Schädigung

Von photothermischen Schädigungen können alle Teile des Auges betroffen sein. Sie entstehen durch zu starke Erwärmung des jeweiligen Gewebes. Bis 1976 ging man davon aus, dass ein zu langer Blick in die Sonne eine thermische Netzhautschädigung hervorruft. In einer Studie von Ham et al. [17] konnte aber gezeigt werden, dass die Sonne eine chemische Schädigung in der Netzhaut bewirkt und keine thermische. Die Erwärmung der Netzhaut nach 1 Std. unverändertem, ungeschütztem Blick in die Sonne beträgt nur rund 1,5 °C, für eine Schädigung wären 10 °C notwendig [18]. Seit dieser Studie hat sich bis heute die Erkenntnis durchgesetzt, dass eine photochemische Schädigung unabhängig von einer photothermischen Schädigung der Netzhaut zu beachten ist (siehe Kap. 3.3).

- Bei der spektralen Wirkungsfunktion $R(\lambda)$ für die thermische Netzhautgefährdung (siehe Abbildung 3 rechts) ist diese Trennung aber offenbar nicht vollzogen worden: Die Überhöhung zwischen 400 nm und 500 nm ist eigentlich der photochemischen Schädigung geschuldet, nicht der photothermischen. Daher können unter Umständen Quellen (z. B. High-Power-LEDs) mit Strahlung in diesem Wellenlängenbereich

in die Risikogruppe 3 gelangen, obwohl keine thermische Gefährdung vorliegt¹¹. Außer in bekannten Sonderfällen (z. B. Suchscheinwerfer oder Projektoren mit 20 kW Xenonhöchst-Druck-Bogenlampen, Hochleistungslaser, Bogenschweißen) sind photothermische Schädigungen der Netzhaut am Arbeitsplatz nicht zu erwarten [16].

Da der Organismus mittels Schutzmechanismen (z. B. Lidschluss nach ca. 0,15 s bis 0,25 s oder Blickabwendung), Reparatur- und Erneuerungsprozessen oder Wärmeableitung den Veränderungen entgegenwirkt, besteht bei thermischen Grenzwerten kein einfacher linearer Zusammenhang mit der Einwirkungsdauer t . Die Möglichkeit zur Wärmeableitung wird zudem durch die Größe der bestrahlten Fläche beeinflusst. Wenn eine Quelle IR-Anteile, aber kein sichtbares Licht enthält, gelten gesonderte Grenzwerte, da dann weder Pupillenlichtreflex noch Blickabwendung stattfinden.

- All dies macht eine thermische Bewertung der Netzhautbelastung am Arbeitsplatz schwierig, ist aber wie erwähnt nur in Ausnahmefällen und nicht auf Grund der Allgemeinbeleuchtung oder des Lichts von Bildschirmen notwendig.

3.3 UV-Schädigung des äußeren Auges

- Eine ältere Untersuchung von Bergmann et al. [19] zeigt, dass die UV-Strahlung von klassischen Lampen, die für Beleuchtungszwecke verwendet werden, sogar bei hohen Beleuchtungsstärken von 500 lx¹² am Auge unbedenklich ist. Am kritischsten sind Quarz-Halogenglühlampen, die aber nicht ohne UV-absorbierendes Schutzglas in Betrieb genommen werden sollten. Die Unbedenklichkeit gilt auch für heute an Arbeitsplätzen verwendete LED-Beleuchtungen, da diese keine UV-Strahlung enthalten. Welche UV-bewerteten Bestrahlungsstärken die wenig verbreiteten weißen LEDs aufweisen, die mit UV statt mit blau angeregtem Leuchtstoff arbeiten, müssen bei Bedarf zukünftige Untersuchungen feststellen.

3.4 Photochemische Blaulichtschädigung der Netzhaut

Die Blaulicht-Netzhautschädigung (Photoretinopathie) oder kurz Blaulichtschädigung, englisch Blue-Light-Hazard, abgekürzt „BLH“, ist eine direkte photochemische

¹¹ Das bedeutet auch nicht notwendigerweise, dass für Blaulichtgefährdung RG3 vorliegt: Die Überhöhung von $R(\lambda)$ ist um den Faktor 10 größer als von $B(\lambda)$ – und dies wird mit den Grenzwerten nicht vollständig kompensiert.

¹² Um 500 lx am Auge (= vertikale Beleuchtungsstärke) zu erzeugen, muss auf üblichen von oben beleuchteten Arbeitsplätzen eine horizontale Beleuchtungsstärke von etwa 900 lx bis 1 500 lx vorliegen.

Schädigung, bei der photoinstabile Moleküle in der Netzhaut durch Licht mit kurzwelligem Spektralanteilen verändert werden. In ihrer Funktion oder sogar durch Zerstörung beeinträchtigt werden dadurch Zellen des retinalen Pigmentepithels RPE (vgl. Abbildung 6) und der Photorezeptoren. BLH entsteht bei relativ hohen Intensitäten und kurzen Expositionszeiten (Minuten, Stunden). Dies im Gegensatz zum möglichen Lichteinfluss auf die altersbedingte Makuladegeneration AMD, mit über Jahre hinweg kumulierten geringen Intensitäten (siehe Kap. 3.5).

Je länger eine Stelle der Netzhaut bestrahlt wird, desto größer ist dort das Risiko für eine Schädigung. Im Alltag werden aber die Augen und/oder der Kopf nach kurzer Zeit so weit bewegt, dass die Bestrahlung dieser Netzhautstelle unterbrochen und dafür eine andere Stelle belastet wird. Daher gibt es keine einfache umgekehrte Proportionalität zwischen Expositionsdauer und Strahldichtegrenzwert. In den Messnormen wird dies durch eine Vergrößerung des Messwinkels mit zunehmender Expositionszeit berücksichtigt. Dabei kann der Messwinkel auch größer sein als die Strahlungsquelle.

Gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EG darf die BLH-bewertete Strahldichtedosis den Basisgrenzwert von $1 \text{ MW} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ nicht überschreiten [14]. Grundlage dieser Grenzwerte ist u. a. die Studie von Ham et. al. [17] an Affen (Makaken) und Hochheimer et al. [20] an Kaninchen. Die Bestrahlungsstärken mit den kleinsten Läsionen, die 24 h nach der Bestrahlung auf der Netzhaut sichtbar wurden, dienten als Schwellenwerte. Zwischen Schwellenwert und Grenzwert der EU-Richtlinie liegt ein Sicherheitsfaktor von mindestens 2, maximal 100 [8].

- Grundsätzlich kann bei weißen, gleich großen Lichtquellen gleicher Farbtemperatur davon ausgegangen werden, dass sie bezüglich Blaulicht-Schädigung eine vergleichbare Wirkung haben – z. B. eine warmweiße LED und eine Glühlampenwendel. Wie Abbildung 4 zeigt, ist eine Schädigung des Auges bei am Arbeitsplatz üblichen Leuchtdichten unter üblichen Beleuchtungsbedingungen nicht möglich¹³. Eine Expositionsdauer von 100 s bei kleinen Lichtquellen (z. B. Glühwendel, einzelne LED) wäre der unwahrscheinliche Fall, dass Beschäftigte 100 s lang mit unbewegtem Blick in dieselbe Richtung starren. Bei großen Lichtquellen sind die Leuchtdichten generell geringer. Auch weiße LEDs mit erhöhtem Anteil im blauen Bereich des Spektrums sind bezüglich BLH ungefährlich; das gilt auch für Bildschirme [21].
- Für schmalbandige farbige LEDs ist in Abbildung 5 das entsprechende Diagramm dargestellt. Am kritischsten sind blaue LEDs im kurzwelligen Bereich. Allerdings

¹³ Bei LEDs zeigt der strichlierte Bereich in RG2 Typen für Sonderanwendungen, z. B. für Bühnenscheinwerfer.

weisen diese geringe Leuchtdichten auf, da die spektrale Hellempfindlichkeit¹⁴ dort ebenfalls gering ist.

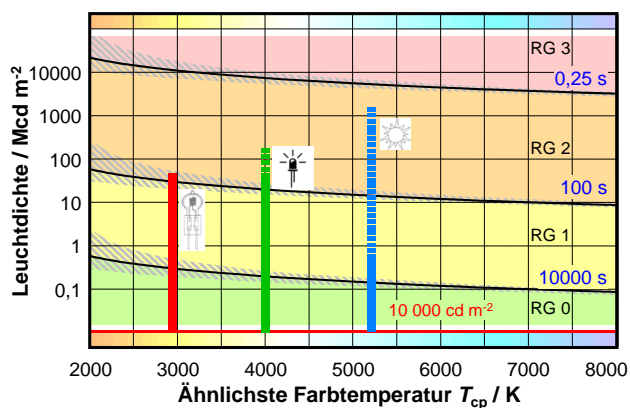


Abbildung 4: Maximale Dauer für fixierten Blick (Zahlen rechts, in blau) zur Vermeidung von Blaulicht-Schädigung durch weiße inkohärente Lichtquellen für gegebene Leuchtdichte (y-Achse) und gegebene ähnlichste Farbtemperatur (x-Achse). Die rote Linie kennzeichnet die Leuchtdichte $10\,000\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ unterhalb derer die Lichtquelle als sicher gilt. Vertikale Balken: Bereich der Lichtquellen Halogenglühlampe (rot), neutralweiße LEDs (grün) und Sonne (blau). RG: Risikogruppen nach DIN EN 62471 [13]; grau schraffiert: Streubereich.

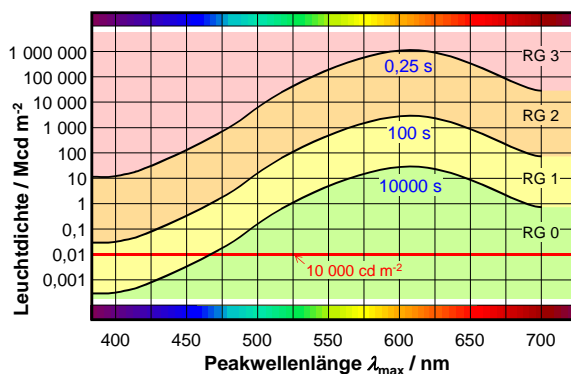


Abbildung 5: Maximale Dauer für fixierten Blick (Zahlen Mitte-rechts, in blau) zur Vermeidung von Blaulicht-Schädigung durch farbige LEDs (Halbwertsbreite 20...30 nm) für gegebene Leuchtdichte (y-Achse) und gegebene Peakwellenlänge (x-Achse). Die rote Linie kennzeichnet die Leuchtdichte

¹⁴ Die spektrale Hellempfindlichkeit ist die spektrale Wirkungsfunktion der Photometrie, die der Leuchtdichte zu Grunde liegt.

10 000 cd · m⁻² unterhalb derer farbige LEDs mit $\lambda_{\max} > 470$ nm als sicher gelten.
RG: Risikogruppen nach DIN EN 62471 [13].

3.5 Altersbedingte Makuladegeneration (AMD)

Photochemische Blaulichtschädigung entsteht bei relativ kurzen Expositionszeiten. Als Folge einer Blaulicht-Netzhautschädigung können Photorezeptoren absterben. Die durch Lichteinwirkung veränderten chemischen Prozesse können aber längerfristig auch zur Entstehung der *altersbedingten Makuladegeneration (AMD)* beitragen [22]. Diese Sehbeeinträchtigung des zentralen Gesichtsfeldes beginnt ab einem Alter von etwa 50; etwa ein Viertel der Bevölkerung mit Alter über 65 ist davon betroffen. Sie ist eine Erkrankung der Photorezeptoren, des retinalen Pigmentepithels, der Bruch-Membran und der Aderhaut (siehe Abbildung 6). Das retinale Pigmentepithel (RPE) ist an der Regeneration der Photopigmente beteiligt, die in den Photorezeptoren infolge absorbierter Lichtquanten den Sehprozess in Gang setzten und dadurch „verbraucht“ wurden. Bestimmte Zellorganellen, sogenannte Lysosomen, beseitigen die bei dieser Regeneration entstandenen Abbauprodukte im RPE.

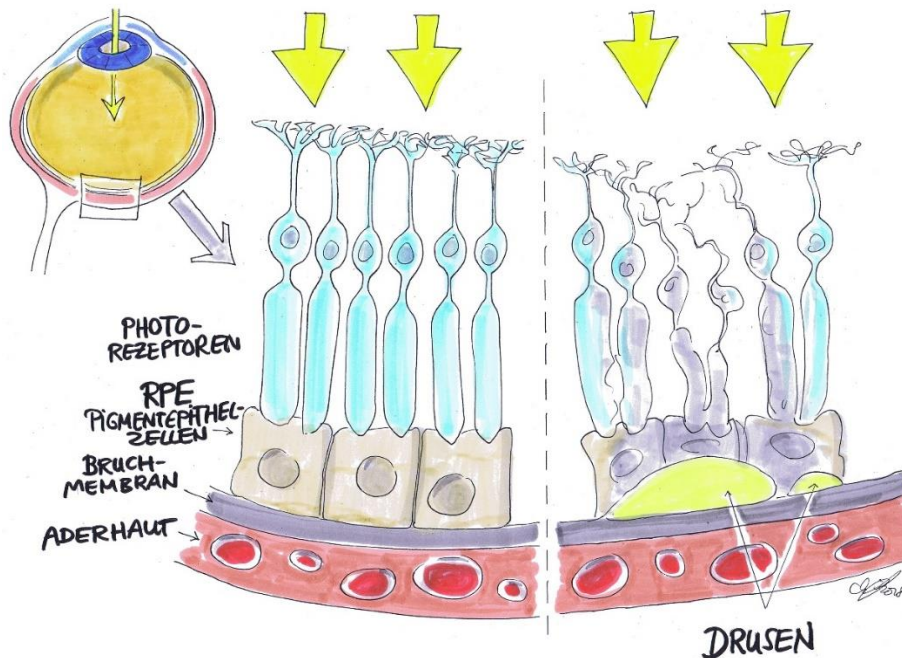


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Netzhaut. Das von oben einstrahlende Licht gelangt durch neuronale Schichten auf die Photorezeptoren (Zapfen und Stäbchen), dann zum retinalen Pigmentepithel RPE. Die Bruch-Membran trennt die Aderhaut vom RPE, eine Art Verlängerung der Blut-Hirn-Schranke. Bei der trockenen AMD entstehen Drusen zwischen den Pigmentepithelzellen und der

Bruch-Membran. Sie kann sich zur feuchten AMD entwickeln, bei der sich neue, brüchige Blutgefäße durch die Bruch-Membran hindurch bilden, aus denen Flüssigkeit und schädigende Blut- und Entzündungszellen austreten (Bild: Michael Hüter).

Klinisch ist eine beginnende AMD daran erkennbar, dass sich sogenannte Drusen zwischen dem RPE und der Bruch-Membran bilden – das sind Materialablagerungen außerhalb der RPE-Zellen (Abbildung 6). Die Bildung von Drusen wird unter anderem durch die Anwesenheit des Abbauprodukts Lipofuscin begünstigt, einer Sammlung verschiedener Biomoleküle in den Lysosomen der RPE-Zellen, die zum Teil fluoreszierend sind. Mit zunehmendem Alter findet eine nahezu lineare Zunahme von Lipofuscin in Form von Granulaten statt [23] [24], weshalb sie auch „Alterspigment“ genannt werden. Lipofuscin, insbesondere sein Bestandteil A2E, ist potentiell schädlich, da es als Photosensibilisator wirkt und bei Licht mit blauen Spektralanteilen freie Radikale innerhalb des RPE erzeugt [25]. Der von den Radikalen ausgeübte oxidative Stress kann Moleküle verändern und damit retinale Pigmentepithelzellen zerstören, was auch eine Schädigung der Rezeptoren zur Folge hat.

Das Biomolekül A2E des Lipofuscins ist ein Abbauprodukt aus den Stäbchen. A2E hindert neben seiner phototoxischen Wirkung auch die Lysosomen daran, einige der Abbauprodukte des Sehprozesses zu beseitigen, was die Entstehung von Drusen zusätzlich begünstigt [26]. Durch die altersabhängige Zunahme von Lipofuscin steigt auch das Risiko für Schäden durch kurzwelliges Licht mit zunehmendem Alter. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Augenlinse durch Vergilbung mit zunehmendem Alter für diesen Spektralbereich eine immer geringe Transmission aufweist [7]. Diese „Schutzwirkung“ kann nach einer Katarakt-Operation (grauer Star) mit Intraokularlinsen teilweise wieder aufgehoben sein. Neben dem Alter sind unter anderem auch Rauchen, genetische Veranlagung und hoher Blutdruck weitere Risikofaktoren für AMD.

An Zellkulturen konnte gezeigt werden, dass bei erhöhter A2E-Konzentration Licht mit Wellenlängen zwischen 415 nm und 455 nm zu Veränderungen in den RPE-Zellen führt [27]. Möglicherweise sind weitere Lipofuscin-Bestandteile mit anderen Wirkungsspektren beteiligt, die sich aber ebenfalls im Bereich < 455 nm (blau-violett) befinden [28]. Bei einem klinischen Versuch mit blau-violett abblockenden Brillengläsern konnte ein gewisser Therapieerfolg nachgewiesen werden [29]¹⁵. Durch Bestrahlung von Kulturen menschlicher RPE-Zellen mit blauem Bildschirmlicht zeigte sich bei 449 nm eine deutliche, bei 458 nm eine statistisch signifikante und

¹⁵ Der Artikel beschreibt die Untersuchung nur unvollständig. Insbesondere fehlen Angaben über die Therapiedauer, die genauen spektralen Eigenschaften der Brillengläser und die Lichtexposition.

bei 470 nm keine Erhöhung von reaktivem Sauerstoff bzw. Abnahme der Überlebensfähigkeit [30]. Es gibt Hinweise aus einer epidemiologischen Studie, dass die Entwicklung von AMD mit einer vermehrten Sonnenlichtexposition in jungen Jahren verbunden ist [31].

Da bei Zellkulturen einige Reparatur- und Erneuerungsprozesse eines lebenden Organismus ausgeschaltet sind, bleibt unklar, wie weit eine Langzeitexposition von kurzwelligem Licht zur Erkrankung an AMD beiträgt. Auch klinische Therapieerfolge geben zwar Aussagen zur Lichtwirkung bei erkrankten Personen, nicht aber zur Entstehung der Krankheit. Insbesondere offen bleibt die Frage der Dosis-Wirkungs-Beziehung. Solange Reparatur- und Erneuerungsprozesse einer toxischen Belastung entgegenwirken können, ist diese nicht als gefährlich einzustufen. Erst bei Überschreiten einer Wirkungsschwelle entsteht ein Risiko für Erkrankung. Dennoch besteht die übereinstimmende Ansicht, dass die kumulative Lichtexposition während des Lebens für die Entstehung der AMD mitverantwortlich ist.

Wie vereinzelt berichtete Erfolge der sogenannten *Photobiomodulation* zeigen, scheint die Bestrahlung aus dem roten und nahen Infrarotbereich (NIR) der Entwicklung von AMD entgegen zu wirken. Das würde auch erklären, warum Sonnenlicht unbedenklicher ist als Strahlung mit gleichen Anteilen monochromatischen violett-blauen Lichts. Die rote bzw. NIR-Strahlung wirkt nicht thermisch, sondern über die Absorption im Protein Cytochrom-C-Oxidase (COX), einem Teilkomplex der Atmungskette in den Mitochondrien der RPE-Zellen. Ein Wirkungsspektrum, mit vier Maxima bei ca. 620, 675, 760 und 830 nm, gibt [32]. Die Atmungskette reduziert Sauerstoff und wirkt dadurch dem oxidativen Stress in den Zellen entgegen.

Bei Bestrahlung von menschlichen RPE-Zellen durch rote LEDs mit 670 nm wurden Abbauprodukte in den Zellen verstärkt entfernt [33]. Ebenso konnten in einer Studie bei Patienten mit trockener AMD durch Bestrahlung mit einer Kombination von rotem LED-Licht der Wellenlängen 590, 670 und 790 nm die Drusen in ihrer Größe reduziert werden [34]. Zudem wurde die Sehleistung wieder verbessert. Letzteres zeigte sich auch bei Patienten mit feuchter AMD durch Bestrahlung mit 780 nm aus einer Laserdiode [35]. Die Bestrahlung bei Ratten durch rote LEDs mit 670 nm führte zu einem Schutz vor Netzhautdegeneration (Entzündung und Zelltod) durch starkes „Weißlicht“, unabhängig davon, ob das rote Licht vor oder während der Weißlichtexposition angewandt wurde [36][37]. Auch zeigte sich eine Heilungswirkung bei Anwendung von rotem Licht danach. Eine kanadische Studie zur Behandlung von AMD mit Photobiomodulation läuft derzeit – die Datenerhebung ist bis April 2018 vorgesehen (siehe hier: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT02725762>).

- Inwieweit eine Beleuchtung am Arbeitsplatz die Entstehung von AMD begünstigt, ist noch unklar. Auf das Problem der fehlenden Dosis-Wirkungs-Beziehung und der fehlenden Kenntnis einer Wirkungsschwelle wurde schon hingewiesen. Dazu kommt die Problematik, dass Wirkungsspektren erst an Zellkulturen und Tiermodellen bestimmt wurden. Auch können an Patienten entwickelte Therapiekonzepte nicht einfach auf Beleuchtungskonzepte für gesunde Menschen am Arbeitsplatz übertragen werden. Zudem wären die am Arbeitsplatz üblichen spektral aufgelösten Expositionen erst einmal zu quantifizieren.
- Dennoch könnte bereits jetzt eine Forderung im Sinne der betrieblichen Vorsorge gegen AMD diskutiert werden, die unterbindet, dass Strahlung mit Wellenlängen < 460 nm gefördert und mit Wellenlängen ≥ 600 nm gemieden wird. Nichtvisuelle Lichtwirkungen zu fördern bleibt dennoch möglich, da diese ihr Wirkungsmaximum bei 490 nm haben [3]. Es muss aber beachtet werden, dass hier nur eine von vielen möglichen Strahlungswirkungen behandelt wurde. So könnte auch blaues Licht < 450 nm gesundheitliche Vorteile haben, wie etwa Erfolge bei Dermatitis-Behandlung andeuten [38].
- Zu hinterfragen ist die Verwendung der Lichtausbeute in Lumen/Watt als Effizienzgröße, da damit bei effizienzoptimierter Lichtquellenentwicklung Wellenlängen > 600 nm als ineffizient vermieden werden. Ob weiße LEDs mit Peak-Wellenlängen < 460 nm mit Strahlung der Wellenlängen > 600 nm ergänzt werden müssten (was es bei LEDs mit hohem R9-Farbwiedergabewert bereits gibt), kann wohl erst bei Kenntnis der Wirkungsspektren entschieden werden, denn vielleicht genügt ja der in leuchtstoffkonvertierten LEDs bereits vorhandene Rotanteil zur Kompensation des Blauanteils.

4 Schlussfolgerung

Wenn man die Empfehlungen der deutschen Strahlenschutzkommission zur Beurteilung von wissenschaftlichen Zusammenhängen bezüglich elektromagnetischer Felder [39] auf die Situation von nichtvisuell wirksamem Licht überträgt, ergeben sich folgende drei Stufen wissenschaftlicher „Gesicherheit“:

- **Wissenschaftlich nachgewiesen** ist ein Zusammenhang zwischen einer Gesundheitsbeeinträchtigung und nichtvisuell wirkendem Licht, wenn wissenschaftliche Studien voneinander unabhängiger Forschungsgruppen diesen Zusammenhang reproduzierbar zeigen und das wissenschaftliche Gesamtbild das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs stützt.
- Ein **wissenschaftlich begründeter Verdacht** auf einen Zusammenhang zwischen einer Gesundheitsbeeinträchtigung und nichtvisuell wirkendem

Licht liegt vor, wenn die Ergebnisse bestätigter wissenschaftlicher Untersuchungen einen Zusammenhang zeigen, aber die Gesamtheit der wissenschaftlichen Untersuchungen das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs nicht ausreichend stützt. Das Ausmaß des wissenschaftlichen Verdachts richtet sich nach der Anzahl und der Konsistenz der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeiten.

- **Wissenschaftliche Hinweise** liegen vor, wenn einzelne Untersuchungen, die auf einen Zusammenhang zwischen einer Gesundheitsbeeinträchtigung und nichtvisuell wirkendem Licht hinweisen, nicht durch voneinander unabhängige Untersuchungen bestätigt sind und durch das wissenschaftliche Gesamtbild nicht gestützt werden.

- Die Frage, wie gesichert arbeitsschutzrelevante Erkenntnisse über nichtvisuelle Wirkungen von Licht auf den Menschen zurzeit sind, kann auf Grund der Literaturstudie und der Ergänzungen in diesem Gutachten wie folgt beantwortet werden: Bei Licht in der Nacht besteht ein wissenschaftlich begründeter Verdacht und bei Licht am Tag liegen wissenschaftliche Hinweise vor, dass es am Arbeitsplatz die Gesundheit beeinträchtigen kann. Ein wissenschaftlicher Nachweis liegt aber derzeit nicht vor. Es sollte aber nicht vergessen werden, dass es zudem die visuellen Wirkungen gibt, die über physiologische und psychologische Pfade von gesundheitlicher Relevanz sein können.
- Es ist wissenschaftlich gesichert, dass eine Blaulichtschädigung der Augennetzhaut durch die übliche Beleuchtung am Arbeitsplatz (auch mit LED-Leuchten) nicht auftritt. Diesbezüglich unbedenklich ist auch das Licht von Bildschirmgeräten [21].
- Zur altersbedingten Makuladegeneration (AMD) gibt es erste wissenschaftliche und therapeutische Hinweise, dass blaue Spektralanteile eine negative und rote eine positive Wirkung auf den Krankheitsverlauf haben können. Sollten sich diese Hinweise in weiteren Studien bestätigen, werden – wie in Kap. 3.5 dargestellt – die in der Beleuchtungstechnik verwendeten Effizienzmaße wie z. B. die Lichtausbeute in $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ fragwürdig.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Smith, Kendric C. (2005): Laser (and LED) therapy is phototherapy. Letter to the Editor. In: Photomed. Laser Surg. 23 (1), S. 78–80. DOI: 10.1089/pho.2005.23.78

- [2] Rothert, I.; Saathoff, B.; Völker, S. (2017): Können dynamische Lichtwechsel des Beleuchtungsniveaus und der spektralen Verteilung die Aufmerksamkeit steigern? 13 Lux junior, 8. bis 10. 9. 2017 Dörnfeld/Ilm.
- [3] 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. Beuth Verlag, Berlin.
- [4] Rahman, Shadab A.; Shapiro, Colin M.; Wang, Flora; Ainlay, Hailey; Kazmi, Syeda; Brown, Theodore J.; Casper, Robert F. (2013): Effects of filtering visual short wavelengths during nocturnal shiftwork on sleep and performance. In: Chronobiology international 30 (8), S. 951–962.
DOI: 10.3109/07420528.2013.789894
- [5] Schierz, Ch. (2002): Leben wir in der biologischen Dunkelheit? Tagungsband der Licht 2002; 22.-25. Sept. 2002 in Maastricht; S. 381–389.
- [6] Geeraets, Walter J.; Berry, Edward R. (1968): Ocular spectral characteristics as related to hazards from lasers and other light sources. In: Am. J. Ophthalmol. 66 (1), S. 15–20.
DOI: 10.1016/0002-9394(68)91780-7
- [7] Van de Kraats, Jan; van Norren, Dirk (2007): Optical density of the aging human ocular media in the visible and the UV. In: J. Opt. Soc. Am. A 24 (7), S. 1842–1857.
DOI: 10.1364/JOSAA.24.001842
- [8] ICNIRP (2013): Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Health Physics 105 (1), S.74–96.
DOI: 10.1097/HP.0b013e318289a611
- [9] Sasseville, Alexandre; Martin, Jeanne Sophie; Houle, Jérôme; Hébert, Marc (2015): Investigating the contribution of short wavelengths in the alerting effect of bright light. In: Physiol. Behav. 151, S. 81–87. DOI: 10.1016/j.physbeh.2015.06.028
- [10] McIntyre, Iain M.; Norman, Trevor R.; Burrows, Graham D.; Armstrong, Stuart M. (1989): Quantal melatonin suppression by exposure to low intensity light in man. In: Life Sci. 45 (4), S. 327–332.
DOI: 10.1016/0024-3205(89)90142-2
- [11] Hubalek, Sylvia; Zöschg, Dietmar; Schierz, Christoph (2006): Ambulant recording of light for vision and non-visual biological effects. In: Light. Res.

- Technol. 38 (4), S. 314–321.
DOI: 10.1177/1477153506070687
- [12] CIE (2014): Relating photochemical and photobiological quantities to photometric quantities.
CIE Technical Note 002:2014. www.cie.co.at/index.php/Publications/index.php?i_ca_id=963
- [13] DIN EN 62471 (2009): Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen.
- [14] EU (2006): Richtlinie 2006/25/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung).
- [15] Schierz, Ch. (2017): Winkelabhängige Netzhautbelastung durch die Strahlung von Bühnenscheinwerfern. Fachexpertise der TU Ilmenau im Auftrag der Verwaltungs-Berufsgenossenschaft.
- [16] Sliney, D. H.; Bergman, R.; O'Hagan, J. (2016): Photobiological risk classification of lamps and lamp systems – history and rationale. LEUKOS, 12 (4), S. 213-234.
DOI: 10.1080/15502724.2016.1145551
- [17] Ham, William T.; Mueller, Harold A.; Sliney, David H. (1976): Retinal sensitivity to damage from short wavelength light. In: Nature 260 (5547), S. 153–155. DOI: 10.1038/260153a0
- [18] Clarke, A. M.; Geeraets, W. J.; Ham, W. T. (1969): An equilibrium thermal model for retinal injury from optical sources. In: Appl. Opt. 8 (5), S. 1051–1054. DOI: 10.1364/AO.8.001051
- [19] Bergman, R. S.; Parham, T. G.; McGowan, T. K. (1995): UV emission from general lighting lamps. In: J. Illum. Eng. Soc. 24 (1), S. 13–24. DOI: 10.1080/00994480.1995.10748092
- [20] Hochheimer, B. F.; Lutty, G. A.; D'Anna, S. A. (1987): Ocular fluorescein phototoxicity. In: Appl. Opt. 26 (8), S. 1473–1479. DOI: 10.1364/AO.26.001473
- [21] Schierz, Ch. (2015): Fachexpertise zu Bildschirmen: Gibt es Gefährdungen der Netzhaut durch LED-hinterleuchtete Monitore? Licht 67(10), S. 88-91.

- [22] Wu, Jiangmei; Seregard, Stefan; Algvere, Peep V. (2006): Photochemical damage of the retina. In: *Surv Ophthalmol* 51 (5), S. 461–481. DOI: 10.1016/j.survophthal.2006.06.009
- [23] WVAO (2012): Die Wissenschaft der AMD Forschung. Patienten-Broschüre der Wissenschaftlichen Vereinigung für Augenoptik und Optometrie (WVAO) e.V., Mainz.
- [24] Delori, François C.; Goger, Douglas G.; Dorey, C. Kathleen (2001): Age-related accumulation and spatial distribution of lipofuscin in RPE of normal subjects. In: *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 42 (8), S. 1855–1866.
- [25] Sparrow, Janet R.; Nakanishi, Koji; Parish, Craig A. (2000): The Lipofuscin fluorophore A2E mediates blue light-induced damage to retinal pigmented epithelial cells. In: *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 41 (7), S. 1981–1989.
- [26] Finnemann, Silvia C.; Leung, Lawrence W.; Rodriguez-Boulan, Enrique (2002): The lipofuscin component A2E selectively inhibits phagolysosomal degradation of photoreceptor phospholipid by the retinal pigment epithelium. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (6), S. 3842–3847. DOI: 10.1073/pnas.052025899
- [27] Arnault, Emilie; Barrau, Coralie; Nanteau, Céline; Gondouin, Pauline; Bigot, Karine; Viénot, Françoise et al. (2013): Phototoxic action spectrum on a retinal pigment epithelium model of age-related macular degeneration exposed to sunlight normalized conditions. In: *PloS one* 8 (8), e71398. DOI: 10.1371/journal.pone.0071398
- [28] Pawlak, Anna; Rózanowska, Małgorzata; Zareba, Mariusz; Lamb, Laura E.; Simon, John D.; Sarna, Tadeusz (2002): Action spectra for the photoconsumption of oxygen by human ocular lipofuscin and lipofuscin extracts. In: *Archives of Biochemistry and Biophysics* 403 (1), S. 59–62. DOI: 10.1016/S0003-9861(02)00260-6
- [29] Colombo, L.; Melardi, E.; Ferri, P.; Montesano, G.; Samir Attaalla, S.; Pattelli, F. et al. (2017): Visual function improvement using photocromic and selective blue-violet light filtering spectacle lenses in patients affected by retinal diseases. In: *BMC ophthalmology* 17 (1), S. 149. DOI: 10.1186/s12886-017-0545-9
- [30] Moon, Jiyoung; Yun, Jieun; Yoon, Yeo Dae; Park, Sang-Il; Seo, Young-Jun; Park, Won-Sang et al. (2017): Blue light effect on retinal pigment epithelial cells by display devices. In: *Integrative biology: quantitative biosciences from nano to macro* 9 (5), S. 436–443. DOI: 10.1039/c7ib00032d

- [31] Cruickshanks, Karen J.; Klein, Ronald; Klein, Barbara E. K.; Nondahl, David M. (2001): Sunlight and the 5-year incidence of early age-related maculopathy. The Beaver Dam Eye Study. In: *Arch Ophthalmol* 119 (2), S. 246–250.
- [32] Karu, T. I.; Kolyakov, S. F. (2005): Exact action spectra for cellular responses relevant to phototherapy. In: *Photomed. Laser Surg.* 23 (4), S. 355–361. DOI: 10.1089/pho.2005.23.355
- [33] Fuma, Shinichiro; Murase, Hiromi; Kuse, Yoshiki; Tsuruma, Kazuhiro; Shimazawa, Masamitsu; Hara, Hideaki (2015): Photobiomodulation with 670 nm light increased phagocytosis in human retinal pigment epithelial cells. In: *Molecular Vision* 21, S. 883–892.
- [34] Merry, Graham F.; Munk, Marion R.; Dotson, Robert S.; Walker, Michael G.; Devenyi, Robert G. (2017): Photobiomodulation reduces drusen volume and improves visual acuity and contrast sensitivity in dry age-related macular degeneration. In: *Acta Ophthalmol.* 95 (4), e270-e277. DOI: 10.1111/aos.13354
- [35] Ivandic, Boris T.; Ivandic, Tomislav (2008): Low-level laser therapy improves vision in patients with age-related macular degeneration. In: *Photomed. Laser Surg.* 26 (3), S. 241–245. DOI: 10.1089/pho.2007.2132
- [36] Albarracin, Rizalyn; Eells, Janis; Valter, Krisztina (2011): Photobiomodulation protects the retina from light-induced photoreceptor degeneration. In: *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 52 (6), S. 3582–3592. DOI: 10.1167/iovs.10-6664
- [37] Chu-Tan, Joshua A.; Rutar, Matt; Saxena, Kartik; Wu, Yunlu; Howitt, Lauren; Valter, Krisztina et al. (2016): Efficacy of 670 nm light therapy to protect against photoreceptor cell death is dependent on the severity of damage. In: *International Journal of Photoenergy* 2016, S. 1–12. DOI: 10.1155/2016/2734139
- [38] Becker, Detlef; Langer, Elise; Seemann, Martin; Seemann, Gunda; Fell, Isabel; Saloga, Joachim et al. (2011): Clinical efficacy of blue light full body irradiation as treatment option for severe atopic dermatitis. In: *PloS one* 6 (6), e20566. DOI: 10.1371/journal.pone.0020566

- [39] SSK (2001): Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. Redaktion: M. Grunst; Urban & Fischer. München. ISBN 3-437-21527-2