

# **Abschlussbericht zum Forschungsprojekt Licht und Schicht (FP-0444)**

Interventionsstudie zu kurz- und langzeitlichen gesundheitlichen Auswirkungen von dynamischer Beleuchtung am Arbeitsplatz und individualisierten, handybasierten Lichtempfehlungen bei Schichtarbeitern

***Laufzeit***

**01.02.2020 – 29.02.2024**

**Bericht vom 18.07.2024**

Sylvia Rabstein<sup>1</sup>, Robert Herold<sup>2</sup>, Karin Bieske<sup>3</sup>, Sarah Affolderbach<sup>2</sup>, Katrin Rieger<sup>1,2</sup>, Lukas Simon Damerau<sup>2</sup>, Katarzyna Burek<sup>1</sup>, Sophie Schümann<sup>2</sup>, Christoph Schierz<sup>3</sup>, Dirk Pallapies<sup>1</sup>, Thomas Behrens<sup>1</sup>, Thomas Brüning<sup>1</sup>, Volker Harth<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Institut der Ruhr-Universität Bochum (IPA), Bürkle-de-la-Camp-Platz 1, 44789 Bochum

<sup>2</sup> Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (ZfAM), Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE), Seewartenstr. 10, Haus 1, 20459 Hamburg

<sup>3</sup> Technische Universität Ilmenau (TU Ilmenau), Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Lichttechnik, Professor-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	VI
Abstract .....	VII
1 Problemstellung.....	1
1.1    Licht als gesundheitsrelevanter Faktor.....	2
1.2    Gestaltung der Beleuchtung bei Schichtarbeit .....	3
2 Forschungsziele .....	5
3 Methodik.....	7
3.1    Studiendesign .....	7
3.1.1    Kollektiv .....	7
3.1.2    Rekrutierung .....	8
3.1.3    Forschungsbegleitkreis .....	8
3.1.4    Zeitplan und Änderungen im Studienverlauf .....	9
3.1.5    Arbeitspakete.....	9
3.1.6    Ethik und Datenschutz .....	10
3.2    Entwicklung der Beleuchtungsinterventionen.....	10
3.2.1    Charakterisierung der Beleuchtungsverhältnisse in den Versuchshallen .....	10
3.2.1.1    Grundlagen.....	10
3.2.1.2    Versuchshallen, Beleuchtungsanlage und Steuerung .....	10
3.2.1.3    Messkonzept und Basismessungen.....	12
3.2.1.4    Ergebnisse der Basismessungen.....	13
3.2.2    Pilotstudien .....	13
3.2.2.1    Konzept .....	14
3.2.2.2    Methoden .....	15
3.2.2.3    Ergebnisse.....	16
3.2.3    Festlegung der Steuerung für die Lichtintervention .....	18
3.2.3.1    Lichtintervention am Tag (Halle 1) .....	18
3.2.3.2    Lichtintervention in der Nacht (Halle 2) .....	18
3.2.4    Beleuchtungsempfehlungen für die Freizeit (Lighting-Habits-Intervention).....	20
3.2.4.1    Empfehlungen nach Schichtsystem .....	21
3.2.4.2    Auswahl der Materialien für die Lighting-Habits-Intervention.....	22
3.2.4.3    Entwicklung der Software für Studienhandys und Einbindung von Empfehlungsprompts für das individuelle Freizeitverhalten.....	23
3.3    Studieninstrumente und statistische Analysen .....	23
3.3.1    Rekrutierung und Studienpopulation .....	23
3.3.1.1    Auswirkungen von SARS-CoV2 und aktuellen Krisen.....	23

3.3.1.2	Nachrekrutierung .....	23
3.3.1.3	Randomisierte Auswahl der Lighting-Habits-Gruppe.....	24
3.3.1.4	Einführung der Lighting-Habits-Intervention.....	24
3.3.2	Erhebung und Analyse der Schlafdauer.....	24
3.3.2.1	Untersuchung von Schlaf-Wach-Zyklen mittels Aktigraphie .....	24
3.3.2.2	Ableitung von Schlafzeiten, Plausibilitätsprüfung und Validierung der Tragezeiten.....	25
3.3.2.3	Ableitung der Schlafdauer bei mehreren Schlafepisoden, Schlaftypisierung und Chronotypisierung.....	25
3.3.2.4	Statistische Analyse.....	26
3.3.3	Testung der psychomotorischen Vigilanz.....	27
3.3.3.1	Durchführung der Testung der psychomotorischen Vigilanz .....	27
3.3.3.2	Statistische Analyse.....	28
3.3.4	Erhebung und Analyse der Schläfrigkeit .....	28
3.3.4.1	Einsatz der Mobilgeräte in den Feldphasen und Untersuchung der Schläfrigkeit nach Karolinska Sleepiness Scale (KSS).....	28
3.3.4.2	Statistische Analyse.....	29
3.3.5	Analyse von Melatonin und Cortisol im Speichel.....	29
3.3.5.1	Durchführung und Dokumentation der Speichelprobenahme mit den Studienhandys.....	29
3.3.5.2	Statistische Analyse.....	30
3.3.6	Analyse von Cortisol im Haar.....	30
3.3.6.1	Durchführung und Dokumentation der Haarprobenahme.....	30
3.3.6.2	Statistische Analyse.....	31
3.3.7	Analyse der individuellen Beleuchtungswahrnehmung.....	31
3.3.7.1	Durchführung und Dokumentation der Beleuchtungseinschätzung .....	31
3.3.7.2	Statistische Analyse.....	31
3.3.8	Qualitätssicherung .....	32
3.3.9	Begleitende lichttechnische Messungen während der Feldphasen .....	32
3.3.10	Analyse der Lighting-Habits-Intervention.....	33
3.3.10.1	Erhebung der Empfehlungs-Umsetzung mit Fragebögen und Studienhandys ..	33
3.3.10.2	Erhebung der Beleuchtung in der Freizeit durch individuelle Lichtmessung mit LightWatchern.....	33
3.3.10.3	Statistische Analyse.....	34
3.3.11	Übertragbarkeit auf andere Beleuchtungssysteme.....	34
3.3.11.1	Untersuchung im Laboraufbau.....	34
3.3.11.2	Simulation in DIALux .....	36

4 Ergebnisse des Gesamtvorhabens.....	37
4.1 Rekrutierung und Studienpopulation .....	37
4.2 Ergebnisse der Analyse der Schlafdauer .....	38
4.3 Ergebnisse der Analyse der psychomotorischen Vigilanz .....	39
4.4 Ergebnisse der Analyse der Schläfrigkeit.....	40
4.5 Ergebnisse der Analyse von Melatonin und Cortisol im Speichel .....	41
4.6 Ergebnisse der Analyse von Cortisol im Haar .....	42
4.7 Ergebnisse der Analyse der individuellen Beleuchtungswahrnehmung.....	43
4.8 Qualitätssicherung .....	44
4.9 Überprüfung der Stabilität der Beleuchtungsintervention .....	44
4.10 Ergebnisse der Analyse zur Umsetzung der Lighting-Habits-Intervention .....	45
4.11 Übertragbarkeit auf andere Beleuchtungssysteme.....	46
4.11.1 Untersuchung im Laboraufbau.....	46
4.11.2 Simulation in DIALux .....	47
5 Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen .....	48
5.1 Relevante Veröffentlichungen auf dem Forschungsgebiet seit Projektbeginn .....	48
5.2 Schutzrechtsanmeldungen .....	49
6 Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks und Schlussfolgerungen.....	50
6.1 Zusammenfassung .....	50
6.2 Limitationen .....	51
6.3 Allgemeine Einschätzung von Beleuchtung bei Schichtarbeit auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse .....	52
7 Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan .....	53
7.1 Bisherige Umsetzung der Forschungsergebnisse .....	53
7.2 Weiterer Umsetzungs- und Verwertungsplan.....	54
8 Anhänge.....	56
8.1 Literaturverzeichnis.....	57
8.2 Lichttechnisches Glossar .....	63
8.3 Symbole und Abkürzungen .....	65
8.4 Tabellenverzeichnis .....	67
8.5 Abbildungsverzeichnis .....	69
8.6 Tabellen und Abbildungen .....	71
8.7 Best Practice: Studienbegleitende lichttechnische Messungen .....	116
Danksagung .....	117

## Kurzfassung

**Ziele:** Licht ist der wichtigste Zeitgeber für die innere Uhr des Menschen. Wechselnde Licht-Tagesprofile bei Beschäftigten in Schichtarbeit können zu einer Desynchronisation der zirkadianen Rhythmen führen und gesundheitliche Faktoren beeinflussen. Ziel der Interventionsstudie Licht und Schicht war die Untersuchung von kurz- und langzeitigen Effekten von dynamischer Beleuchtung am Arbeitsplatz und individuellen Beleuchtungsempfehlungen für die Freizeit bei Schichtarbeitenden.

**Methoden:** Im Rahmen von vier Feldphasen wurden zwischen Oktober 2021 und Februar 2023 Beschäftigte eines Unternehmens untersucht. Dabei wurden zwei Beleuchtungsinterventionen am Arbeitsplatz i) am Tag in einer Gruppe von Schichtarbeitenden ohne Nachtschicht in Montagehalle 1 und ii) in der Nacht in einer Gruppe von Schichtarbeitenden mit Nachtschicht in Montagehalle 2 durchgeführt. Beschäftigte in anderen Betriebsbereichen und in unterschiedlichen Schichtsystemen dienten als Vergleichsgruppe. Nach der Baseline-Erhebung T0 (10 - 11/2021) wurde im Dezember 2021 die Beleuchtung modifiziert und bis zum Ende der Studie beibehalten. Im Vergleich zur Ausgangssituation wurde in der Taglicht-Intervention die melanopisch äquivalente Tageslichtbeleuchtungsstärke (MEDI) am Morgen dynamisch durch Variation von Lichtfarbe und Lichtstrom erhöht und zum Abend hin abgesenkt. In Montagehalle 2 wurde in der Nacht die Beleuchtung in der ersten Schichthälfte dynamisch erhöht und ab Mitte der Nachtschicht abgesenkt. Für die Analyse kurzfristiger Effekte wurden die Baseline-Untersuchungen T0 mit dem ersten Follow-up T1 (01/2022-02/2022) verglichen. Längerfristige Effekte wurden mit weiteren Feldphasen jeweils ein Jahr nach T0 und T1 untersucht (T2: 11/2022, T3: 01/2023). Nach T1 wurden weitere Teilnehmende für die Vergleichsgruppe rekrutiert. Aus allen Vergleichsteilnehmenden wurde eine randomisierte Subgruppe für die Untersuchung der Wirkung von individualisierten Lichtempfehlungen in der Freizeit mit T2 als Baseline und T3 als Follow-up gezogen. Die Empfehlungen wurden nach T2 und in T3 individuell über Studienhandys und weitere Methoden vermittelt. Als gesundheitliche Endpunkte wurden objektive Messparameter (Aktigraphie, Hormone im Speichel und im Haar, psychomotorische Vigilanz zur Mitte der Schicht) sowie subjektive Endpunkte (Schläfrigkeit, individuelle Beleuchtungswahrnehmung) untersucht. Lichttechnische Messungen am Arbeitsplatz und individuelle Lichtmessungen wurden begleitend eingesetzt. Die statistischen Auswertungen beinhalteten die Anwendung von Algorithmen für die Ableitung der Endpunkte, multiple Imputationsverfahren und deskriptive Analysen. Die orientierende Modellbildung umfasste je nach Endpunkt gemischte Modelle unter Berücksichtigung der Messwiederholungen mit Adjustierung nach wichtigen Confoundern.

**Ergebnisse:** Es nahmen  $n = 89$  Personen an den vier Feldphasen teil,  $n = 27$  waren Teilnehmende der Interventionen in den Hallen,  $n = 26$  Personen wurden für die Lichtempfehlungen in der Freizeit ausgewählt. Erste Analysen zeigen kurzfristig Verbesserungen in der psychomotorischen Vigilanz und der Schläfrigkeit bei der Taglicht-Intervention. Bei der Nachtlcht-Intervention wurden kurzfristig längere Schlaf dauern nach den Nachtschichten beobachtet. Es gibt Hinweise auf längerfristig höhere Werte für Melatonin und niedrigere Werte für Cortisol im Speichel zum Ende der Nachtschicht bei der Nachtlcht-Intervention. Bei den Lichtempfehlungen für die Freizeit wurden längere Schlaf dauern bei Frühschichten beobachtet. Im Verlauf der Studie sank das allgemeine Stresslevel gemessen über Cortisol im Haar bei allen Gruppen. Helligkeit und Lichtfarbe wurden nach der Beleuchtungsumstellung häufiger als angenehm wahrgenommen.

**Schlussfolgerungen:** Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Interventionen keine negativen Einflüsse auf die Gesundheit haben. In Teilaspekten gibt es Hinweise auf eine positive Wirkung.

## Abstract

**Aims:** Light is the most important zeitgeber for the human internal clock. Changing daily light profiles in shift workers can lead to a desynchronization of circadian rhythms and may influence workers health. The aim of this intervention study was to investigate the short- and long-term effects of dynamic lighting at the workplace and individual lighting recommendations for leisure time in shift workers.

**Methods:** Employees of a company were studied in four field phases between October 2021 and February 2023. Two workplace lighting interventions were carried out i) during the day in a group of shift workers without night shift in assembly hall 1 and ii) at night in a group of shift workers with night shift in assembly hall 2. Employees in other areas of the company and in different shift systems served as a comparison group. After the baseline survey T0 (10/2021-11/2021), the lighting was modified in December 2021. Compared to the baseline situation, in assembly hall 1 the melanopic equivalent daylight illuminance (MEDI) was dynamically increased in the morning by varying light colour and luminous flux and lowered towards the evening. In assembly hall 2, the lighting was dynamically increased at night in the first half of the shift and reduced from the middle of the night shift. For the analysis of short-term effects, baseline T0 measurements were compared with the first follow-up T1 (01/2022-02/2022). Longer-term effects were examined with further field phases one year after T0 and T1 (T2: 11/2022, T3: 01/2023). After T1, further participants were recruited for the comparison group. A randomized subgroup was drawn from all participants of the comparison group to study the effect of individualized lighting recommendations during leisure time with T2 as baseline and T3 as follow-up. The recommendations were communicated individually after T2 and in T3 via study cell phones and other methods. Health endpoints were assessed using both objective measures (actigraphy, hormone levels in saliva and hair, psychomotor vigilance in the middle of the shift) and subjective measures (sleepiness, individual perception of lighting). In addition, photometric measurements were carried out at the workplace as well as individual light measurements. The statistical analyses included the use of algorithms for deriving the endpoints, multiple imputation methods and descriptive analyses. Depending on the endpoint, the orientational modeling included mixed models considering the repeated measurements per individual and adjustment for important confounders.

**Results:** Overall,  $n = 89$  people took part in the four field phases,  $n = 27$  were participants in the interventions in the two halls,  $n = 26$  people were selected for the lighting-habits recommendations during leisure time. Initial analyses show short-term improvements in psychomotor vigilance and sleepiness for the intervention during daytime. For the intervention during the night, longer sleep durations after night shifts were observed in the short term. In the longer term there are indications of higher levels of melatonin and lower levels of cortisol in saliva at the end of the night shift with the night light intervention. Longer sleep durations were observed for early shifts with the recommendations for leisure time. Over the course of the study, the general stress level measured via cortisol in the hair decreased in all groups. Brightness and luminous colour were more frequently perceived as pleasant after the introduction of dynamic lighting.

**Conclusions:** The initial results indicate that there are no negative influences on health. There are indications of slight positive effects in some of the endpoints.

# 1 Problemstellung

Mit der Entwicklung dynamischer Lichtsysteme haben Arbeitgeber und Beschäftigte die Möglichkeit, individuelle Tageslichtprofile nach funktionalen, emotionalen und biologischen Bedürfnissen zu verändern und zu optimieren. Während auf der einen Seite günstige und energieeffiziente Technologien bereitstehen, fehlen genaue Kenntnisse über deren Anwendung und Einfluss auf die biologischen Rhythmen des Einzelnen. Insbesondere für Beschäftigte, die in Innenräumen arbeiten, sowie für Schichtarbeitende fehlen Studien, die die gesundheitlichen Auswirkungen von alltäglichen Beleuchtungsprofilen am Arbeitsplatz untersuchen. Da zunehmende Flexibilisierung und Schichtarbeit vermehrt Aktivitäten rund um die Uhr beinhalten, kommt der Lichtgestaltung in Arbeit und Freizeit unter gesundheitlichen Aspekten zukünftig eine besondere Rolle zu.

Ein Großteil der biologischen Prozesse im menschlichen Körper unterliegt einem Tagesrhythmus, auch zirkadianer Rhythmus genannt (abgeleitet aus dem Lateinischen von „etwa einen Tag“). Die Synchronisation mit dem natürlichen Tag-Nacht-Wechsel der Erde wird über externe Zeitgeber-Signale gesteuert. Der wichtigste Zeitgeber ist das Licht. Spezifische Zellen im Auge verarbeiten und leiten insbesondere Licht im blauen Wellenlängenbereich ans Gehirn weiter. Von dort aus werden die zirkadianen Rhythmen der einzelnen Zellen, Organe und Gewebe mittels endogener Signale und Hormone getaktet. Jede Einwirkung von Licht, sei es natürliches Tageslicht, Beleuchtung in Innenräumen, Licht oder Dunkelheit in der Nacht beinhaltet somit nichtvisuelle Lichtwirkungen. Häufige Wechsel der täglichen Lichtrhythmen z. B. bei Schichtarbeit, ein ständiger Aufenthalt in Innenräumen oder die Verwendung elektronischer Medien vor dem Schlafen können zu Störungen des zirkadianen Rhythmus führen. Dies kann hormonelle Veränderungen, Veränderungen im Schlaf-Wach-Zyklus, verminderte Schlafqualität, erhöhte Müdigkeit oder emotionale Belastung beinhalten. Insbesondere werden Licht in der Nacht (*englisch* Light-at-Night) und Änderungen im zirkadianen Rhythmus des Neurohormons Melatonin mit der Entstehung von Krebserkrankungen und anderen Erkrankungen und gesundheitlichen Störungen bei Schichtarbeitenden in Verbindung gebracht. Für die Auswirkung von Licht spielen verschiedene Faktoren der Beleuchtung (beispielsweise Lichtfarbe, Lichtleistung und Lichtverteilung) sowie auch individuelle Faktoren (wie Chronotyp und Alter) eine Rolle. Weiterhin ist Licht für das Sehen, also die visuelle Wirkung, für die Ausübung von Tätigkeiten, für die Konzentrationsfähigkeit und somit z. B. auch für die Vermeidung von Unfällen wichtig. Der sorgsamen Planung von Lichtumgebungen am Arbeitsplatz kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

Aus Sicht des Gesundheitsschutzes ist die wissenschaftliche Grundlage für eine Reihe von diskutierten Planungsempfehlungen nicht ausreichend. Jedoch werden dynamische Beleuchtungssysteme zunehmend Verbreitung finden. Aus arbeitsplatzbezogenen Interventionsstudien klare Schlussfolgerungen zu ziehen, ist bisher schwierig, da Beleuchtungs-Interventionen am Arbeitsplatz zum einen aus lichttechnischer Sicht bisher nicht ausreichend beschrieben und insbesondere relevante individuelle Faktoren von Beschäftigten nicht erfasst wurden. Auch mögliche jahreszeitliche Effekte, die in vielen Studien bisher nicht einbezogen wurden, erschweren die Interpretation vorhandener Ergebnisse. Erstrebenswert ist eine Beleuchtungsgestaltung, die einerseits Konzentrations- und Leistungsvermögen im Sinne der Verhütung von Fehlern und Unfällen aufrechterhält und eine Anpassung an die jeweilige Schichtzeit erleichtert, und andererseits die zirkadianen Rhythmen stabilisiert und damit auch potenzielle Risiken für die Entstehung von Krankheiten verringert. Ebenso sind die Verbesserung des Schlafs und eine Abnahme von Stress und psychischen Belastungen wichtige Aspekte der Beleuchtungsgestaltung. Der gezielte Einsatz von dynamischen Beleuchtungssystemen am Arbeitsplatz während des Tages in Kombination mit neutral- bzw. warmweißer Beleuchtung am Abend und in der Nacht im Sinne der Klärung der Rolle einer

gesunden Lichthistorie bei Schichtarbeitenden wurde bislang nicht untersucht. Weiterhin ist der Nutzen einer dynamischen, im normativen Bereich befindlichen Beleuchtung in der Nachtschicht mit höheren ähnlichsten Farbtemperaturen in der ersten Schichthälfte ungeklärt. Auch mögliche Verbesserungen des individuellen Lichtprofils über 24 Stunden durch individualisierte Empfehlungen für die Freizeit wurden bisher nicht untersucht. Diese könnten Erkenntnisse über mögliche ergänzende Empfehlungen für Beschäftigte liefern. Verschiedene Interessenvertreter können daher von einer Klärung der Frage nach der Wirksamkeit verschiedener Verbesserungsansätze zur Beleuchtung und auch Beleuchtungs-Gewohnheiten profitieren. Dabei kommt der Übertragbarkeit von Parametern von Beleuchtung und Licht am Arbeitsplatz auf andere Unternehmen und deren Beschreibung nach einheitlichen Standards eine besondere Bedeutung zu, da bisherige Studien durch nicht ausreichende lichttechnische Beschreibung von dynamischer Beleuchtung für die Praxis nicht umsetzbar waren (Kantermann et al. 2018).

## **1.1 Licht als gesundheitsrelevanter Faktor**

Licht stellt den stärksten Zeitgeber für die Synchronisation des menschlichen zirkadianen Zeitsystems dar. Es wird geschätzt, dass über 80% der biologischen Prozesse im menschlichen Körper einem zirkadianen Rhythmus folgen. Die endogenen zirkadianen Rhythmen werden durch Hell-Dunkel-Zyklen im Gehirn über den Nucleus suprachiasmaticus (NSC) im Hypothalamus synchronisiert, der als der führende zirkadiane endogene Schrittmacher identifiziert wurde (Buijs et al. 1998; Saper 2013). Intrinsische lichtempfindliche retinale Ganglienzellen (ipRGCs) vermitteln dabei die Lichtsignale aus der Umwelt über Melanopsin an den NSC, um die körpereigenen Rhythmen an die äußere Umgebung anzupassen (Berson et al. 2002). IpRGCs sind am empfindlichsten gegenüber dem blauen Lichtanteil (~460-490 nm) (Thapan et al. 2001). Die individuelle Lichtumgebung unterscheidet sich hinsichtlich Zeitmustern, Intensität und Lichtspektrum deutlich von der Situation vor einigen Jahrzehnten. Sowohl Schicht- als auch tägliche Büroarbeit beschränken die Möglichkeiten von Beschäftigten, sich durch ausreichende Zeiten im Freien unter Sonnenlicht an den natürlichen Licht-Dunkel-Zyklus des Tages anzupassen. Eine Studie aus Großbritannien hat gezeigt, dass Beschäftigte im Büro im Durchschnitt an arbeitsfreien Tagen 3,5mal mehr Zeit draußen verbringen als an Arbeitstagen (Baczynska et al. 2019). Hinzu kommen zunehmende nächtliche Expositionen gegenüber elektrischem Licht (Handys, Computer- und Fernsehbildschirme), die eine Belastung für die Synchronisation des menschlichen zirkadianen Zeitsystems darstellen können (Smolensky et al. 2015).

In Deutschland arbeiten laut Mikrozensus viereinhalb Millionen Beschäftigte in Nachtarbeit, davon über zwei Millionen mindestens die Hälfte der Arbeitstage (Statistisches Bundesamt 2018). Dabei gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Schichten und Schichtsysteme, die von Früh- bis Nacht-, von Wechsel- bis Dauer- und von regulären bis Wochenend-Schichten reichen. Änderungen der täglichen Muster der Lichtverhältnisse, die z. B. durch Arbeit in rotierenden Schichtsystemen bedingt sind, sowie ungenügendes helles Licht am Tag können eine Disruption zirkadianer Systeme bewirken, was potenziell die menschliche Gesundheit beeinträchtigen kann. So stufte die Internationale Agentur für Krebsforschung der Weltgesundheitsorganisation (IARC) Nachtarbeit als wahrscheinlich krebserregend ein (Gruppe 2A) (IARC Monographs Vol 124 group 2019). Unter anderem zeigten Studien zum Zusammenhang Brustkrebs und Schichtarbeit an deutschen Kollektiven erhöhte Risiken für langjährige Schichtarbeit und für eine hohe Nachtarbeitsintensität (Cordina-Duverger et al. 2018; Pesch et al. 2010; Rabstein et al. 2013; Rabstein et al. 2014). Weiterhin wurden zahlreiche Studien durchgeführt, die auf mögliche Zusammenhänge zwischen Schichtarbeit und anderen Krebserkrankungen sowie chronischen Erkrankungen wie Diabetes mellitus, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Magen-Darm-Problemen und neuropsychologischen Problemen hinweisen (Behrens et al. 2017; Harvey et al. 2017; Kecklund et al. 2008; Office of the



Report on Carcinogens, Division of the National Toxicology Program 2018; Vetter et al. 2018; Vyas et al. 2012). Als ein möglicher Wirkmechanismus zum Zusammenhang zwischen diesen Erkrankungen und Schichtarbeit steht Licht in der Nacht mit daraus resultierenden Änderungen in den zirkadianen Rhythmen von Hormonen – insbesondere Melatonin - im Vordergrund (sog. Light-at-Night-Hypothese (Stevens 1987)).

In experimentellen Studien konnte eine Unterdrückung von Melatonin nach einer nächtlichen Lichtexposition bestätigt werden (u. a. (Brainard et al. 2001)). Weiterhin wurde die Hypothese aufgestellt, dass eine gesunde Lichthistorie wie z. B. ausreichende Lichtexposition zur Tageszeit die melatoninhemmende Wirkung von Light-at-Night verhindern könnte (Hébert et al. 2002). Neben der Wirkung von Licht auf Melatonin können Lichtänderungen aber auch viele andere Markersignale beeinflussen. Als weiterer wichtiger möglicher Wirkfaktor ist der Schlaf zu nennen. Störungen im Schlaf-Wach-Rhythmus, nicht ausreichende Schlafdauer und Schlafqualität werden u. a. mit psychischen Erkrankungen, Konzentrationsstörungen, reduzierter Aufmerksamkeit und Stress in Verbindung gebracht (Angerer et al. 2017; Cajochen et al. 2005; Fritschi et al. 2011; Kazemi et al. 2016; Marquié et al. 2015; Rouch et al. 2005). Erhöhte Cortisolspiegel im Haar wurden insbesondere bei jüngeren Schichtarbeitenden im Vergleich zu Tagarbeitern der gleichen Altersgruppe nachgewiesen (Manenschijn et al. 2011). Individuelle Faktoren spielen für eine mögliche Beanspruchung durch Schichtarbeit eine bedeutende Rolle. Neben Alter und Geschlecht wird in neueren Studien auch der individuelle Chronotyp von Beschäftigten berücksichtigt. Der Chronotyp beschreibt, wie die „innere“ Uhr einer Person im Alltag getaktet ist.

## **1.2 Gestaltung der Beleuchtung bei Schichtarbeit**

Als wesentliche Schwierigkeit bei der Gestaltung von Schichtarbeit ist der ständige Wechsel in den Tagesrhythmen zu sehen, der auch bei Schichtsystemen mit Dauerschichten (z. B. Dauernachtschichten) vorliegt, da hier an den freien Tagen eine Anpassung an das soziale Umfeld stattfindet. Aktuell geht man davon aus, dass Licht mit hoher ähnlichster Farbtemperatur zwischen 18 Uhr und 4 Uhr die physiologischen zirkadianen Rhythmen nach hinten und zwischen 6 Uhr und 9 Uhr morgens nach vorne verschiebt (Lowden et al. 2019). Verschiedene Interventionen erzielten positive Wirkungen durch den gezielten Einsatz von Licht mit höherer ähnlichster Farbtemperatur bei Schichtarbeitenden auf Schlaf, Müdigkeit, subjektive Belastung, zirkadiane Rhythmen in Hormonen und Aufmerksamkeit (Leppämäki et al. 2003; Lowden et al. 2004; Lowden und Åkerstedt 2012; Pachito et al. 2018; Sasseville et al. 2009; Tanaka et al. 2011), ebenso wurden positive Effekte bei Innenraumarbeitsplätzen am Tag beobachtet (Leger et al. 2011). Die Ergebnisse sind jedoch nicht konsistent, was in der Nichtbeachtung von jahreszeitlichen Unterschieden in den Zielparametern begründet sein könnte (Huiberts et al. 2017; Owen und Arendt 1992). Saisonal bedingte niedrigere Lichtexpositionen in der Lichthistorie könnten dazu führen, dass Licht-Interventionen stärkere Auswirkungen haben. Dynamische Beleuchtung am Arbeitsplatz wurde bisher in nur wenigen Studien angewandt. Eine neuere Studie aus dem Jahr 2016 an Krankenschwestern untersuchte den Einfluss dynamischer Beleuchtung auf Schlaf und Melatonin (Jensen et al. 2016). In dieser Studie wurde kein Vorher-Nachher-Vergleich durchgeführt, sondern es wurden zwei Gruppen unterschiedlicher Arbeitsbereiche mit unterschiedlicher Beleuchtung miteinander verglichen, was methodisch kritisch ist. Unterschiede zwischen den beiden Gruppen wurden nicht gefunden. Zwei weitere Studien mit kleineren Fallzahlen zeigten positive Effekte auf Aufmerksamkeit, Müdigkeit und Schlafzeiten (Lowden und Åkerstedt 2012; Simons et al. 2018).

In einer im Februar 2019 erschienenen Studie zu individuellen 24-Stunden-Lichtexpositionen aus der IPA-Feldstudie zu Schichtarbeit geht hervor, dass Alter und Chronotyp, aber auch andere Fak-

toren individuelle 24-Stunden-Lichtprofile in Phasen von Tagschichten und in Phasen von Nachtschichten signifikant beeinflussen (Rabstein et al. 2019). Auf Grundlage der umfangreichen Daten war es möglich, direkte individuelle Gestaltungsempfehlungen für verschiedene Zeitfenster, die sowohl die Arbeitszeit als auch die Freizeit beinhalten, anhand individueller Merkmale wie dem Chronotyp abzuleiten.

Aus der Notwendigkeit der Betrachtung längerer Zeiträume am Tag, idealerweise 24-Stunden-Lichtprofile, resultiert der Ansatz für individualisierte Lichtempfehlungen, in die direkte Kenntnisse über individuelle Faktoren und üblichem Lichtverhalten (englisch *Lighting Habits*) einfließen. Studien über die Wirksamkeit von Interventionen mittels Handy-Apps zeigten, dass die eigentlichen Maßnahmen unabhängig von den privaten Mobiltelefonen an Studienhandys überprüft werden sollten, um einen Bias durch unterschiedliche Effekte (z. B. Probleme bei Installationen in Abhängigkeit vom Alter, Akzeptanz von neuen Medien) zu vermeiden (van Drongelen et al. 2016). D. h. für die Prüfung von individualisierten Präventionsempfehlungen sind zum Forschungszweck eingesetzte Studienhandys, die für die Teilnehmenden einfach zu bedienen sind und in einem konkreten Zeitrahmen eingesetzt werden, wirkungsvoll. Diese können die Beleuchtungsintervention vermitteln und somit potenziell das Gesamtprofil der 24-Stunden-Lichtexpositionen verbessern und zu einem umfassenden Konzept zur Stabilisierung des zirkadianen Rhythmus beitragen. Weiterhin bilden sie die Grundlage für die Entwicklung und den Einsatz zielgerichteter Apps.

Im Rahmen verschiedener Reviews zu Interventionsstudien bei Schichtarbeitenden wurde deutlich, dass bisherige Studien insbesondere im Kontext von Schichtarbeit mit zu kleinen Fallzahlen und ohne Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren durchgeführt wurden (Lowden et al. 2019; Slinger et al. 2016; Tähkämö et al. 2019). Es liegen keine ausreichenden Kenntnisse zum Zusammenhang zwischen Lichtexpositionen und individuellen Faktoren vor. In einer von der Kommission für Arbeitsschutz und Normung (KAN) in Auftrag gegebenen Literaturstudie „Gesicherte arbeitsschutzrelevante Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen“, bei der die Antragsteller Prof. Harth und Prof. Schierz Koautoren sind, wurde eine Bestandsaufnahme und Auswertung arbeitsmedizinisch relevanter wissenschaftlicher Publikationen durchgeführt (Kantermann et al. 2018). Im Jahr 2022 wurden von internationalen Experten Empfehlungen zur Beleuchtung in Innenräumen veröffentlicht (Brown et al. 2022). Hierin wurde betont, dass die dargestellten Empfehlungen nicht für Schichtarbeitende und Nachtarbeit entwickelt wurden, da positive Wirkungen einer erhöhten Wachsamkeit durch veränderte Beleuchtung in der Nacht mit potenziellen Störungen der zirkadianen Rhythmen verbunden sein können.

Die aktuellen Kernfragen auf diesem Forschungsgebiet wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes aufgegriffen. Trotz der Durchführung einer Feldstudie im zeitlichen Rahmen der SARS-CoV2-Pandemie konnten alle geplanten Fragestellungen untersucht werden. Diese beinhalten die Ableitung eines Konzepts zur dynamischen Beleuchtung am Arbeitsplatz in verschiedenen Schichtarten, die Untersuchung der kurz- wie längerfristigen Auswirkungen einer geänderten Beleuchtung am Arbeitsplatz auf relevante gesundheitliche Parameter sowie die Untersuchung der Umsetzung und der Wirkung von Beleuchtungsempfehlungen in der Freizeit.

## 2 Forschungsziele

Ziel des Vorhabens ist die Schaffung von Kenntnissen für die Verbesserung der Gesundheit von Beschäftigten im Schichtdienst mit oder ohne Nachtschichten durch die Umsetzung zirkadianer dynamischer Beleuchtungsstrategien am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung der spektralen Zusammensetzung, der Beleuchtungsstärke, der Expositionsdauer und des Zeitpunkts der Lichtexposition. Durch die begleitende wissenschaftliche Evaluation wird geprüft, ob die Beleuchtungsintervention kurz- wie längerfristig eine Stabilisierung der Schlaf-Wach-Zyklen gefördert, zirkadiane Störungen in Hormonen verringert, die Konzentrationsfähigkeit verbessert, Stress vermindert und somit auch die psychische Gesundheit der Beschäftigten durch dynamische Beleuchtung am Arbeitsplatz verbessert hat.

Zielgruppe für die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis sind Arbeitgeber, die Beleuchtung am Arbeitsplatz verbessern möchten, sowie Akteure des Gesundheitsschutzes und Unfallversicherungsträger. Erkenntnisse aus dem Einsatz von zirkadian wirksamen Beleuchtungssystemen sowie aus der Anwendung von ergänzenden individualisierten Empfehlungen für Beleuchtungsgewohnheiten in der Freizeit sind weiterhin übertragbar auf alle Beschäftigte. Die Ergebnisse liefern Hinweise für die Verbesserung der gesetzlichen Regelungen (z. B. ASR A3.4 „Beleuchtung und Sichtverbindungen“, (Ausschuss für Arbeitsstätten 2023)). Arbeitgeber sowie Stakeholder des Gesundheitsschutzes können für die Gestaltung von Arbeitsplätzen von den Erkenntnissen aus dieser Studie profitieren.

Konkret werden mit der Studie die kurz- sowie längerfristigen Effekte von drei unterschiedlichen Maßnahmen untersucht, diese sind:

- die Einführung von dynamischer Beleuchtung am Tage für Beschäftigte einer Montagehalle, die im Zweischichtbetrieb (Früh- und Spätschichten) arbeiten,
- die Einführung von dynamischer Beleuchtung in der Nacht für Beschäftigte einer Montagehalle, die im Dreischichtsystem (Früh-, Spät- und Nachtschichten) arbeiten,
- der Einsatz individualisierter und handybasierter Beleuchtungsempfehlungen bei einem Teil der Beschäftigten der Vergleichsgruppe.

Für die Vergleichsgruppe, die aus verschiedenen Betriebsbereichen rekrutiert werden, werden die Beschäftigten für die handybasierte Intervention unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren randomisiert zugewiesen. Der zweite Teil dieser Gruppe wird ohne Lichtintervention begleitet.

Eine weitere Zielsetzung ist, anhand von lichttechnischen Vergleichsmessungen festzustellen, inwieweit Lichtquellen anderer Hersteller in der Lage sind, die untersuchten Lichtszenarien an den untersuchten und an anderen Arbeitsplätzen bereitzustellen. Damit wird die Übertragbarkeit der abgeleiteten Beleuchtungsempfehlungen auf andere industrielle Arbeitsplätze sichergestellt.

Mithilfe statistischer Verfahren wird untersucht, ob der Einsatz dynamischer Beleuchtung am Arbeitsplatz während der Früh-, Spät-, und Nachtschicht sowie individualisierte, handybasierte Lichtempfehlungen während der Freizeit Auswirkungen auf:

- Schlafdauer,
- psychomotorische Vigilanz,
- Schläfrigkeit während der Arbeitszeit,
- Melatonin und Cortisol im Speichel (bei Beschäftigten mit Nachtschichten),
- Haarcortisol als Marker für Langzeitstress und
- individuelle Wahrnehmung der Beleuchtung

bei den Beschäftigten haben.

## Relevanz für die Unfallversicherungsträger

Dynamische Beleuchtungskonzepte für Bürogebäude und Werkshallen werden zunehmend Verbreitung finden. Die vorliegende Studie generiert praxisrelevante Kenntnisse über die Effekte des Einsatzes dynamischer Beleuchtungssysteme am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung individueller Unterschiede zwischen Beschäftigten. Die Intervention liefert somit eine wichtige Datengrundlage für einfache und innovative Maßnahmen zur Verbesserung der Gesundheit am Arbeitsplatz für Arbeitgeber und Entscheidungsträger im Bereich der Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz. Insbesondere können die Erkenntnisse aus der geplanten Untersuchung eine Grundlage für die Verbesserung des Schlafes, der Stärkung der zirkadianen Rhythmen bilden und in deren Folge die zur Verminderung von psychischen Beschwerden und Stress sowie von Fehlern und Unfällen beitragen.

Die Ergebnisse aus der Studie können in die Verbesserung von gesetzlichen Regelungen einfließen. Gewonnene Erkenntnisse sind sowohl für Beschäftigte in Schichtarbeit als auch in Tagarbeit sowie in abhängiger und unabhängiger Beschäftigung relevant.

Weiterhin generiert der vorliegende Forschungsansatz grundlegende Kenntnisse für den Einsatz von evidenzbasierten, individualisierten Präventionsempfehlungen zur Beleuchtung. Somit bietet er ergänzende Informationen für mögliche Verbesserungen im Lichtprofil für Beschäftigte an Arbeitsplätzen mit Standardbeleuchtung oder Telearbeitsplätzen bzw. für Mitarbeiter, die zeitlich und räumlich flexibel arbeiten.

## 3 Methodik

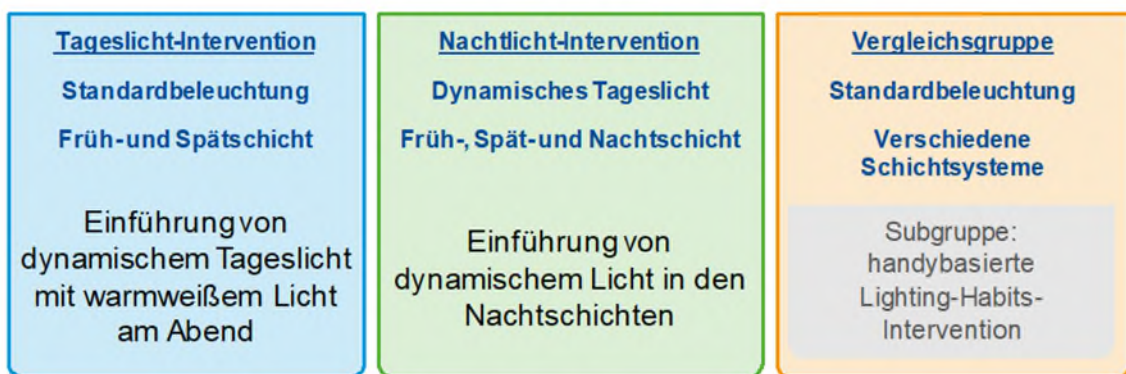
### 3.1 Studiendesign

#### 3.1.1 Kollektiv

Es wurde eine Interventionsstudie mit wiederholten Untersuchungen von Beschäftigten der TRILUX GmbH & Co. KG am Standort Arnsberg, Neheim-Hüsten durchgeführt. Insgesamt wurden 89 Beschäftigte aus zwei Montagehallen mit Beleuchtungsumstellung, einer Gruppe Beschäftigter für den Einsatz einer Handy-Intervention und einer Vergleichsgruppe in einem individuellen Vorher-Nachher-Vergleich untersucht. Dabei sollten drei Verbesserungs-Ansätze für Lichtprofile:

- dynamische Beleuchtung am Tag und am Abend
- dynamische Beleuchtung in der Nacht
- individualisierte Lichtempfehlungen für die Gestaltung der Lichtexposition in der Freizeit (Lighting-Habits-Intervention)

geprüft werden (s. Abbildung 1). Die Entwicklung (Kapitel 3.2.2) und Umsetzung der Beleuchtungsinterventionen (Kapitel 3.2.3) sowie der Beleuchtungsempfehlungen für die Freizeit (Kapitel 3.2.4) werden in den folgen Abschnitten detailliert beschrieben.



**Abbildung 1. Untersuchungsgruppen und Beleuchtungsintervention**

Die Beschäftigten in Montagehalle 1 arbeiteten im teilkontinuierlichen Zweischichtsystem mit Früh- und Spätschichten (jeweils fünf Schichten und zwei freie Tage). In Montagehalle 2 wurde in einem teilkontinuierlichen, rückwärts-rollierenden Schichtsystem gearbeitet. Dies beinhaltete eine Folge von fünf Nachtschichten, zwei freien Tagen, fünf Spätschichten, zwei freien Tagen, fünf Früh-schichten, zwei freien Tagen usw. Die Vergleichsgruppe der weiteren Betriebsbereiche setzte sich aus Beschäftigten aus verschiedenen Schichtsystemen bzw. reinen Früh- oder Tagschichten zusammen. Aus dieser Gruppe wurde eine Subgruppe für die Durchführung der Lighting-Habits-Intervention gezogen.

Die insgesamt vier Feldphasen waren die Baseline-Erhebung T0 (10 - 11/2021), das erste Follow-up T1 (01/2022-02/2022) zur Untersuchung der kurzzeitigen Effekte und die beiden Follow-ups T2 und T3 (T2: 11/2022, T3: 01/2023) zur Untersuchung der längerfristigen Effekte. Jede Feldphase umfasste drei Wochen, an denen in allen Betriebsbereichen gleichzeitig Untersuchungen stattfanden. Die Beschäftigten hatten durch die dreiwöchigen Feldphasen die Möglichkeit, in jeder Schicht-art einmal an den Untersuchungen teilzunehmen. In jeder Feldwoche fanden Untersuchungen an den ersten beiden Arbeitstagen bei allen Schichten über 48 Stunden statt. Als Endpunkte wurden objektive (Schlaf, zirkadiane Rhythmen in Hormonen, psychomotorische Vigilanz, Stress) und subjektive Parameter (Schläfrigkeit und Wohlbefinden) erhoben.

Für die Auswahl der Zeiträume für die vier Feldphasen wurden folgende Kriterien gewählt:

- in allen Feldphasen sollten möglichst gleiche Tageslichtlängen vorliegen,
- sie sollten in der dunklen Jahreszeit stattfinden,
- es sollten keine Schulferienzeiten in den Feldphasen liegen,
- während der Feldphasen sollte keine Zeitumstellung stattfinden.

### 3.1.2 Rekrutierung

Im Rahmen der ersten Rekrutierung konnte das Studienteam alle  $n = 168$  Beschäftigte der Produktion in Kleingruppen im Rahmen von 23 Informationsveranstaltungen an sechs Arbeitstagen vor Ort über die Studie informieren. Im Vergleich zur ursprünglichen Planung mit einer Dauer der Informationsveranstaltungen von ca. ein bis zwei Stunden Länge in Versammlungen, wurden diese aufgrund der SARS-CoV2-Pandemie kürzer (ca. 30 Minuten bis eine Stunde) und wenn möglich in Außenbereichen durchgeführt. Umfangreicher waren daher die individuellen Aufklärungsgespräche vor den Interviews. Um die Vergleichspopulation mit Beschäftigten aus der Verwaltung zu ergänzen, wurden zusätzlich drei Online-Informationsveranstaltungen durchgeführt. Bei diesen Veranstaltungen konnte das Studienteam weitere  $n = 25$  Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter informieren. Aus allen Informationsveranstaltungen ergab sich ein Rücklauf von  $n = 89$  Studieninteressenten (46%), die sich im Rahmen eines Aufklärungsgesprächs über die Studie informieren wollten. Für einen Großteil der Interessentinnen und Interessenten mussten aufgrund des hohen Grades an gesundheitsbedingten Abwesenheiten zwei oder mehr Termine vereinbart werden. Über einen Zeitraum von 14 Arbeitstagen wurden 122 Termine für Aufklärungsgespräch und ggf. Interviews vor Ort in den Produktionshallen vereinbart.

Vor den Feldphasen T2 und T3 wurde geprüft, ob weitere Arbeitsbereiche für eine Nachrekrutierung in Frage kamen. Dies diente der Sicherstellung ausreichender Fallzahlen in der Vergleichsgruppe für die Ziehung der Subgruppe, bei denen die Empfehlungen für Licht in der Freizeit gegeben werden sollten (Lighting-Habits-Intervention). Für die Nachrekrutierung wurden erneut Informationsveranstaltungen und Rundgänge in den Arbeitsbereichen durchgeführt, die über Fragestellung, Studiendurchführung, Datenschutz und Aufwandsentschädigungen informierten. An zwölf Tagen mit Informationsveranstaltungen und Hallenbegehungen in unterschiedlichen Schichten und Bereichen wurden etwa fünfzig potenzielle Teilnehmende aus der Lehrwerkstatt sowie weiteren acht Werkshallen informiert. Insgesamt erklärten sich weitere  $n = 22$  Beschäftigte zur Teilnahme an der Studie bereit.

Aufgrund des geringen Anteils an Nachtarbeitenden in der Nachrekrutierungsgruppe wurde beschlossen, die Auswahl für die Lighting-Habits-Intervention nur für Beschäftigte ohne Nachtarbeit durchzuführen. Dies sicherte eine ausreichend große Vergleichsgruppe für die Beleuchtungsintervention mit Nachtarbeit auch in T3. Für die Lighting-Habits-Intervention wurden  $n = 26$  Probandinnen und Probanden ohne Tätigkeit im Dreischichtsystem aus der gesamten betrieblichen Vergleichsgruppe geschichtet und nach Rekrutierungszeitraum (Nachrekrutierung oder nicht) und Alter (< 45 Jahre, 45 Jahre und älter) gezogen. Eine detaillierte Beschreibung des Rekrutierungsverlaufs findet sich in Kapitel 4.1, S. 37.

### 3.1.3 Forschungsbegleitkreis

Das Forschungsprojekt wurde von einem wissenschaftlichen Begleitkreis beraten. Die Mitglieder waren (in alphabetischer Reihenfolge): Barbara Hirschwald (Institut für Arbeitsschutz der DGUV, IFA), Dr. Anna Dammann (KAN), Dr. Sylvia Hubalek (Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, BG ETEM), Prof. Dr. Thomas Kantermann (Fachhochschule für Ökonomie und Management, FOM), Dr. Matthias Möhner (im Ruhestand (i. R.), vormals Bundesanstalt für



Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, BAuA), Sylke Neumann (Verwaltungs-Berufsgenossenschaft, VBG), Prof. Dr. Dieter Riemann (Universitätsklinikum Freiburg), Gerold Soestmeyer (Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, BG RCI), Dr. Ljiljana Udovicic (i. R., vormals BAuA), Dr. Jürgen Walldorf (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., ZVEI), Dr. Hanna Zieschang (Institut für Arbeit und Gesundheit der DGUV, IAG) sowie Dr. Joachim Herrmann von der Forschungsförderung der DGUV. Insgesamt fanden im Verlauf des Projektes fünf Forschungsbegleitzkreis-Treffen statt (22.06.2020, 01.09.2021, 13.06.2022, 04.05.2023 und 27.02.2024). Für die Forschungsförderung wurden drei Zwischenberichte erstellt, die die Projektstände am 21.12.2021, am 03.06.2022 und am 04.05.2023 darstellten. Es wurden jährliche Nachweise über die Verwendung der Finanzmittel erstellt.

### 3.1.4 Zeitplan und Änderungen im Studienverlauf

Der Projektbeginn war am 01.02.2020 und das geplante Projektende am 31.07.2022. Das Projekt wurde mehrmals kostenneutral verlängert, u. a. durch die pandemiebedingte Verschiebung aller Feldphasen um ein Jahr, und endete am 29.02.2024. Die erste Phase der Rekrutierung fand vom 24.06.2021 bis 30.09.2021 statt. Die Aufklärungsgespräche wurden vom 26.09.2021 bis 28.10.2021 durch das Studienpersonal durchgeführt. Die ersten zwei Feldphasen wurden vom 07.11.2021 bis 24.11.2021 (Baseline T0) und vom 23.01.2022 bis 09.02.2022 (Follow-up T1). Ab dem 15.08.2022 fanden die Veranstaltungen und Aufklärungsgespräche für die Nachrekrutierung statt. Die Feldphasen zur Untersuchung der Langzeiteffekte der Beleuchtungsintervention und der Kurzzeiteffekte der Lighting-Habits-Intervention fanden vom 06.11.2022 bis 23.11.2022 (Follow-up T2) und vom 22.01.2023 bis 08.02.2023 (Follow-up T3) statt.

Aufgrund der SARS-CoV2-Pandemie konnte die geplante Fallzahl von  $n = 140$  Probandinnen und Probanden nicht erreicht werden. Die Durchführung der Lighting-Habits-Intervention wurde analog zum Notfallplan der Antragstellung zu Gunsten einer ausreichenden Fallzahl für die beiden Beleuchtungsinterventionen ausgesetzt. Beim dritten Treffen des Forschungsbegleitzkreises (13.06.2022) wurde über diesen Sachverhalt beraten. Den vom Studienteam vorgeschlagenen Maßnahmen i) Fortführung der Studie zur Analyse der längerfristigen Effekte, ii) Nachrekrutierung zur Aufstockung der Vergleichsgruppe, iii) Analyse der kurzfristigen Effekte der Lighting-Habits-Intervention, falls die Vergleichsgruppe ausreichend groß ist; wurde zugestimmt. Hierbei wurde auch festgestellt, dass Subgruppenanalysen (auch aus datenschutzrechtlicher Sicht) möglicherweise nur orientierend vorgenommen werden können.

Zudem waren vorgesehene vergleichende Lichtmessungen nicht möglich. Alternativ wurden Messungen an einem Laboraufbau vorgenommen und Simulationen in DIALux, einer Software für die Lichtplanung, mit marktverfügbaren Leuchten mit dynamischer Beleuchtung von fünf anderen Herstellern durchgeführt.

### 3.1.5 Arbeitspakete

Im Rahmen des Kooperationsprojekts wurden verschiedene Arbeitspakete, wie im Forschungsantrag geplant, vergeben. Diese Arbeitspakete und die schwerpunktmäßige Bearbeitung umfassten die Folgenden:

**Arbeitspaket 1 (IPA und ZfAM):** Vorbereitung der Felddurchführung, Erstellung von SOPs, Erstellung von Hygienekonzepten und Abstimmung mit den Treuhändern und dem Betrieb

**Arbeitspaket 2 (IPA und Unterauftragnehmer XIMES GmbH):** Konzipierung der Studienhandys und Lighting-Habits-Intervention, Erstellung von Mock-ups, Software-Entwicklung, Testung und Durchführung

**Arbeitspaket 3 (IPA und ZfAM):** Durchführung der Untersuchungen in den Feldphasen

**Arbeitspaket 4 (TU Ilmenau):** Charakterisierung von Beleuchtungssystem und Lichtsteuerung, feldphasenbegleitende kontinuierliche Messungen und Vergleichsmessungen zur dynamischen Beleuchtung mit anderen Systemen

**Arbeitspaket 5 (ZfAM und IPA):** Datenbank, Datenmanagement, Plausibilitätsprüfung und statistische Auswertung

**Arbeitspaket 6 (IPA und Unterauftragnehmer IBL, Hamburg):** Analyse der Schlaf-Wach-Zyklen, Interviewbögen, Hormone Melatonin und Cortisol im Speichel, Schläfrigkeitsangaben sowie Handydaten und Lighting-Habits-Umsetzung

**Arbeitspaket 7 (ZfAM und Unterauftragnehmer Dresden LAB):** Analyse der psychomotorischen Vigilanz, von Cortisol im Haar und der individuellen Beleuchtungswahrnehmung

**Arbeitspaket 8 (TU Ilmenau):** Auswertung und Analyse der Messdaten für Beleuchtungssituationen, Spektralmessung der Eigenschaften Gläsern mit Blaulichtfilter

Die Planung der Interventionen wurde von allen Projektpartnern gemeinsam durchgeführt.

### 3.1.6 Ethik und Datenschutz

Für die Studie „Licht und Schicht“ liegt ein positives Votum der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Ruhr-Universität Bochum vor (Register-Nr.: 20-7055-andere Forschung). Weiterhin lagen Freigaben durch den Datenschützer der BGRCI und des UKE Hamburg vor. In der Analyse wird auf die Darstellung von Sachverhalten bei Gruppen mit weniger als fünf Personen aus Datenschutzgründen verzichtet.

## 3.2 Entwicklung der Beleuchtungsinterventionen

### 3.2.1 Charakterisierung der Beleuchtungsverhältnisse in den Versuchshallen

#### 3.2.1.1 Grundlagen

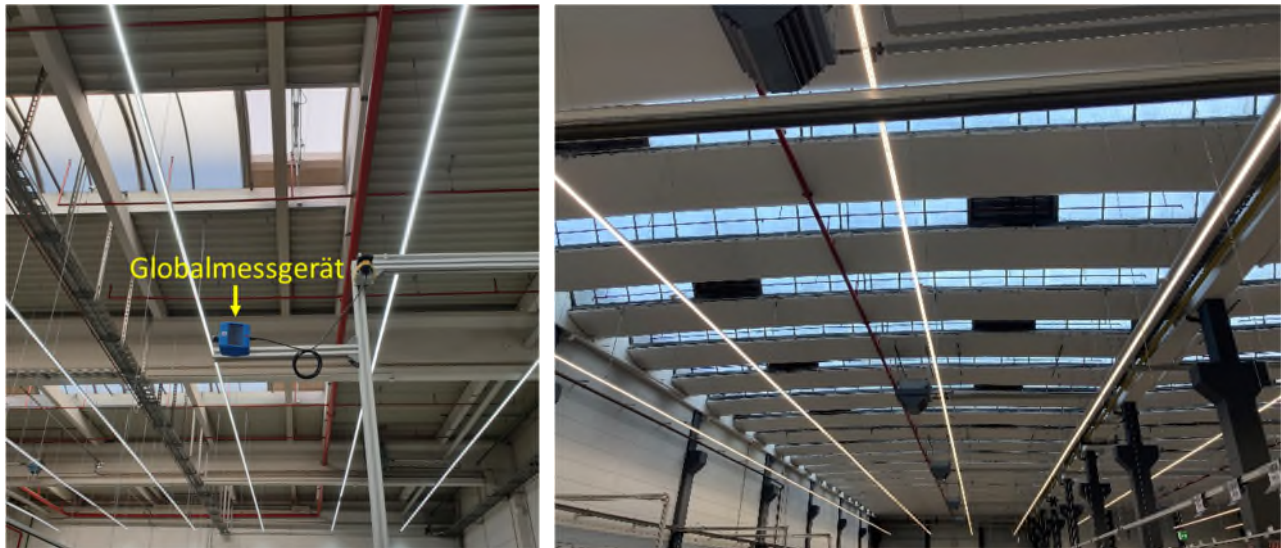
Zur vollständigen Beschreibung nichtvisueller Lichtwirkungen sind Spektrum und Beleuchtungsstärke in der Augenebene zeitlich aufgelöst zu bestimmen. Wirkungen, welche über die intrinsische Lichtempfindlichkeit der melanopsinhaltigen Ganglienzellen (ipRGC) vermittelt werden, lassen sich mit der melanopisch äquivalenten Tageslichtbeleuchtungsstärke  $E_{v, \text{mel}, D65}$  (englisch Melanopic Equivalent Daylight Illuminance auch MEDI) beschreiben. Sie ist eine Vergleichsgröße und gibt an, welche Beleuchtungsstärke bei Tageslicht mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6500 K (D65) die gleiche melanopische Lichtwirkung hervorruft, wie bei der vorliegenden Beleuchtung (DIN/TS 5031-100:2021-11). Wichtige Einflussgrößen für  $E_{v, \text{mel}, D65}$  sind die vertikale Beleuchtungsstärke in der Augenebene  $E_{\text{vert}}$  und der melanopische Wirkungsfaktor  $a_{\text{mel}, v}$ , der durch die spektrale Verteilung und damit die Lichtfarbe der Beleuchtung beeinflusst wird und ein Maß dafür ist, wie effektiv Licht bei der Stimulation der ipRGCs ist. Wichtige lichttechnische Begriffe sind im lichttechnischen Glossar, Anhang 8.2, S. 63 erklärt.

#### 3.2.1.2 Versuchshallen, Beleuchtungsanlage und Steuerung

In die Beleuchtungsinterventionen am Arbeitsplatz waren zwei Montagehallen einbezogen (Halle 1: Länge: 65 m, Breite: 24 m, Höhe: 11 m; helle Wände und lichtgrauer Boden; Halle 2: Länge: 80 m, Breite: 34 m, Höhe: 11 m; helle Wände und lichtgrauer Boden). Eine Beschreibung der Hallen ist in



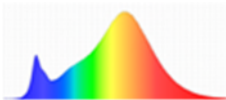
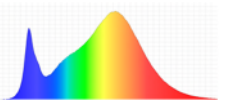
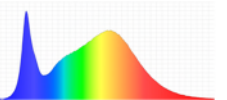
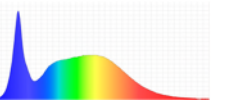
den Abbildungen A 1 bis A 4 im Anhang 8.6 ab S. 71 zu finden. In Halle 1 fand die Lichtintervention am Tag in Früh- und Spätschicht statt, in Halle 2 wurde die Lichtintervention während der Nachtschicht durchgeführt. In beiden Hallen sind die Tätigkeiten bei der Fertigung vergleichbar. Die etwa zwanzig Arbeitsplätze sind L- bzw. U-förmig in Arbeitsbereichen angeordnet, die sich innerhalb der Montagehalle verteilen. Die Hallen verfügen über ein Sheddach bzw. Oberlichter und damit über eine gute Tageslichtversorgung (Abbildung 2).



**Abbildung 2. Bilder der Montagehallen, links: Montagehalle 1 mit Oberlichtern für Lichtintervention am Tag in Früh- und Spätschicht, rechts: Montagehalle 2 mit Sheddach für Lichtintervention in der Nachtschicht**

Die elektrische Hallenbeleuchtung ist jeweils mit LED-Leuchten vom Typ E-Line Act 7650 TB LED 10000 (Act DWW) ETDD (Fa. Trilux/ Arnsberg) ausgestattet, die in Linienanordnungen in einer Lichtpunkthöhe von etwa 7,3 m verbaut sind. Leuchtenpläne der Montagehallen 1 und 2 sowie eine Beschreibung der Leuchten sind im Anhang 8.6 ab S. 71 zu finden. Die Leuchten sind in Lichtfarbe und Lichtstrom steuer- bzw. regelbar. Sie verfügen über zwei Typen von leuchtstoffkonvertierten weißen LEDs in warmweißer (2700 K) und tageslichtweißer (6500 K) Lichtfarbe, die einzeln jeweils in ihrem Lichtstrom gesteuert werden können. Auf diese Weise ist es möglich, die Lichtfarbe der Leuchte zwischen ähnlichsten Farbtemperaturen (CCT) von 2700 K bis 6500 K zu variieren. Spektralverteilungen für unterschiedliche Lichtfarben mit Angaben zu melanopischen Größen enthält Tabelle 1.

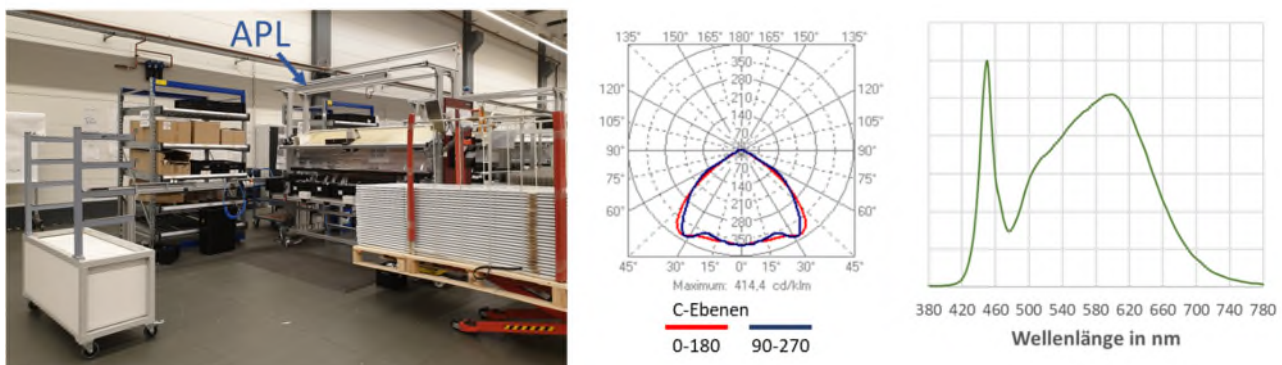
**Tabelle 1. Spektralverteilungen für unterschiedliche Lichtfarben der Hallenbeleuchtung mit Angaben zum melanopischen Wirkungsfaktor  $a_{mel,v}$  und zum MEDI-Wert bei Beleuchtungsstärken am Auge von  $E_{vert} = 250 \text{ lx}$  bzw.  $E_{vert} = 125 \text{ lx}$ . Die unterste Zeile enthält prozentuale Werte, die sich durch die Änderung der Lichtfarbe ausgehend von 4000 K ergeben.**

CCT	2700 K	3000 K	4000 K	6500 K
Spektralverteilung				
$a_{mel,v}$	0,37	0,44	0,59	0,81
$E_{vert}$	250 lx   125 lx	250 lx   125 lx	250 lx   125 lx	250 lx   125 lx
$E_{mel,v,D65}$ auch MEDI	103 lx   51,5 lx	120 lx   60 lx	163 lx   81,5 lx	223 lx   111,5 lx
MEDI / MEDI(4000 K)	63%	74%	100%	137%

CCT: ähnlichste Farbtemperatur

Ersichtlich ist, dass sich bei der Variation der Lichtfarbe zwischen 2700 K und 6500 K bei gleichem Anlagenlichtstrom der MEDI-Wert verdoppelt. Die Variation der Lichtleistung der Beleuchtungsanlage führt bei unveränderter Lichtfarbe zu einer Änderung der MEDI-Werte in gleicher Weise. Bei einer Dimmung des Lichtstroms auf z. B. 50% reduziert sich der MEDI-Wert ebenfalls auf 50%.

Um eine Anpassung der Beleuchtungsstärke im Bereich der Arbeitsaufgabe an unterschiedliche Sehanforderungen und individuelle Lichtbedürfnisse zu ermöglichen, ist an vielen Arbeitsplätzen eine zusätzliche arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL) vorhanden und individuell zur Allgemeinbeleuchtung zuschaltbar. Die Arbeitsplatzleuchten sind Leuchten des Typs 7650 B LED 4000-840 ETDD (Fa. Trilux/ Arnsberg). Sie strahlen symmetrisch und breit ab, verfügen über eine neutralweiße Lichtfarbe (4000 K) und sind nicht in die Steuerung der Hallenbeleuchtung integriert. Die Leuchte ist am Rahmen des Arbeitsplatzes montiert und mit der horizontalen Arbeitsfläche in der Höhe verfahrbar. Sie befindet sich in einer Höhe von etwa 1,3 m über der Arbeitsfläche. Abbildung 3 zeigt die Abstrahlcharakteristik und die Spektralverteilung der Arbeitsplatzleuchte.



**Abbildung 3. links: Typischer Montagearbeitsplatz mit Arbeitsplatzleuchte (APL), Mitte: symmetrische und bereitetstrahlende Lichtstärkeverteilung der APL, rechts: Spektralverteilung der APL mit CCT = 4000 K**

### 3.2.1.3 Messkonzept und Basismessungen

Zur Beschreibung der Beleuchtungsverhältnisse an den Arbeitsplätzen erfolgten Messungen in der Arbeitsebene (typischerweise Werte auf horizontaler Ebene im Bereich der Sehaufgabe,  $E_{\text{hor}}$ ) und in Augenhöhe der arbeitenden Person. Bei Sitz- und Steharbeitsplätzen ist es üblich, diese in horizontaler Blickrichtung auf einer vertikalen Ebene ( $E_{\text{vert}}$ ) in einer Höhe von 1,2 m bzw. 1,6 m zu messen. Die Messgeometrie für einen typischen Arbeitsplatz ist in Abbildung 4 links gezeigt.

Spektrale Strahlungsgrößen wurden mit Spektralradiometern (Specbos 1201/ Specbos 1211, JETI Technische Instrumente GmbH, Jena) gemessen. Aus diesen lassen sich photometrische und melanopische Größen bestimmen. Zeitgleich erfolgten spektrale Globalmessungen an einem definierten Messort in der Montagehalle, der sich in einer Höhe von etwa 3,5 m oberhalb der Arbeitsplätze und auf halber Höhe zur Hallenbeleuchtung befand und unverändert während der gesamten Dauer der Studie beibehalten wurde (vgl. Abbildung 2, links). Die vertikale Messebene des Globalmessgeräts (Spectraval 1511, JETI Technische Instrumente GmbH, Jena) war in die Hallentiefe ausgerichtet. Die Steuerwerte der Beleuchtungsanlage zur Lichtleistung (relativer Lichtstrom  $\Phi_{\text{rel}}$  in %) und zur Lichtfarbe (CCT in K) sowie die Messwerte an den Arbeitsplätzen lassen sich mit Korrekturfaktoren aus den Messwerten am Globalmessplatz ableiten. Daher konnten die Globalmesswerte genutzt werden, um sowohl die Steuerwerte der Beleuchtungsanlage zu rekonstruieren als auch Werte für die Lichtparameter an den Arbeitsplätzen zu schätzen. Eine Kontrolle der zeitlichen Verläufe der Beleuchtungsverhältnisse war auf die Weise möglich.



**Abbildung 4.** links: Skizze der Messgeometrie für Größen, die auf vertikaler ( $E_{\text{vert}}$ ) und horizontaler ( $E_{\text{hor}}$ ) Ebene am Montagearbeitsplatz mit Arbeitsplatzbeleuchtung (APL) gemessen werden. rechts: Zeitgleich erfolgte Spektralmessungen am Globalmessplatz und Messungen am realen Arbeitsplatz. Dieser Arbeitsplatz wurde als Referenzmessplatz gewählt. Gezeigt ist die modifizierte APL, die mit einer Blende zur Kontrolle der Lichtabstrahlung versehen wurde.

Um den Zusammenhang zwischen den Steuerwerten der Beleuchtungsanlage für Lichtleistung und Lichtfarbe und den Messwerten an den Arbeitsplätzen zu ermitteln, wurde ein typischer Arbeitsplatz in der Montagehalle als Referenzarbeitsplatz gewählt. Für diesen erfolgten Messungen bei unterschiedlichen Einstellungen der Hallenbeleuchtung ohne und mit Hinzuschalten der Arbeitsplatzleuchte. Aus diesen Messdaten kann auch bestimmt werden, in welchem Umfang die Beleuchtungsvariation nichtvisuelle Parameter beeinflussen kann. Dies ist eine wichtige Voraussetzung dafür, um Steuerwerte für die dynamische Lichtintervention ableiten zu können.

Um eine repräsentative Beschreibung für alle Arbeitsplätze innerhalb der Montagehalle vornehmen zu können, wurden neben dem Referenzarbeitsplatz weitere Arbeitsplätze verteilt über die Montagehalle bei einer definierten Beleuchtungssituation vermessen. Dafür wurde jeweils die Ausgangssituation T0 (Halle 1: CCT: 4000 K |  $\Phi_{\text{rel}}$ : 50% bzw. Halle 2: CCT: 3800 K |  $\Phi_{\text{rel}}$ : 70%) gewählt. Für die Arbeitsplätze wurde damit eine mittlere Beschreibung der lichttechnischen und melanopischen Größen in Augenhöhe für die Messposition gefunden und Korrekturfaktoren relativ zur Globalmessung bestimmt.

### 3.2.1.4 Ergebnisse der Basismessungen

Tabelle 2 (S. 14) fasst die Ergebnisse der Messungen an 11 Arbeitsplätzen (Halle 1) und 21 Arbeitsplätzen (Halle 2) ohne Arbeitsplatzbeleuchtung zusammen.

### 3.2.2 Pilotstudien

Durch die Einschränkungen der Pandemie wurde der Start der Feldphase T0 vom Herbst 2020 in das Folgejahr verschoben. Dadurch ergab sich die Möglichkeit, im Rahmen von Pilotstudien Vorversuche durchzuführen und unterschiedliche Steuerwerte und zeitliche Verläufe zu testen sowie deren Akzeptanz zu erfragen. Auch konnten notwendige Anpassungen an der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung durchgeführt und evaluiert werden. Bei allen Tests wurde die technische Stabilität der Steuerungssysteme überwacht und das Messkonzept geprüft, um sicherzustellen, dass die gewünschte Lichtdynamik zuverlässig ist und umgesetzt wird.



**Tabelle 2. Mittelwerte und Standardabweichung der Messung an 11 Arbeitsplätzen in Halle 1 (Lichtintervention am Tag) und an 21 Arbeitsplätzen in Halle 2 (Lichtintervention in der Nacht), nur Allgemeinbeleuchtung**

Halle	1 (Lichtintervention am Tag)		2 (Lichtintervention in der Nacht)	
	Lichtfarbe   Lichtleistung		Lichtfarbe   Lichtleistung	
	4000 K   100%	T0: 4000 K   50%	3800 K   100%	T0: 3800 K   70%
<i>Arbeitsplatzmesswerte</i>				
$E_{hor}$	720 lx $\pm$ 160 lx	360 lx $\pm$ 80 lx	675 lx $\pm$ 110 lx	475 lx $\pm$ 75 lx
$E_{vert}$	220 lx $\pm$ 60 lx	110 lx $\pm$ 30 lx	260 lx $\pm$ 85 lx	180 lx $\pm$ 60 lx
$a_{mel,v}$	0,60	0,60	0,46	0,46
$E_{mel,v,D65}$ (MEDI)	150 lx $\pm$ 40 lx	75 lx $\pm$ 20 lx	130 lx $\pm$ 40 lx	90 lx $\pm$ 30 lx
<i>Globalmesswerte</i>				
$E_{vert}$	440 lx $\pm$ 10 lx	220 lx $\pm$ 10 lx	430 lx $\pm$ 5 lx	300 lx $\pm$ 5 lx
CCT	3915 K $\pm$ 20 K	3925 K $\pm$ 20 K	3220 K $\pm$ 5 K	3225 K $\pm$ 5 K
$a_{mel,v}$	0,57	0,57	0,50	0,50

$E_{hor}$ : horizontale Beleuchtungsstärke,  $E_{vert}$ : vertikale Beleuchtungsstärke,  $a_{mel,v}$ : melanopischer Wirkungsfaktor,  $E_{mel,v,D65}$ : melano-pisch äquivalente Tageslichtbeleuchtungsstärke (auch MEDI), CCT: ähnlichste Farbtemperatur

Die in den Pilotstudien gewonnenen Erkenntnisse sollten dazu beitragen, die optimalen Parameter für die geplante Lichtinterventionen festzulegen und deren Implementierung zu optimieren.

### 3.2.2.1 Konzept

Für die Festlegung der Steuerung zur Lichtintervention in der Nacht war davon auszugehen, dass die gewünschten niedrigen MEDI-Werte mit der wärmsten Lichtfarbe (2700 K), die im System verfügbar ist, realisiert werden sollten. Der Reduzierung der Lichtleistung als weitere Einflussgröße sind in der Praxis Grenzen gesetzt. Aus Sicht des Arbeitsschutzes müssen Mindestwerte für die Beleuchtungsstärke je nach Arbeitsaufgabe eingehalten werden, um eine ermüdungsfreie Tätigkeit über längere Zeit zu gewährleisten. Daher spielt die Steuerung nichtvisueller Lichtwirkungen über die Variation der Lichtfarbe eine entscheidende Rolle. Während der Intervention sollte sich außerdem der Lichtreiz möglichst deutlich von der Ausgangssituation unterscheiden, um signifikante Ergebnisse erzielen zu können.

Aus einer früheren Befragung unter den Beschäftigten in der Montagehalle war bekannt, dass sehr warme Lichtfarben nicht gut akzeptiert wurden. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass nicht alle Leuchten in der Halle als dynamische Beleuchtung mit variabler Lichtfarbe ausgeführt und in die Steuerung integriert sind. So sind im Pausenraum auf der Empore, in den Büros der Produktionsleitung und als arbeitsplatzbezogene Beleuchtung nur Leuchten verbaut, die eine neutralweiße Lichtfarbe (4000 K) besitzen. Unterschiede in der Lichtfarbe zwischen der gesteuerten Hallenbeleuchtung und den angrenzenden Bereichen fallen umso deutlicher auf, je wärmer die Lichtfarbe der Hallenbeleuchtung ist, während kein Tageslicht über das Sheddach einfällt. Aus Untersuchungen ist bekannt, dass neutralweiße Lichtfarben im Arbeitsbereich besser akzeptiert werden als warmweiße Lichtfarben und dass keine großen Lichtfarbenunterschiede zwischen arbeitsplatzbezogener und raumbezogener Beleuchtung gewünscht werden (Markytan und Gall 2021). Die Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden ist außerdem nichtlinear mit der ähnlichsten Farbtemperatur verknüpft. Bei wärmeren Lichtfarben werden im Vergleich zur kälteren Lichtfarben kleinere zeitliche Farbtemperaturänderungen  $\Delta CCT$  erkannt und als störend empfunden. Während bei warmen Lichtfarben (3000 K) bereits Lichtfarbenunterschiede von  $\Delta CCT \geq 75$  K deutlich gesehen und von  $\Delta CCT \geq 170$  K als störend empfunden wurden, sind bei tageslichtweißem Licht (6000 K) erst Lichtfarbenunterschiede von  $\Delta CCT \geq 355$  K deutlich zu erkennen und von  $\Delta CCT \geq 850$  K als störend wahrzunehmen (Bieske 2010). Dementsprechend sind bei der zeitlichen

Steuerung je nach Variationsrichtung die Schrittweite, der Dynamikumfang und die Änderungsge-  
schwindigkeit anzupassen. Es ist auf ausreichend Adaptationszeit zu achten, um Störungen im  
Empfinden zu vermeiden. Das gilt besonders dann, wenn sich die Lichtfarbe zeitgleich mit der  
Lichtleistung der Beleuchtung verändert (Bieske 2010).

Bezüglich der Lichtfarbe wird für die Nachtschicht seitens der Kommission Arbeitsschutz und Nor-  
mung (KAN) empfohlen, ähnlichste Farbtemperaturen von  $CCT > 4100\text{ K}$  zu vermeiden (Aus-  
schuss für Arbeitsstätten 2018). Der Dynamikumfang für die Nachtschicht ergibt sich damit zu  
 $4100\text{ K} \geq CCT \geq 2700\text{ K}$ . Die Variation in diesem Bereich reduziert den MEDI-Wert nach Tabelle 1  
um etwa 35%. Größere Änderungen des MEDI-Werts im Verlauf der Nachtschicht können daher  
nur in Verbindung mit einer zusätzlichen Änderung der Lichtleistung realisiert werden.

### 3.2.2.2 Methoden

#### Pilotphase 1 (November 2020)

Die Pilotstudie 1 in Halle 2 während der Nachtschicht umfasste die folgenden Testszenarien:

- Szenario S1:* Änderung der Lichtfarbe von 3800 K (Ausgangssituation) zu 2700 K ab  
Mitternacht bei 70% Lichtleistung (Ausgangssituation).
- Szenario S2:* Änderung der Lichtfarbe von 3800 K zu 3000 K ab Mitternacht  
bei 100% Lichtleistung.
- Szenario S3:* Änderung der Lichtfarbe von 3800 K zu 3000 K ab 4 Uhr  
bei 100% Lichtleistung.

Für die Dauer von drei Wochen wurde jeweils in der Mitte der Arbeitswoche zwischen zwei Test-  
szenarien gewechselt (S1/S2; S2/S3; S3/S1).

#### Pilotphase 2 und Modifikation der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung (APL) (Mai 2021)

Die Pilotstudie 2 in Halle 2 während der Nachtschicht umfasste die folgenden Testszenarien:

- Szenario S4:* Änderung der Lichtfarbe von 3800 K (Ausgangssituation) zu 3000 K  
Ab 2 Uhr bei 100% Lichtleistung (in Anlehnung an S3).
- Szenario S5:* Änderung der Lichtfarbe von 4800 K zu 3000 K ab 2 Uhr  
bei 100% Lichtleistung.

Messungen im April 2021 zeigten, dass mit einem Steuerwert von 4800 K für die Lichtfarbe die  
Vorgaben der KAN eingehalten wurden (Ausschuss für Arbeitsstätten 2018). Anfang Mai 2021  
wurden außerdem Modifikationen an der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung vorgenommen. Es  
wurden Blenden vor den Leuchten montiert und der Leuchtenlichtstrom auf 50% eingestellt.

#### Anonymisierte Befragungen

Im Zeitraum der Vorstudien wurden anonymisierte Befragungen der Beschäftigten in der Montage-  
halle 2 durchgeführt. Diese wurden durch die Ethik-Kommission der Ruhr-Universität Bochum ge-  
nehmigt (Register-Nr.: 20-6859-andere Forschung). Ziel der Befragungen war es, die Akzeptanz  
der Beleuchtungsszenarien in der Nacht anhand der subjektiven Einschätzung der Beschäftigten  
zu untersuchen. Einschlusskriterium für die Aufnahme in die Studienpopulation war die Beschäfti-  
gung in der Halle, ausgeschlossen wurden Beschäftigte, die in Teilzeit arbeiteten, Urlaub hatten  
oder an den Untersuchungstagen aus anderen Gründen abwesend waren. Die Rekrutierung der  
Teilnehmenden und die Durchführung wurden in Abstimmung mit dem Betriebsrat und der Ge-  
schäftsführung geplant. Im Rahmen der Untersuchungswochen wurden die Beschäftigten aufgefor-  
dert, die beiden Beleuchtungsszenarien der Untersuchungswoche zur zweiten Nacht in dem ent-  
sprechenden Szenario mittels eines kurzen Fragebogens für verschiedene Zeitpunkte während der  
Nachtschicht zu bewerten. Die Fragen bezogen sich auf die individuelle Wahrnehmung der

Beleuchtung, Akzeptanz und Angaben zu Schlaf und Schläfrigkeit. Aufgrund des Designs der Studie im Kontext des wöchentlichen Wechsels der Schichtgruppen hatte jeder Teilnehmer und jede Teilnehmerin die Möglichkeit zwei Szenarien zu bewerten. Insgesamt wurden  $n = 84$  Fragebögen zur Beurteilung der Beleuchtung in Pilotphase 1 eingereicht.

Die Akzeptanz der Modifikationen der Arbeitsplatzbeleuchtung (APL) wurde mittels Zusatzfragebögen während der zweiten Pilotphase erhoben. Erfragt wurden die Häufigkeit des Einsatzes und die individuelle Bewertung der Änderungen an den APL.

### Statistische Analyse

Die statistische Analyse der Fragebögen erfolgte mittels SAS, Version 9.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Die Zufriedenheit mit der Beleuchtung sowie unterschiedliche Fragen zur Wahrnehmung von Helligkeit, Lichtfarbe, Blendung wurden mit gemischten Proportional-Odds-Modellen adjustiert nach Alter, Geschlecht und Chronotyp unter Berücksichtigung der Messwiederholungen untersucht. Ergebnisse werden als Odds Ratio Schätzungen (OR) mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) angegeben. Modelliert wurde das Risiko für eine negative Einschätzung des eingesetzten Szenarios. In beiden Pilotphasen wurden die gleichen Fragebögen zur Wahrnehmung eingesetzt. Da die Szenarien in Pilotphase 2 nicht wie geplant umgesetzt werden konnten, werden für die zweite Pilotphase die Ergebnisse zur Befragung der Akzeptanz der modifizierten Arbeitsplatzbeleuchtung dargestellt.

#### 3.2.2.3 Ergebnisse

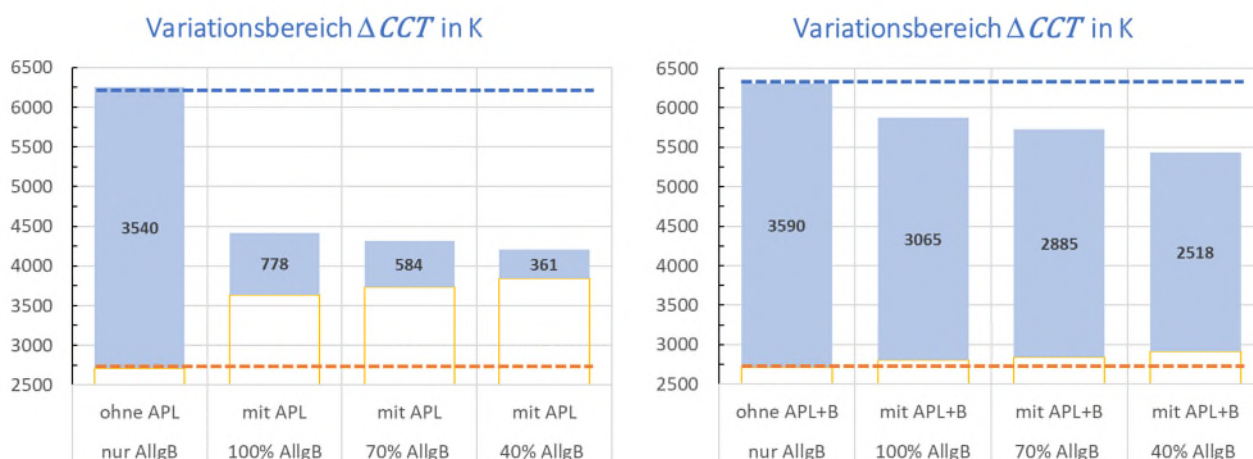
##### Pilotphase 1

Die Auswertung der begleitenden Globalmessung in Pilotphase 1 zeigte, dass die zeitlichen Verläufe von Lichtstrom und Lichtfarbe nicht in jedem Fall den Vorgaben folgten. So war keine Differenzierung zwischen den Szenarien S2 und S3 möglich. Die Messgeräte für die Globalmessung konnten nicht per Fernzugriff betrieben werden, sodass der tatsächliche Verlauf der Steuerung der Beleuchtungsanlage erst nach Abschluss der Testphase überprüft werden konnte.

In Pilotphase 1 wurden insgesamt 84 Fragebögen eingereicht. Hiervon waren  $n = 63$  Fragebögen von Teilnehmenden, die zwei Bögen ausgefüllt haben. Mehr als die Hälfte der Befragten waren Männer (60,0%), 45% der Befragten waren unter 45 Jahre alt. Bei 70% Lichtleistung mit wärmerer Lichtfarbe im Vergleich zu 100% Lichtleistung zeigten sich eine geringere Unzufriedenheit mit der Helligkeit (OR 0,50; 95%-KI 0,24-1,04), jedoch ein höheres Risiko für Unzufriedenheit mit der Lichtfarbe (OR 1,99; 95%-KI 1,26-3,14) und ein erhöhtes Risiko für Blendung (OR 3,19; 95%-KI 0,77-13,2). Es bestätigte sich somit insgesamt die Annahme, dass eine warme Lichtfarbe von 2700 K unter den Bedingungen in der Halle nicht so gut akzeptiert wurde.

##### Pilotphase 2 und Modifikation der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung

Die an den Arbeitsplätzen vorhandenen Leuchten waren mit einer neutralweißen (4000 K) Lichtfarbe ausgestattet, die nicht verändert werden konnten und nicht in die Steuerung der Hallenbeleuchtung integriert waren. Sie konnten bei Bedarf individuell eingeschaltet werden. Die Auswertung der Basismessungen zeigten, dass sich das Licht der Arbeitsplatzleuchten (APL) mit dem der Allgemeinbeleuchtung (AllgB) überlagerte und wegen der räumlichen Nähe zur Person das Licht der APL dasjenige der AllgB dominierte. Durch die statische Lichtfarbe der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung wurde der wirksame Dynamikbereich der Lichtfarbe der dynamischen Allgemeinbeleuchtung von 2700 K bis 6500 K (nach Messungen  $\Delta CCT = 3540$  K) auf unter 1/4 reduziert und konfigurierte mit deren Wirksamkeit bei der Unterstützung nichtvisueller Lichtwirkungen, wie in Abbildung 5 links gezeigt.



**Abbildung 5. links: Einfluss der Arbeitsplatzbeleuchtung (APL) auf den wirksamen Dynamikbereich der ähnlichsten Farbtemperatur  $\Delta CCT$  für die vertikale Augenebene einer Person in einer Höhe von 1,6 m bei einer Blickrichtung geradeaus bei 100% Lichtstrom der APL und rechts: nach der Modifikation Arbeitsplatzbeleuchtung mit Blende (APL+B) und Reduktion des Leuchtenlichtstroms auf 50%**

Um die Wirksamkeit der Steuerung einer dynamischen Allgemeinbeleuchtung möglichst wenig zu stören, war es notwendig, die Abstrahlung der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung in Richtung der vertikalen Augenebene zu reduzieren (Bieske et al. 2023). Hierfür wurden die Leuchten an den Arbeitsplätzen mit einer weißgespritzten Blende versehen, wie in Abbildung 4 rechts, S. 13 zu sehen ist. Die Lichtstärke in Richtung Auge wurde damit deutlich reduziert. Zusätzlich wurde der Leuchtenlichtstrom durch Einstellung am Vorschaltgerät halbiert. Durch diese Modifikationen konzentriert sich der Lichtstrom der Arbeitsplatzleuchte im Wesentlichen auf die horizontale Ebene der Sehaufgabe auf dem Arbeitstisch. Auch beim Zuschalten der Arbeitsplatzleuchte kann so ein Dynamikbereich der Lichtfarbe von 70% bis 85% im Vergleich zur Beleuchtungssituation allein durch die Hallenbeleuchtung erreicht werden (Abbildung 5, rechts). Die Steuerung von nichtvisuellen Lichtwirkungen über die Änderung der Lichtfarbe der Hallenbeleuchtung war damit sinnvoll möglich. Die modifizierte Arbeitsplatzleuchte erhöhte die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge nur um etwa 45 lx und erzeugte bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 4000 K der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung einen MEDI-Wert von zusätzlich etwa 26 lx.

Die Auswertung der begleitenden Globalmessung zeigte, dass die zeitlichen Verläufe von Lichtstrom und Lichtfarbe nicht in jedem Fall den Vorgaben folgten. Teilweise wurde die Änderung nicht zum gewünschten Zeitpunkt vorgenommen oder die Lichtleistung entsprach nicht den Vorgaben. Diese Probleme wurden bis zum Start der Feldphasen behoben. Zusätzlich wurde geprüft, wie die Lichtleistung während der Nachtschicht angepasst werden kann. Mit einer Definition von zwei Zeiträumen für die Nachtschicht konnte die Lichtleistung einmalig während der Nachtschicht in der Montagehalle 2 geändert werden.

An der Fragebogenerhebung zu den Änderungen in der Arbeitsplatzbeleuchtung nahmen 20 Personen teil, insgesamt wurden  $n = 34$  Fragebögen eingereicht. In  $n = 33$  Fragebögen wurden Angaben zum Einsatz der APL gemacht, in knapp zwei Dritteln (65,7%) der Fälle wurden die APL während der Nachtschicht eingeschaltet. Insgesamt wurde die Frage, wie den Studienteilnehmenden die neue Arbeitsplatzbeleuchtung gefällt, in nur 7% der Fälle mit schlecht oder sehr schlecht bewertet.

## Zusammenfassung der Ergebnisse der Pilotstudien

Durch die durchgeführten Pilotphasen konnte sichergestellt werden, dass die Beleuchtungsveränderungen sowohl mit einer sehr guten Akzeptanz des Großteils der Belegschaft als auch hinsichtlich des gewählten Konzepts unter Berücksichtigung der Gegebenheiten in den Hallen durchgeführt werden konnten. Die Änderungen in der Anlagensteuerung wurden von den Mitarbeitern der Firma vor Ort vorgenommen. Ein Test der Verfahrensweise vor Beginn der Feldphasen war wichtig, um den reibungslosen Ablauf in der Studie zu sichern. Das Messkonzept erwies sich als hilfreich und valide. Im Sinn der Qualitätssicherung reliabler Messwerte wurden begleitende Messungen auch während der Feldphasen und Testmessungen zwischen den Feldphasen notwendig.

### 3.2.3 Festlegung der Steuerung für die Lichtintervention

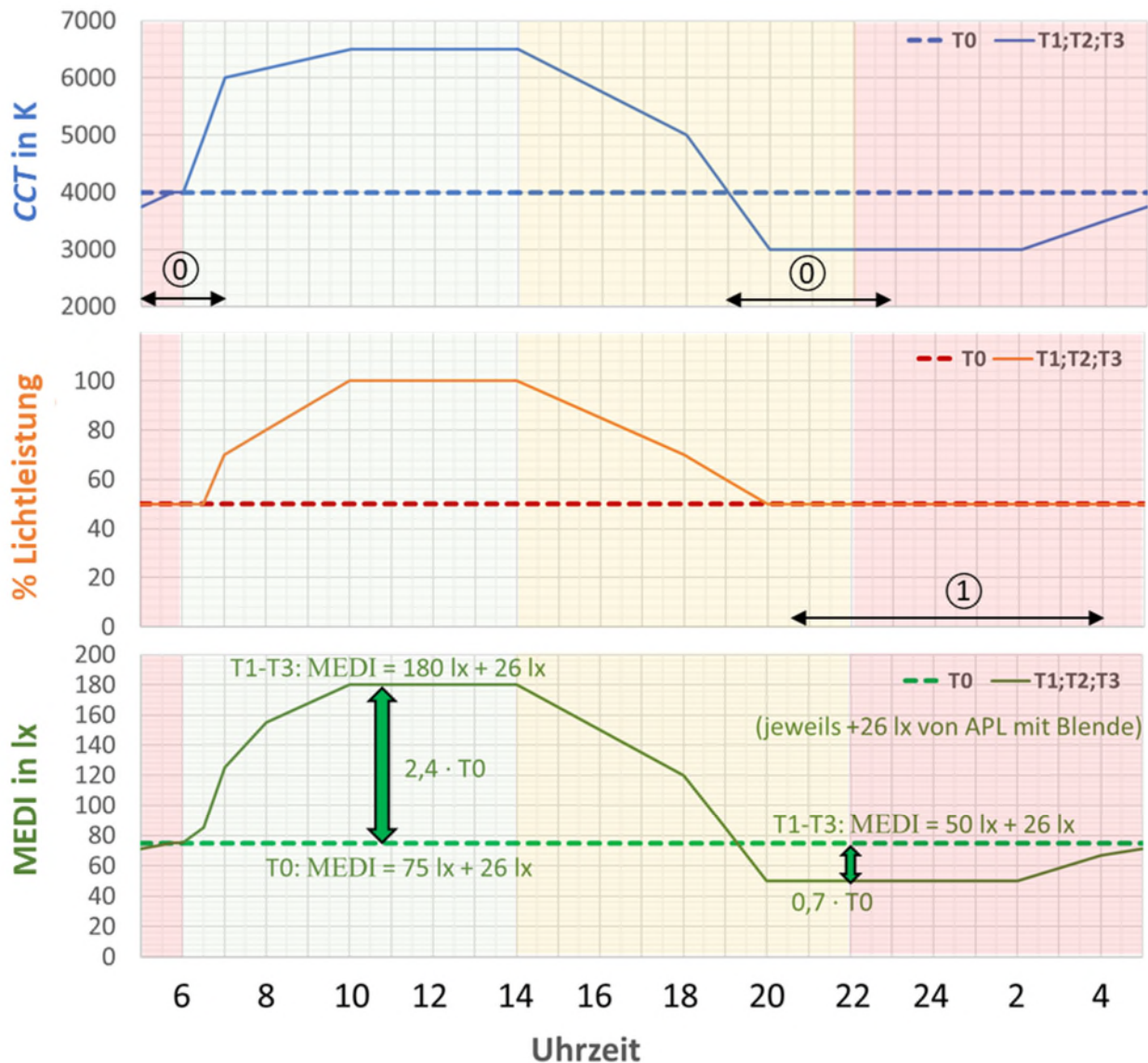
#### 3.2.3.1 *Lichtintervention am Tag (Halle 1)*

Für die Lichtintervention ab Feldphase T1 in der Montagehalle 1 wurde die Beleuchtung während des Tages dynamisch gestaltet. Ausgangslage T0 war eine Beleuchtung mit zeitlich konstanten Einstellungen für Lichtstrom (50%) und Lichtfarbe (4000 K). Die Steuerung in dieser Halle ermöglichte eine freie zeitlich variable Anpassung von Lichtstrom und Lichtfarbe, was im Steuerungskonzept entsprechend genutzt werden konnte. Mit Beginn der Frühschicht stiegen im Verlauf des Vormittags Lichtstrom und Lichtfarbe auf ihre Maximalwerte (100%, 6500 K), sanken im Verlauf des Nachmittags kontinuierlich und erreichten minimale Einstellwerte ab zwei Stunden vor Ende der Spätschicht. Eine Anhebung des Lichtstroms von 50% auf 100% bewirkte eine Verdopplung der melanopischen Werte. Die Änderung der Lichtfarbe von 4000 K auf 6500 K erhöhte die melanopische Größe um etwa 40%. Damit ergab sich eine um etwa den Faktor 2,4 höhere melanopische Größe während der Frühschicht im Vergleich zur Ausgangssituation in Feldphase T0. Tageslicht ist dabei nicht berücksichtigt. Im Verlauf der Spätschicht verringerte sich der Lichtstrom auf 50%, dem Wert für die Ausgangssituation T0, wodurch die Mindestbeleuchtungsstärke in den Arbeitsbereichen in jedem Fall gesichert wurde. Die ähnlichste Farbtemperatur sank im Verlauf der Spätschicht bis auf 3000 K und reduzierte damit die melanopische Größe um 30% unter den Wert der Ausgangssituation. Die melanopische Größe in der Spätschicht lag etwa bei dem Faktor 0,7 im Vergleich zur Ausgangssituation in Feldphase T0 (Abbildung 6). Zusätzlich sind die Zeiträume ① und ② gezeichnet, die für die Überprüfung der Beleuchtungsparameter nach Tabelle 3, S. 32, herangezogen wurden.

#### 3.2.3.2 *Lichtintervention in der Nacht (Halle 2)*

In Halle 2 wurde die vorhandene dynamische Tagesbeleuchtung, die sich an den Tageslichtverhältnissen im Außenraum orientierte, mit einer dynamischen Beleuchtung für die Nachtschicht ergänzt. In dieser Halle war die bisherige Beleuchtung während der Nachtschicht zwischen 22 Uhr und 6 Uhr zeitlich konstant ausgelegt mit einem auf 70% reduzierten Anlagenlichtstrom bei neutraler Lichtfarbe (CCT-Steuerwert: 3800 K). Das Steuerungssystem für die Hallenbeleuchtung verfügt über eine variable Anpassung der Lichtfarbe für 24 frei wählbare Zeitpunkte, die in der Steuerung hinterlegt werden können. Veränderungen des Lichtstroms können nur über die Festlegung der Schichtzeiträume erfolgen und sind während einer Schicht nicht möglich. Damit konnte ein Wechsel der Lichtleistung nur sprunghaft erfolgen, eine gewünschte langsame Anpassung der Lichtleistung war mit der vorhandenen Steuerung nicht realisierbar. Dies begrenzte die Variationsmöglichkeiten für die nichtvisuelle Lichtwirkung über die Veränderung des Lichtstroms der Beleuchtungsanlage in dieser Halle. Um Störungen möglichst zu vermeiden, wurde der Wechsel der Lichtleistung zur Pausenzeit in die Mitte der Nachtschicht gelegt. Die untere Grenze des Lichtstroms

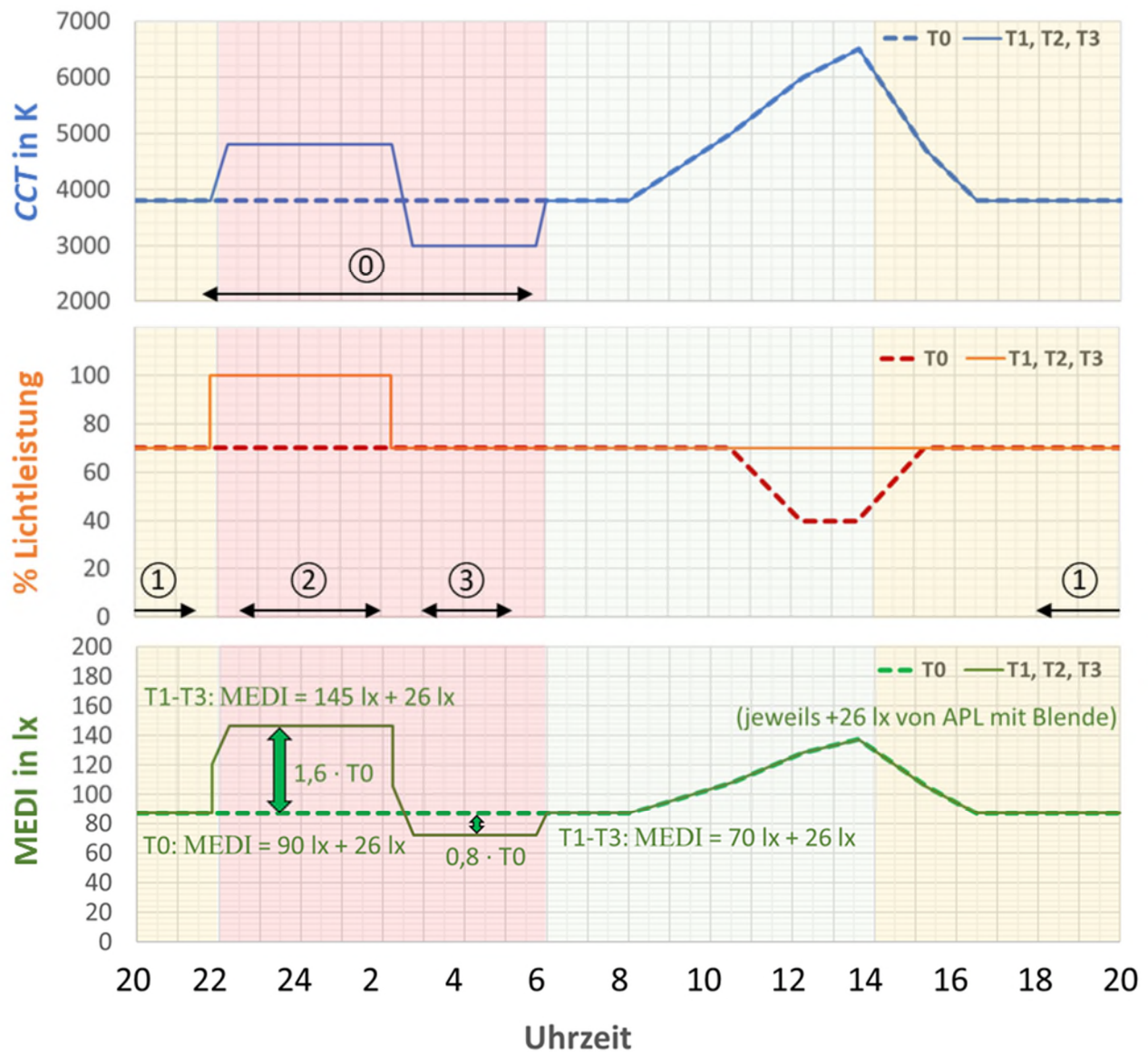




**Abbildung 6. Zeitlicher Verlauf der Steuerwerte Lichtfarbe (CCT) und Lichtleistung ( $\Phi$ ) und die resultierenden mittleren MEDI-Werte für dynamische Beleuchtung am Tag in Früh- und Spätschicht in Montagehalle 1 während der Feldphasen T1 - T3 im Vergleich zur Baseline T0. Zusätzlich ist der Effekt durch die arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL mit Blende) angegeben. Tageslicht ist dabei nicht berücksichtigt. Zusätzlich eingezeichnet sind die Zeiträume ① und ② für die Überprüfung der Beleuchtungsparameter nach Tabelle 3, S 32.**

der Beleuchtungsanlage war dadurch gesetzt, dass zu jedem Zeitpunkt die geforderten Wartungswerte für die Beleuchtungsstärke in den Arbeitsbereichen gewährleistet sein mussten. Nach Auslegung der Beleuchtung entspricht dies 70% Lichtleistung. Bezüglich der Lichtfarbe wurde für die Nachtschicht empfohlen, ähnlichste Farbtemperaturen  $CCT > 4100$  K zu vermeiden (Ausschuss für Arbeitsstätten 2018). Messungen im Vorfeld haben gezeigt, dass diese Forderung an den Arbeitsplätzen mit Anlagensteuerwerten von maximal 4800 K eingehalten wird.

Bei der Planung der Steuerungsparameter und deren zeitlichem Verlauf wurde sich auch daran orientiert, für die Lichtintervention einen deutlich unterschiedlichen Reiz für die nichtvisuelle Lichtwirkung gegenüber der Feldphase T0 zu erzielen. In der Umsetzung der Lichtintervention bedeutet dies einen etwa 1,7-fachen höheren MEDI-Wert zu Schichtbeginn und eine Reduzierung ab Mitte der Nachtschicht auf das 0,8-fache im Vergleich zur Ausgangssituation in der Feldphase T0 wie in Abbildung 7 gezeigt.



**Abbildung 7. Zeitlicher Verlauf der Steuerwerte Lichtfarbe (CCT) und Lichtleistung ( $\Phi$ ) und die resultierenden mittleren MEDI-Werte für dynamische Beleuchtung in der Nachtschicht in Halle 2 während der Feldphasen T1 bis T3 im Vergleich zur Baseline. Zusätzlich ist der Effekt durch die arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL mit Blende) angegeben. Zusätzlich eingezeichnet sind die Zeiträume ①, ② und ③ für die Überprüfung der Beleuchtungsparameter nach Tabelle 3, S. 32.**

### 3.2.4 Beleuchtungsempfehlungen für die Freizeit (Lighting-Habits-Intervention)

Da das individuelle Verhalten in Hinsicht auf Licht und Beleuchtung einen Einfluss auf 24-Stunden-Lichtprofile und somit auch auf die im Rahmen dieser Studie untersuchten Endpunkte haben kann, beinhaltet das Studienkonzept auch eine Intervention zu Beleuchtung in der Freizeit. Ziel war es, mögliche Wirkungen durch Beleuchtungsinterventionen am Arbeitsplatz auch gegenüber Auswirkungen individueller Verhaltensänderungen ins Verhältnis zu setzen. Bei Beschäftigten ohne Beleuchtungsumstellung am Arbeitsplatz sollte die als „Lighting-Habits-Intervention“ bezeichnete Intervention mit Empfehlungen für das individuelle Freizeitverhalten umgesetzt werden. Die Entwicklung der Lighting-Habits-Intervention beinhaltet:

- das Konzept für konkrete Empfehlungen zu spezifischen Zeitpunkten an Arbeitstagen mit Schichtarbeit,

- die randomisierte Auswahl von Studienteilnehmenden für die Interventionsgruppe mit Lighting-Habits-Intervention aus der Vergleichspopulation,
- die Vermittlung der Empfehlungen im Rahmen von verschiedenen Maßnahmen der Wissensvermittlung (Lighting-Habits-Gespräche, Informationsmaterial, Einbindung der Empfehlungen in die Software der eingesetzten Studienhandys) und die Erhebung der Umsetzung der Empfehlungen durch die Teilnehmenden.

### 3.2.4.1 *Empfehlungen nach Schichtsystem*

Auf Grundlage von Kenntnissen aus der Literatur und eigenen Studien wurden Empfehlungen zur Verbesserung von individuellen Lichtprofilen entwickelt (Lowden et al. 2019; Rabstein et al. 2019). Diese sollten nicht zu umfänglich und einfach umzusetzen sein. Empfehlungen sollten zudem bei wechselnden Tagesrhythmen im Verlauf des Schichtsystems keine konfligierenden Reize hinsichtlich einer Anpassung an die aktuelle Arbeitsschicht beinhalten. Es wurden die folgenden drei Aspekte betrachtet:

#### 1) *Tageslicht*

Ausreichendes Tageslicht spielt eine zentrale Rolle bei der Regulierung der zirkadianen Rhythmen. In verschiedenen Studien bei Schichtarbeitenden konnte gezeigt werden, dass helles Licht am Morgen die zirkadiane Phase nach vorne (früher) verschieben kann und helles Licht am Nachmittag oder Abend nach hinten. Eine für die Anpassung an die aktuelle Arbeitsschicht unterstützende Lichtempfehlung ohne konfligierende Reize beinhaltet daher in den Frühschichten ein helles Licht, das nicht zu spät am Tag stattfindet, und in Phasen mit Spätschicht nicht zu frühes helles Licht.

#### 2) *Dunkelheit*

Es sollte ein lichtgeschütztes Umfeld geschaffen werden, um den Schlaf hinsichtlich Qualität und Dauer zu unterstützen.

#### 3) *Absenkung der Beleuchtung vor dem Schlaf*

Eine Aktivierung des Körpers durch helles Licht vor dem Schlafen sollte vermieden werden. Dies kann durch die Absenkung des Lichts in Innenräumen, Verringerung von Licht aus digitalen Endgeräten sowie das Aufsetzen von Brillen vor dem Schlafen erreicht werden.

### Konkrete Empfehlungen nach Schichtsystem

Empfehlungen für die Frühschicht:

- Aufenthalt unter Tageslicht insbesondere auf dem Heimweg und am frühen Nachmittag nach den Frühschichten und während der Pausen. Ziel war es, dass sich die Probandinnen und Probanden möglichst früh am Tag und möglichst lange im Freien unter Tageslicht aufhalten, ohne einen konfligierenden Reiz zu setzen, der einer möglichen Verschiebung des zirkadianen Rhythmus in der Frühschicht im Verlauf der Woche entgegenwirkt.
- Die Verringerung der melanopisch wirksamen Beleuchtung am Abend oder vor dem Schlafen wie beispielsweise durch Tablets oder Smartphones sollte zum einen durch den Einsatz von Blaulichtfiltern bei diesen Geräten, zum anderen durch geringere Nutzung oder Einsatz von Blaulicht-filternden Brillen erzielt werden. Konkret wurde empfohlen ca. zwei Stunden vor dem Schlafen die Blaulichtfilterbrille einzusetzen bzw. den Blaulichtfilter bei den Geräten einzuschalten.
- Es wurde empfohlen, beim Schlafen auf ausreichende Dunkelheit zu achten und den Schlafraum entsprechend zu verdunkeln. Sollte dies nicht möglich sein, sollte eine Schlafmaske verwendet werden.

## Empfehlungen für die Spätschicht

- Aufenthalt unter Tageslicht insbesondere am späteren Vormittag und Nachmittag vor der Spätschicht sowie während der Pausen. Ziel war es, dass sich die Probandinnen und Probanden möglichst lange im Freien unter Tageslicht aufhalten, ohne einen konfligierenden Reiz zu setzen, der einer möglichen Verschiebung des zirkadianen Rhythmus nach hinten in der Spätschicht im Verlauf der Woche entgegenwirkt.
- Die Verringerung der melanopisch wirksamen Beleuchtung am Abend oder vor dem Schlafen wie beispielsweise durch Tablets oder Smartphones sollte zum einen durch den Einsatz von Blaulichtfiltern bei diesen Geräten, zum anderen durch geringere Nutzung oder Einsatz von Blaulichtfilternden Brillen erzielt werden. Konkret wurde empfohlen ca. zwei Stunden vor dem Schlafen die Blaulichtfilterbrille einzusetzen bzw. den Blaulichtfilter bei den Geräten einzuschalten.
- Es wurde empfohlen, beim Schlafen auf ausreichende Dunkelheit zu achten und den Schlafraum entsprechend zu verdunkeln. Sollte dies nicht möglich sein, sollte eine Schlafmaske verwendet werden.

### 3.2.4.2 Auswahl der Materialien für die Lighting-Habits-Intervention

Für die Auswahl einer geeigneten blaulichtfilternden Brille sowie eines blaulichtfilternden Brillenaufsatzes für Teilnehmende, die Brille tragen, wurde der spektrale Transmissionsgrad verschiedener Brillen gemessen. Mit einer Sperrwirkung für kurzwellige Strahlung bis zu einer Wellenlänge von 490 nm kann die melanopische Lichtwirkung um 50% reduziert werden, wobei das Sehen kaum beeinflusst wird. Zur Bestimmung des Transmissionsgrades von Gläsern mit Blaulichtfilter wurden Spektralmessungen ohne ( $E_{e,\lambda,0}$ ) und mit Glas im Strahlengang ( $E_{e,\lambda,P}$ ) durchgeführt. Als Lichtquelle wurde eine Halogenglühlampe verwendet. Aus den Messdaten wurde der spektrale Transmissionsgrad  $\tau(\lambda) = (E_{e,\lambda,P})/(E_{e,\lambda,0})$  für jedes Glas ermittelt. Gemessen wurde mit dem Spektralmessgerät Spectralval 1511 (JETI Technische Instrumente, Jena). Insgesamt wurden als Brillenmodelle sechs unterschiedliche Brillen und Aufsätze getestet: AVOALRE (Brille), Cyxus (Clip), Suertree (Brille), HOUSON (Brille), KLIM Optic (Clip), KLIM Optic (Brille), und GOITEIA (Clip). Eine Übersicht ist im Anhang in Tabelle A 2; S. 76 zu finden. Bei der Untersuchung des spektralen Transmissionsgrades zeigte sich, dass die Brille von Suertree am effektivsten die melanopische Lichtwirkung reduzierte, so dass Beleuchtungsstärken bis 650 lx am Auge in der Lichtwirkung so reduziert werden, dass störende Effekte vermieden werden ( $MEDI < 250$  lx). Noch effektiver reduziert der Clip von GOITEIA die nichtvisuelle Lichtwirkung. Der melanopische Transmissionsgrad war um den Faktor 10 geringer als bei den anderen Brillengläsern (s. Abbildung A 8, S. 7776 im Anhang). Für Brillenträger wurde daher dieser Clip angeboten, alle anderen erhielten die Brille von Suertree.

Als weitere Materialien wurden den Teilnehmenden handelsübliche Schlafmasken in verschiedenen Ausführungen angeboten, um für wenig Lichteinflüsse beim Schlafen zu sorgen. Flyer und mit den Teilnehmern bei den Gesprächen entwickelte Zusammenfassungen von möglichen Verbesserungen oder Merksätzen für die Umsetzung der Empfehlungen wurden bei den Lighting-Habits-Gesprächen übergeben, ebenso zusätzliche Materialien (z. B. Aufkleber für digitale Endgeräte zur Erinnerung an Dimmung usw.).



### **3.2.4.3 Entwicklung der Software für Studienhandys und Einbindung von Empfehlungsprompts für das individuelle Freizeitverhalten**

Zur Unterstützung der Lighting-Habits-Intervention, für die Dokumentation der Speichelprobenahmen, und zur Erhebung von Lifestyle-Faktoren und Schläfrigkeit wurden Studienhandys eingesetzt. Für alle Schichtarten (Früh-, Spät-, Tag- und Nachtschicht) wurden Abfrage-Algorithmen (sogenannte Mock-ups) entwickelt, die die Erhebung verschiedener Aktivitäten (Arbeits- und Pendelzeiten, Schlaf, Ernährung, Sport, Unterhaltung und weitere) und subjektiver Untersuchungsendpunkte (Karolinska Sleepiness Scale, Informationen zu Schlaf) ermöglichte. Für die Speichelproben wurde eine ausführliche Anleitung zur Speichelprobenahme integriert (s. auch Kapitel 3.3.5.1).

### **Unterstützung der Lighting-Habits-Intervention mit den Mobilgeräten**

Für die Lighting-Habits-Intervention wurden aufbauend auf dem Konzept für Empfehlungen zur individuellen Verbesserung der Lichtprofile zu den spezifischen Zeitpunkten nach Schichttypen Empfehlungsprompts entwickelt, die konkrete Anleitungen für mögliche Lighting-Habits je nach Tageszeit und aktuellem Schichttyp geben. Insgesamt entwickelte das IPA in Zusammenarbeit mit XIMES GmbH acht Mock-ups für Früh- bzw. Tagschicht, Spätschicht und Nachtschicht sowohl mit als auch ohne Interventionsempfehlungen, die für den Einsatz bei den Erhebungen und der Lighting-Habits-Intervention geeignet waren. Diese wurden in Prototypen realisiert, getestet und für den Feldeinsatz vorbereitet. Insgesamt wurden für die Früh- und Spätschichten sechs Interventions-Prompts und zusätzlich Abfragen zur Nützlichkeit der Hinweise eingebaut. Diese konnten je nach Verlauf der Aktivitäten der Teilnehmenden mehrmals erscheinen. Die Interventionshandys eigneten sich für die spezifische Anweisung der geplanten Lighting-Habits-Empfehlungen und die Erhebung von Reaktionen bezüglich möglicher Verhaltensänderungen mittels der handybasierten Abfragen. Konkret waren dies Erinnerungen an die Verdunkelung des Schlafraums, Empfehlungen für den Aufenthalt im Freien unter Tageslicht, Empfehlungen für das Dimmen von digitalen Endgeräten bzw. Aufsetzen der blaulichtfilternden Brillen und die Verdunkelung der Schlafumgebung.

## **3.3 Studieninstrumente und statistische Analysen**

### **3.3.1 Rekrutierung und Studienpopulation**

#### **3.3.1.1 Auswirkungen von SARS-CoV2 und aktuellen Krisen**

Vor der ersten Feldphase T0 wurde ein Fragebogen zu SARS-CoV2 entwickelt und vor der vierten Feldphase T3 um weitere Fragen zu Belastungen aufgrund von anderen Krisen (politische, wirtschaftliche oder weitere Belastungen) ergänzt. Diese wurden im Rahmen der Interviews bei den Studienteilnehmenden eingesetzt. Die Belastungsangaben wurden mittels deskriptiver Analysen ausgewertet. Verschiedene Ansätze für die Einbeziehung der externen Belastung wurden miteinander sowie mit validierten Studieninstrumenten, wie z. B. dem Copenhagen Psychosocial Questionnaire (COPSOQ), verglichen.

#### **3.3.1.2 Nachrekrutierung**

Aufgrund der SARS-CoV2-Pandemie blieben die Rekrutierungszahlen in T0 und T1 hinter den Erwartungen zurück. In Abstimmung mit dem Forschungsbegleitkreis (3. Treffen des Forschungsbegleitkreises am 13.06.2022) wurde eine Nachrekrutierung nach Abschluss der Feldphase T1 durchgeführt. Diese sollte insbesondere eine ausreichende Anzahl Teilnehmender gewährleisten, um die Lighting-Habits-Intervention vor bzw. in T3 durchzuführen und kurzfristige Wirkungen von Beleuchtungsempfehlungen in der Freizeit zu Untersuchung. Im Vorfeld wurde daher geprüft, ob weitere Arbeitsbereiche des Unternehmens für eine Nachrekrutierung zur Sicherstellung ausreichender Fallzahlen in der Vergleichsgruppe in Frage kommen. Für die Nachrekrutierung wurden

erneut Informationsveranstaltungen und Rundgänge in den Arbeitsbereichen durchgeführt, die über Fragestellung, Studiendurchführung, Datenschutz und Aufwandsentschädigungen informierten. Insgesamt erklärten sich weitere  $n = 22$  Beschäftigte zur Teilnahme an der Studie bereit. Die Erstinterviews wurden entsprechend den Interviews bei der Baseline-Erhebung T0 im Anschluss an ausführliche Aufklärungsgespräche durchgeführt. Für die Durchführung der Feldphasen T2 und T3 wurde diese Probandengruppe in die Gesamtgruppe integriert und alle Studieninstrumente wie in den anderen Gruppen absolviert. Die Auswahl für die Lighting-Habits-Intervention erfolgte aus der gesamten Vergleichsgruppe für Beschäftigte ohne Nachtarbeit (s. Kapitel 3.3.1.3).

### *3.3.1.3 Randomisierte Auswahl der Lighting-Habits-Gruppe*

Unter den in der Nachrekrutierung im Sommer 2022 in die Studienpopulation aufgenommen Personen gab es nur einen geringen Anteil von Beschäftigten mit Nachtarbeit. Daher wurde beschlossen, die Auswahl für die Lighting-Habits-Intervention auf Beschäftigte ohne Nachtarbeit zu beschränken. Kurz vor der Durchführung der Feldphase T2 (24.10.2022) wurde aus allen Probandinnen und Probanden ohne Beleuchtungsintervention am Arbeitsplatz die Gruppe für die Lighting-Habits-Intervention zufällig ausgewählt. Von zwei Studienteilnehmenden, die über die Nachrekrutierung nach der Ziehung aufgenommen wurden, wurde eine Person der Lighting-Habits-Gruppe zugeordnet. Insgesamt wurden  $n = 26$  Teilnehmende ohne Tätigkeit im Dreischichtsystem aus der gesamten betrieblichen Vergleichsgruppe geschichtet und nach Rekrutierungszeitraum (Nachrekrutierung oder nicht) und Alter ( $< 45$  Jahre, 45 Jahre und älter) gezogen. Somit konnte für die Betrachtung der Lighting-Habits diese Gruppe einer Vergleichsgruppe ohne jegliche Intervention in T2 und T3 von  $n = 36$  gegenübergestellt werden. Eine Übersicht über die Ziehung befindet sich im Anhang (s. Tabelle A 4, S. 79).

### *3.3.1.4 Einführung der Lighting-Habits-Intervention*

Die Teilnehmenden der Lighting-Habits-Intervention wurden über ihre Auswahl informiert und geprüft, ob sie die Bereitschaft zur Teilnahme haben. Alle stimmten der Intervention zu. Sie wurden daraufhin zum ausführlichen Informationsgespräch im Anschluss an Feldphase T2 eingeladen, für das ein Leitfaden entwickelt wurde (Lighting-Habits-Gespräche). Dieser umfasste die Erklärung des wissenschaftlichen Hintergrundes, einige Fragen zu den üblichen Gewohnheiten) zur Ableitung möglicher Änderungsansätze (z. B. Kenntnis oder Anwendung von Blaulichtfiltern auf digitalen Endgeräten, die Erläuterung der bereitgestellten Materialien (blaulichtfilternde Brille, blaulichtfilternder Brillenaufsatz, Schlafmaske, Erinnerungskleber, Flyer) sowie die Übergabe der Flyer und Materialien. Außerdem wurden die Handyprompts an den Untersuchungstagen erläutert.

## *3.3.2 Erhebung und Analyse der Schlafdauer*

### *3.3.2.1 Untersuchung von Schlaf-Wach-Zyklen mittels Aktigraphie*

Zur Analyse der Schlaf-Wach-Zyklen wurden Aktigraphie-Geräte ActiGraph GT3X-BT (Actigraph, Pensacola, FL, USA) verwendet, die auf drei Achsen die Beschleunigung messen. In jeder Feldphase wurden diese möglichst kontinuierlich über einen Zeitraum von dreieinhalb bis vier Wochen wie eine Uhr am Handgelenk der nicht-dominanten Hand getragen. Wenn am Arbeitsplatz das Tragen von Uhren aus Sicherheitsgründen nicht zulässig war, wurden die Teilnehmenden gebeten, die Uhren zeitweise in der Hosentasche mitzuführen. Zusätzlich wurden die Teilnehmenden gebeten, Schlaftagebücher zu führen, die für jeden Tag der Feldphase auf einer Zeitskala von 24 Stunden die Dokumentation von Schlaf- und Arbeitszeiten, Krankheit, Sonderschichten oder anderen Abwesenheiten sowie Zeiten, in denen die Schlafuhren abgelegt wurden, zu notieren. Insgesamt wurden 270 Aktigraphie-Geräte mit Tagebüchern in den vier Feldphasen ausgegeben.

### *3.3.2.2 Ableitung von Schlafzeiten, Plausibilitätsprüfung und Validierung der Tragezeiten*

Die Aktivität wurde in 1-Sekunden-Intervallen aufgezeichnet und in 30-Sekunden-Intervallen gespeichert. Das Auslesen der Bewegungsdaten erfolgte über die Geräte-Software Actilife 6. Einschlaf- und Aufwachzeiten wurden mit Hilfe des Algorithmus von Cole und Kripke unter Hinzunahme von Informationen zu Geschlecht, Alter und Gewicht abgeleitet (Cole et al. 1992). Für die Plausibilitätsprüfung der Schlaf-Wach-Zyklen wurden zunächst die Schlaf-Wach-Zyklen mit den individuellen Tagebuch-Eintragungen unabhängig von zwei Mitarbeiterinnen verglichen. Mismatches wurden durch eine Wissenschaftlerin gesichtet und im Konsens korrigiert. Bei Vorliegen von Aktigraphie und Tagebuchdaten wurden Schlaf-Wach-Zyklen aus der Aktigraphie prioritär in einen Gesamtdatensatz in SAS, Version 9.4 überführt (m = 5.641 Schläfe aus Aktigraphie, m = 1.022 aus Tagebüchern).

#### **Validierung der Tragezeiten**

Da das Nicht-Tragen der Aktigraphie-Geräte aufgrund der Sicherheitsvorkehrungen während der beruflichen Tätigkeit im Betrieb zulässig war, wurde zusätzlich zu den Angaben von Ablegezeiten in den Schlaftagebüchern eine Trag-Zeit-Validierung (Wear-Time-Validation) anhand des Algorithmus nach Choi et al. durchgeführt (Choi et al. 2011). Potenzielle Nicht-Tragezeiten, die Phasen mit sehr wenig Bewegung aber möglicherweise kurzen Stößen oder Lageveränderungen beinhalten, wurden mit den Schlafzeiten verglichen. Entsprechend der Länge eines Schlafzyklus wurden Überlappungen zwischen Schlafzeiten und Zeiten ohne Bewegung von bis zu 90 Minuten zugelassen. Alle Schlafepisoden mit potenziellen Nicht-Tragezeiten von 90 Minuten oder länger, wurden von zwei Mitarbeitern mit Informationen aus Tagebüchern sowie der Feldphasendokumentation geprüft. Schläfe verblieben im Datensatz, wenn sie mit Tagebucheinträgen übereinstimmten oder hinsichtlich weiterer Schlafepisoden in der gleichen Feldphase und in der gleichen Schichtart als plausibel eingestuft wurden (weniger als eine Stunde Abweichung von Einschlaf- oder Aufwachzeit in der gleichen Schichtart). Wurde eine Schlafepisode als unplausibel eingestuft, wurden entweder Tagebuchzeiten verwendet oder die Schlafepisode entfernt. Insgesamt wurden so m = 146 Schlafepisoden ausgeschlossen und m = 37 Schlafepisoden aus den Tagebüchern ergänzt. Es erfolgte eine Plausibilitätsprüfung durch die Verknüpfung mit der Feldphasendokumentation, bei der insgesamt m = 108 Schlafepisoden ausgeschlossen wurden (Mismatch der Schlafzeiten mit Arbeitszeiten m = 76, Inplausibilität zwischen Logbuch und Aktigraphie m = 14 sowie bei der Validierung von Hauptschlaf und Naps m = 18). Insgesamt verblieben somit m = 5.451 Schlafepisoden aus der Aktigraphie und m = 995 aus den Schlaftagebüchern im Gesamtdatensatz.

### *3.3.2.3 Ableitung der Schlafdauer bei mehreren Schlafepisoden, Schlaftypisierung und Chronotypisierung*

Ein Schlaf wurde als Nachtschlaf definiert, wenn dieser zwischen 20 Uhr abends und 8 Uhr morgens stattfand, als Tagschlaf, wenn er zwischen 8 Uhr morgens und 20 Uhr abends stattfand. Schläfe, die nicht Tag- oder Nachtschlaf waren, wurden basierend auf der Schlafzeitmitte als Morgenschlaf (Schlafzeitmitte bis einschließlich 12 Uhr mittags) oder Nachmittagsschlaf bei einer Schlafmitte ab 12 Uhr definiert. Für Analysen der Schlafdauern, Schlafzeitmitten und Schlaflagen wurden Gesamtschläfe analysiert. Hierfür wurde für die gesamte Schlafdauer eines Hauptschlafes die Dauer zwischen zwei Schlafepisoden betrachtet. Schlafepisoden wurden als Schlaf zusammengefasst, wenn die Wachdauer bis zu einer Stunde und bei Schlaf in der Nacht bis unter zwei Stunden betrug. Als Schlafdauern wurden die Summen der einzelnen Schlafepisoden, als Schlafzeitmittelpunkte die zeitliche Mitte zwischen Schlafbeginn der ersten Schlafepisode und Schlafende der letzten Schlafepisode verwendet. Alle zusammengeführten Schlafepisoden wurden auf Plausibilität von einer Wissenschaftlerin gesichtet. Schläfe, die länger als 12 Stunden dauerten,

wurden ausgeschlossen. Bei mehreren hintereinander liegenden Schlafen mit längeren zeitlichen Abständen wurde die längste Schlafepisode als Hauptschlaf, alle weiteren als Nap definiert. Insgesamt wurden 23 Schlafe aus drei Schlafepisoden und 662 Schlafe aus zwei Schlafepisoden zu einer Hauptschlafdauer zusammengeführt,  $m = 5.053$  Schlafe stammen aus einer einzelnen Schlafepisode. Der Schlaf wurde unter Berücksichtigung des Schlaftyps (Tag-, Nacht-, Morgen- und Abendschlaf) hinsichtlich der Lage im Schichtsystem nach Schichtart und Werktag oder Wochenende typisiert. Dabei wurden acht Kategorien aus Schichtart und Werktag bzw. Wochenende gebildet (Schlaf an Werktagen in Früh-, Spät-, Nacht- oder Tagschicht, Schlaf an Wochenenden nach Früh-, Spät-, Tag- oder Nachtschicht). Der zeitlich eingeschränkte Schlaf in der Nacht vor Frühschicht oder Tagschicht wurde zum Werktag der entsprechenden Schichtart gruppiert, Tagschlafe nach der Schicht am letzten Schichttag vor dem Wochenende wurden zum Wochenende gruppiert.

Der Chronotyp wurde aus allen Hauptschlafen in Anlehnung an den Münchener Chronotyp Fragebogen für Schichtarbeitende gebildet (Juda et al. 2013). Hierfür wurde die Uhrzeit des Schlafzeitmittelpunkts an freien Tagen nach Spätschicht, korrigiert um den längeren Schlaf an arbeitsfreien Tagen, gebildet (entsprechend dem  $MSF_{sc}$ , *englisch mid sleep on free days after late shifts, sleep corrected*, Schlafmitte an freien Tagen nach Spätschicht, korrigiert nach längerem Schlaf am Wochenende). Bei Teilnehmenden in reinen Tagschichten oder Frühschichten wurden die korrigierten Schlafzeitmittelpunkte an freien Tagen nach Tag- bzw. Frühschicht verwendet. Bei fünf Teilnehmenden wurden andere mittlere Schlafzeitmittelpunkte eingesetzt (s. auch Rabstein et al. 2019). Eine Einteilung des Chronotyps in drei Gruppen wurde anhand des ersten und dritten Quartils des Chronotyps nach Uhrzeit durchgeführt (Frühtyp vor 3:07 Uhr, Intermediärtyp zwischen 3:07 Uhr und 5:07 Uhr und Spättyp nach 5:07 Uhr).

#### 3.3.2.4 Statistische Analyse

Für die Analyse der Schlafdauer wurden Schlafe, die länger als 12 Stunden dauerten, ausgeschlossen ( $m = 25$ ). Schlafe an Krankheitstagen, Tagen mit Urlaub oder freien Tagen ab dem dritten freien Tag, Tage mit Sonderschichten oder Wochenenden, bei denen die vorige Schichtart unklar war, wurden nicht betrachtet ( $m = 620$ ). Lagen zu wenige Schlafe in einer Feldphase vor, wurden diese ausgeschlossen ( $m = 1$ ). Schlafe von T2 und T3 wurden bei einer Probandin ausgeschlossen, die während der Studie das Schichtsystem wechselte ( $m = 43$ ). Daten eines Teilnehmenden mit diagnostiziertem Restless-Leg-Syndrom wurden ausgeschlossen ( $m = 74$ ). Naps von länger als sechs Stunden wurden als Hauptschlaf definiert, Hauptschlafe unter zwei Stunden als Nap. Insgesamt standen in dem Datensatz bei Einbeziehung von Aktigraphie-Daten und Schlafstagebüchern somit  $m = 4.975$  Schlafe (Hauptschlafe und Naps) in allen vier Feldphasen und bei allen Untersuchungsgruppen zur Verfügung. Alle Auswertungen wurden mit SAS (Version 9.4) durchgeführt. Im Rahmen der deskriptiven Analyse wurden Mittelwerte ( $M$ ) und 95%-Konfidenzintervalle (95%-KI) für Daten aus Aktigraphie und Tagebuchdaten berechnet. Als betriebliche Referenzgruppe wurden alle Studienteilnehmenden ohne Beleuchtungsintervention am Arbeitsplatz inklusive der Nachrekrutierten betrachtet.

In Interventionsstudien mit Vergleichsgruppen ist es generell von Interesse, ob sich die Entwicklungen der Gruppen im Zeitverlauf ähnlich gestalten. Diese Betrachtungsweise wird als Difference-in-Differences-Ansatz bezeichnet. Deshalb werden bei den deskriptiven statistischen Maßen die zeitlichen Entwicklungen hervorgehoben. In den statistischen Modellen wird dies über die Betrachtung von Interaktionstermen von Zeit und Gruppe modelliert, um zu prüfen, ob neben zeitlichen Effekten und Gruppeneffekten (unterschiedliche Ausgangsniveaus bei den Gruppen sind zulässig) ein Interaktionseffekt vorliegt.



Für die Auswahl eines Basismodells wurden potenzielle Einflussfaktoren im Rahmen von gemischten linearen Modellen unter Berücksichtigung der Messwiederholungen je Proband angewandt. Dies erfolgte in drei Modellen, bei denen die Dauer des Hauptschlafs an Arbeitstagen mit Frühschicht, Spätschicht oder Nachtschicht analysiert wurden. Zeigte ein Faktor in einem der drei Modelle einen potenziell modifizierenden Einfluss ( $p < 0,15$ ), wurde er für die weitere Analyse berücksichtigt. Als Vergleichsgruppe wurde hier von der Personengruppe ausgegangen, die an den ersten beiden Feldphasen teilgenommen hatte. Teilnehmende der Lighting-Habits-Intervention zu T3 wurden nicht betrachtet, da dies Änderungen beim Schlaf beinhalten könnte. Nach der Herkunft der Daten (Aktigraphie oder Schlaftagebücher) wurde adjustiert. Für die Analysen wurden Früh- und Tagschichten gemeinsam betrachtet. Für den späteren Beginn bei Tagschichten wurde adjustiert (Variable mit "Tagschicht" = 1 vs. "reguläre Frühschicht" = 0). Als potenzielle Confounder wurden folgende Faktoren betrachtet: Alter, Geschlecht, Body-Mass-Index, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt (Babys oder pflegebedürftige Erwachsene im Haushalt), Chronotyp (als dezimale Uhrzeit), üblicher Koffein-Konsum pro Tag (in mg/Tag), individueller Krisenscore als die maximal angegebene Belastung durch die SARS-CoV2-Pandemie, politische oder wirtschaftliche Krise zu T2 (gar nicht, wenig, etwas, ziemlich, sehr stark) und Einnahme von den Schlaf beeinflussenden Medikamente (Antidepressiva oder Benzodiazepine) und Bildungsniveau nach der Internationalen Standardklassifikationssystem für Bildung (ISCED) aus höchstem Schulabschluss und nachschulischem Bildungsabschluss in drei Kategorien (niedrig, mittel oder hoch) überprüft. Im Basismodell verblieben die Variablen Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Personen im Haushalt und Bildungsniveau.

Adjustierte Mittelwerte wurden für die Hauptschlafdauer an Arbeitstagen und Wochenenden nach Schichtart aus gemischten linearen Modellen mit Einflussfaktoren Feldphase (Baseline T0, T1, T2 und T3), Interventionsgruppe (Nachtlcht-Intervention, Taglicht-Intervention, Vergleichsgruppe ohne Nachrekrutierte und ohne Lighting-Habits-Intervention in T3) und der Interaktion aus Feldphase und Interventionsgruppe sowie Herkunft der Schlafinformation und Confoundern angewandt (SAS PROC GLIMMIX). Zur Berücksichtigung der Messwiederholungen je Studienteilnehmer wurde eine unstrukturierte Kovarianzmatrix angenommen. Interaktionsterme für die kurzfristigen und längerfristigen Effekte wurden mittels linearer Kontraste geschätzt. Die Analyse der Lighting-Habits-Intervention wurde mit dem gleichen Confounder-Set und für Feldphasen T2 und T3 der Lighting-Habits-Gruppe und reinen Vergleichsgruppe ohne Lighting-Habits-Intervention durchgeführt. Adjustierte Mittelwerte der Hauptschlafdauer sind angegeben für männliche Probanden im Alter von 40 Jahren, mit einem Chronotyp von 4:00 Uhr, ohne pflegebedürftige Angehörige, bei mittlerem Bildungsniveau. Grafiken zur Darstellung der adjustierten Mittelwerte wurden mit GraphPad PRISM Version 10 (GraphPad Software, La Jolla California, USA) erstellt.

### 3.3.3 Testung der psychomotorischen Vigilanz

#### 3.3.3.1 Durchführung der Testung der psychomotorischen Vigilanz

Zur objektiven Erhebung der Vigilanz wurde der 5-minütige Psychomotorische Vigilanztest (PVT-192®-Test) verwendet. Der PVT ist ein kurzer Reaktionszeittest, der drei Hauptparameter misst: die mittlere Reaktionszeit, Auslassungsfehler („performance lapses“) und Fehlstarts. Als mittlere Reaktionszeit [ms] wird die Zeit vom Stimulus bis zum Tastendruck definiert, bei der die performance lapses und Fehlstarts ausgeschlossen werden. Als performance lapses gelten Reaktionen, wenn zu langsam gedrückt wird, also  $\geq 355$  ms nach Stimulus. Als Fehlstart wird definiert, wenn die Reaktionszeit nach dem Stimulus  $< 100$  ms beträgt. Darüber hinaus werden weitere Endpunkte im Rahmen des PVTs errechnet, unter anderem wird der Throughput als ein kombinierter Index aus Reaktionszeit und Akkuratheit bestimmt, sowie die schnellsten und langsamsten 10% der Reaktionszeit. Außerdem wird der Reaktionszeitvariationskoeffizient (*englisch reaction time*

*coefficient of variation*, RTCV) als eine relative Reaktionszeitvariabilität berechnet. Der RTCV beschreibt die relative Variabilität der Reaktionszeiten und gibt an, wie stark die Reaktionszeiten einer Person im Verhältnis zu ihrem Durchschnitt schwanken.

Die PVT-Testung fand an allen Feldtagen (zwei Tage je Feldwoche) während der Schicht statt. Alle Teilnehmenden sollten an den ersten beiden Tagen einer Arbeitswoche in jeder Schichtart zur Mitte der Schicht einen PVT-Test durchführen. Aufgrund der SARS-CoV2-Pandemie konnten nur bis zu 8 Teilnehmende gleichzeitig an der Testung unter verstärkten Hygieneeinschränkungen teilnehmen. Für die Teilnehmenden wurden über alle Feldphasen möglichst die gleichen Zeitfenster hinsichtlich der Zeit seit Schichtbeginn für den Test angeboten (ungefähr 4 Stunden nach Schichtbeginn). Die Durchführung erfolgte immer im gleichen Raum unter den gleichen standardisierten Bedingungen, unter Verwendung von Ohrenstöpseln und in ausreichendem Abstand zu anderen Teilnehmenden.

### 3.3.3.2 Statistische Analyse

Für die Ermittlung von Schlafapnoe wurde der STOP-Bang Questionnaire (SBQ) verwendet und als „geringes Risiko“ oder „hohes Risiko“ angegeben. Außerdem wird die Schlafapnoe als Selbstangabe erfasst, ob eine vom Arzt diagnostizierte Diagnose besteht (ja/nein). Der Koffeinkonsum in Milligramm pro Tag wurde anhand der Getränkeangaben im Interview nach der Einteilung des Bundesinstitut für Risikobewertung berechnet. Zur Bestimmung der zirkadianen Präferenz wurde der rMEQ-Fragebogen (*englisch reduced Morningness-Eveningness Questionnaire*) verwendet.

Es wurde der Einfluss der Beleuchtungsinterventionen auf die mittlere Reaktionszeit mittels linearer gemischter Modelle (LMM) untersucht. Die Basismodelle je Schichtart umfassten die Feldphase und Gruppenzugehörigkeit sowie potenzielle Einflussfaktoren wie Alter, Geschlecht, Testtag, Schlafapnoerisiko, Chronotyp und Koffeinkonsum. Aus den Basismodellen wurden adjustierte Mittelwerte berechnet. Die Software R, Version 4.4.1 (R Core Team, Wien 2024) wurde zur statistischen Analyse und graphischen Darstellung der PVT-Daten verwendet.

### 3.3.4 Erhebung und Analyse der Schläfrigkeit

#### 3.3.4.1 Einsatz der Mobilgeräte in den Feldphasen und Untersuchung der Schläfrigkeit nach Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Für die Erhebung von Lifestyle-Faktoren und insbesondere der Schläfrigkeit wurden Mobilgeräte eingesetzt, für die eigens eine Software in Kooperation zwischen IPA und der Firma XIMES GmbH entwickelt wurde. Für jede Schichtart (Früh-, Spät-, Tag- und Nachtschicht) wurde ein Abfrage-Algorithmus entwickelt, der die Erhebung verschiedener Aktivitäten (Arbeits- und Pendelzeiten, Schlaf, Ernährung, Sport, Unterhaltung und weitere) ermöglichte. Während der Arbeitszeit wurden zu Schichtbeginn und darauf alle zwei Stunden mit einem Tonsignal an die Eingabe der Schläfrigkeit erinnert. Jeder Studienteilnehmende wurde in jeder Feldphase und jeder Schichtart seines Schichtsystems zwei Tage mit den Mobilgeräten begleitet. Die Daten wurden über einen Zeitraum von 48 Stunden gesammelt, indem den Teilnehmenden die Handys zu Beginn des ersten Arbeitstages je Feldwoche ausgehändigt und zu Beginn der dritten Arbeitsschicht der Feldwoche zurückgegeben wurden. Beispielsweise erfolgte bei den Personen, die in Nachtschicht arbeiteten, die Übergabe der Mobilgeräte am Sonntagabend um 22 Uhr zu Beginn der ersten Nachtschicht, die Rückgabe am Dienstagabend um 22 Uhr zu Beginn der dritten Nachtschicht. Die Schläfrigkeit wurde mittels der 10-skaligen Karolinska Sleepiness Scale (KSS) erhoben (1 = äußerst wach, 2 = sehr wach, 3 = normal wach, 4 = ziemlich wach, 5 = weder wach noch schläfrig, 6 = schläfrig, 7 = schläfrig, ohne Mühe wach zu bleiben, 8 = schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben, 9 = sehr schläfrig, große Mühe wach zu bleiben, 10 = äußerst schläfrig, kann nicht wach bleiben). Während

der Arbeitsschicht wurden die Teilnehmenden alle zwei Stunden durch ein Aufforderungssignal zur Eingabe der Schläfrigkeit aufgefordert, die sie entweder direkt oder auch zu einem späteren Zeitpunkt durchführen konnten. Zusätzlich wurde die Schläfrigkeit vor dem Zubettgehen und nach dem Schlaf erhoben. Die Teilnehmenden hatten außerdem die Möglichkeit ihre Schläfrigkeit bei der Angabe ihrer Tätigkeiten (Mahlzeiten, Freizeitaktivitäten und weitere) einzuschätzen. Ein Proband lehnte den Einsatz der Mobilgeräte ab. Insgesamt standen  $m = 5.644$  Eingaben für die Schläfrigkeit zur Verfügung. Für die Analyse wurde eine Mindestanzahl von mindestens zwei KSS-Eingaben je Untersuchungstag betrachtet, über alle Feldphasen wurden 270 Mobilgeräte ausgegeben. Aufgrund fehlender Datenpunkte wurde eine Person für die vorliegende Analyse ausgeschlossen.

### 3.3.4.2 *Statistische Analyse*

Insgesamt konnten  $m = 5.640$  Eigenangaben der Schläfrigkeit für die Analyse eingeschlossen werden. Für die statistische Analyse wurden die KSS-Angaben aggregiert nach den geplanten Zeitpunkten zur Dokumentation der Schläfrigkeit (vor dem Schlaf, nach dem Aufwachen). Während der Schicht wurden die Daten in stündlichen Intervallen zusammengelegt betrachtet. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle wurden für die Untersuchungsgruppen nach Schichtart (Frühschicht, Spätschicht und Nachtschicht) und Feldphasen bestimmt, wobei für T3 die Probandinnen und Probanden der Lighting-Habits-Intervention ausgeschlossen wurden. Generalisierte additive gemischte Modelle für die Kurzzeiteffekte zwischen T0 und T1 mit den Faktoren Interventionsgruppe, Feldphase und deren Interaktion adjustiert nach Geschlecht und Alter wurden angewandt, um die Verläufe der Gruppen zwischen T0 und T1 zu vergleichen.

## 3.3.5 *Analyse von Melatonin und Cortisol im Speichel*

### 3.3.5.1 *Durchführung und Dokumentation der Speichelprobenahme mit den Studienhandys*

Wegen der besonderen Rolle von Melatonin als Zeitgeber für die zirkadianen Rhythmen im Körper und dessen nächtlicher Ausschüttung wurde Melatonin im Speichel für die aktuell in Nachtschicht beschäftigten Studienteilnehmenden erhoben. Als weiteres Hormon mit einem starken Tagesgang wurde Cortisol untersucht. Für die Profilanalyse wurden jeweils acht Speichelproben am ersten und zweiten Untersuchungstag in Feldwochen mit Nachtschicht in der Interventionsgruppe genommen. Für die Dokumentation der Speichelprobenahmen wurden die entwickelten Studienhandys eingesetzt. Für die Speichelproben wurde eine ausführliche Anleitung zur Speichelprobenahme integriert. Zu vorgegebenen Zeitpunkten während der Nachtschicht wurden Tonsignale eingesetzt, um die Studienteilnehmenden an die Speichelprobenahme zu erinnern. Für die Entnahme von Proben vor und nach dem Schlafen (direkt vor dem Schlafen, direkt nach dem Schlafen und 30 Minuten nach dem Schlafen) mussten die Teilnehmenden aktiv die Probenahme bei den Studienhandys anwählen. Mit Aktivierung der Probenahme bei den Mobilgeräten wurde die Anleitung zur Speichelprobenahme inklusive der Aufforderungen zur Eingabe der Probenbehälternummer gestartet.

Die Studienteilnehmenden wurden mittels der Studienhandys detailliert zur Speichelprobenahme und Dokumentation der Behälternummer instruiert. Beginnend mit der ersten Speichelprobe zu Beginn der ersten Nachtschicht der Feldwoche erfolgte während der Nachtschichten alle zwei Stunden eine Erinnerung zur Speichelprobenahme mit Dokumentation bis zum Ende der Nachtschicht. Direkt vor dem Schlafen sowie direkt nach dem Aufwachen und 30 Minuten nach dem Aufwachen wurden weitere drei Speichelproben genommen. Die Teilnehmer wurden angewiesen, mindestens 30 Minuten vor jeder Probenentnahme auf das Zähneputzen und Essen zu verzichten. Die zu Hause entnommenen Proben wurden im Kühlschrank aufbewahrt, die am Arbeitsplatz entnommenen Proben wurden zu verschiedenen Zeitpunkten zum Studienteam, das vor Ort war, ge-

bracht und dort sofort gekühlt. Im Anschluss an die beiden Untersuchungstage wurden die Speichelproben gekühlt zu IBL, Hamburg, transportiert, dort aliquotiert und bei -80°C gelagert. Die Hormone im Speichel wurden mit Enzymimmunoassays bestimmt (Melatonin als N-Acetyl-5-methoxy-tryptamin mit ELISA, RE54041, IBL International GmbH, Intra-Assay Variationskoeffizient (VK) im Bereich von 17,0% für Tagesproben und 13,9% Nachtproben; Cortisol als Hydrocortison ELISA, RE52611, IBL International GmbH, Intra-Assay VK bei 4,3% und Inter-Assay VK von 13,2%).

Die Zuordnung der Zeitpunkte der Speichelprobenahme erfolgte anhand der automatischen Zeitstempel und Dateneingaben zur Speichelprobenahme auf dem Mobilgerät. Diese wurden von der Firma XIMES übermittelt und in SAS mit den Speicheldaten verlinkt. In T0 wurde von N = 14 Probanden und Probandinnen der Gruppe mit Nachtlicht-Intervention und von N = 3 Teilnehmenden der Vergleichsgruppe mit Nachtschichten Speichelproben gesammelt. In Abstimmung mit dem Forschungsbegleitkreis wurde im weiteren Verlauf aufgrund des geringen Anteils von Teilnehmenden mit Nachtschicht in der Vergleichsgruppe die Sammlung von Speichelproben primär auf die Nachtlicht-Interventionsgruppe beschränkt. Insgesamt konnten für die Gruppe der Nachtlicht-Intervention somit m = 675 Speichelproben (m = 206 in T0, m = 149 in T1, m = 134 in T2, m = 186 in T3) untersucht werden. Es konnten bei Cortisol m = 24 Proben nicht bestimmt werden.

### *3.3.5.2 Statistische Analyse*

Für die statistische Analyse der Melatonin-Daten wurden Messungen, die außerhalb der unteren und oberen Bestimmungsgrenze (0,854 und 50 pg/ml) lagen, mittels eines multiplen Imputations-Verfahrens geschätzt (Lotz et al. 2013). Dies waren in T0 m = 29 (14%), T1 m = 3 (2%) und T2 m = 15 (11%) und T3 m = 11 (6%) der Messungen. Die Auswertungen der Hormonprofile umfassen die Bestimmung von geometrischen Mittelwerten mit 95%-Konfidenzintervallen pro Probenahme-Zeitpunkt nach Untersuchungsgruppe und Feldphase. Hierbei wurden die Daten bezogen auf die beiden aufeinanderfolgenden Untersuchungstage zusammengelegt. Für die Darstellung in Boxplots wurden die log-transformierten Daten verwendet.

## *3.3.6 Analyse von Cortisol im Haar*

### *3.3.6.1 Durchführung und Dokumentation der Haarprobenahme*

Um den Stress der Studienpopulation als objektiven Parameter zu bestimmen, wurden bei den Teilnehmenden im Rahmen der Studie Haarproben entnommen, um darin die Haarcortisol-Konzentration (HCC) als Marker für Langzeit-Stress zu messen. Für die Probenahme wurden jeder teilnehmenden Person pro Feldphase einige Haarsträhnen (Durchmesser von mindestens 3 mm) am Hinterkopf so nah wie möglich an der Kopfhaut mit einer Länge von 1-2 cm entnommen. Diese Haarprobe ermöglichte mittels Immunoassay die Messung des langzeitintegrierten Cortisolspiegels im Labor (Dresden Lab Service GmbH). Zusätzlich füllten die Teilnehmenden zu jeder Haarprobe einen Fragebogen mit Begleitinformation aus. Diese umfassten das Geschlecht, kritische Lebensereignisse in den vergangenen 12 Monaten, chronische Erkrankungen oder Medikamenteneinnahmen und verschiedene durchgeführte Haarbehandlungen. Die Haarproben wurden bei Durchführung der Erstinterviews zu Beginn von T0, nach Ende von T1, während T2 und während T3 genommen.

### 3.3.6.2 *Statistische Analyse*

Die deskriptive Analyse der Studienpopulation zur Baseline erfolgte mittels Berechnung von Mittelwerten (M) und Standardabweichungen (SD) für kontinuierliche Angaben sowie den absoluten und relativen Häufigkeiten für kategoriale Angaben.

Für die deskriptive Analyse der Haarcortisol-Konzentration (HCC) wurden für die verschiedenen Interventionsgruppen zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten (Baseline T0, T1, T2, T3) geometrische Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle berechnet, um die HCC-Daten zu beschreiben. Diese deskriptive Statistik der HCC-Daten wurde sowohl tabellarisch als auch in Liniendiagrammen erstellt.

Um die Einflüsse der Beleuchtungsinterventionen auf die HCC der Teilnehmenden im Verlauf der Zeit zu untersuchen, wurde ein lineares gemischtes Modell (LMM) angewendet. Das Modell beinhaltete die logarithmierten Werte der HCC als abhängige Variable, feste Effekte für die Interventionsgruppe, die Messzeitpunkte (Feldphase) sowie die Interaktion zwischen diesen beiden Variablen. Um weitere mögliche Einflussfaktoren auf die HCC zu kontrollieren, wurden mögliche Einflussgrößen wie Geschlecht, Alter, Body Mass Index (BMI), kritische Lebensereignisse in den letzten 12 Monaten, Führungsposition, subjektive Krisenbelastung sowie subjektive Arbeitsplatzbelastung (NASA-TLX) als feste Effekte in das Modell integriert. Außerdem wurden die Personen als Random Intercept in das Modell aufgenommen, um Korrelationen aufgrund wiederholter Messungen innerhalb der Personen zu berücksichtigen. Für eine verbesserte Schätzung der Teststatistik (Verringerung der Verzerrung aufgrund der Schätzung der Varianzkomponenten) bei LMM wurde für die Schätzung der Freiheitsgrade und die Berechnung der p-Werte die Kenward-Roger-Methode verwendet. Für die Darstellung der HCC für jede Interventionsgruppe über die Zeit aus dem LMM, wurden adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervalle berechnet. Die Exponentialfunktion wurde angewendet, um die logarithmierten Werte der HCC aus dem Modell in die ursprüngliche Skala zu transformieren.

### 3.3.7 *Analyse der individuellen Beleuchtungswahrnehmung*

#### 3.3.7.1 *Durchführung und Dokumentation der Beleuchtungseinschätzung*

Um eine subjektive Einschätzung der Studienpopulation bezüglich der Beleuchtung während der Arbeitsschicht zu erhalten, bewerteten die Teilnehmenden in einem Fragebogen die Helligkeit und die Lichtfarbe der Hallenbeleuchtung. In diesem Fragebogen schätzten die Teilnehmenden für jede Schichtart je Feldphase ein, ob die Helligkeit der Beleuchtung "unangenehm dunkel", "eher zu dunkel", "angenehm/ich konnte gut arbeiten", "eher zu hell" oder "unangenehm hell" war. Die Lichtfarbe der Beleuchtung bewerteten die Teilnehmenden nach "unangenehm kalt (weiß-bläulich)", "eher zu kalt", "angenehm/ich konnte gut arbeiten", "eher zu warm" oder "unangenehm warm (gelb-orange)". Diese Bewertung wurde zu fünf Zeitpunkten während der Schicht vorgenommen: Zu Beginn der Schicht, etwa zwei Stunden nach Schichtbeginn, in der Mitte der Schicht, etwa sechs Stunden nach Schichtbeginn und am Ende der Schicht.

#### 3.3.7.2 *Statistische Analyse*

Die deskriptive Analyse der Studienpopulation zur Baseline erfolgte mittels Berechnung von Mittelwerten (M) und Standardabweichungen (SD) für kontinuierliche Angaben sowie den absoluten und relativen Häufigkeiten für kategoriale Angaben.

Für die deskriptive Analyse der Angaben zur Einschätzung der Beleuchtung in Hinblick auf die Helligkeit und die Lichtfarbe wurden für die verschiedenen Interventionsgruppen zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten (Baseline T0, T1, T2, T3), Schichtarten und Zeitpunkten in der



Schicht je die Anzahl und der Anteil der Angaben zu “angenehm” berechnet. Diese Angaben wurden in zwei Tabellen nach Helligkeit und Lichtfarbe dargestellt.

### 3.3.8 Qualitätssicherung

Für die Studieninstrumente wurden im Rahmen des Qualitätsmanagements alle notwendigen SOPs erstellt und geprüft. Die SOPs wurden in die IPA-Biobank überführt. Darüber hinaus wurden die Datenerhebung und die Datenspeicherung sowie die Überführung der Daten und Proben in die Biobank nach internationalen Standards nach den FAIR-Prinzipien (Findable Accessible Interoperable Reusable) dokumentiert. Dies stellt sicher, dass die Fragestellungen langfristig und qualitätsgesichert ausgewertet werden können und die Studie auch im Nachgang für gepoolte Studien verwertbar ist.

Für die Qualitätssicherung der Daten wurden alle Rohdaten auf Plausibilität geprüft. Unplausible Daten wurden entweder mittels der Feldphasendokumentation oder je nach Endpunkt im Konsens mit den beteiligten Wissenschaftlern behandelt. Änderungen von Dateneinträgen wurden dokumentiert und Versionierungen der Datensätze in SAS für die Projektpartner laufend transferiert.

### 3.3.9 Begleitende lichttechnische Messungen während der Feldphasen

Während der Untersuchungswochen erfolgten in beiden Versuchshallen in jeder Feldphase kontinuierlich alle 10 min Messungen mit dem Globalmessgerät. Auf diese Weise wurden die zeitlichen Verläufe für die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) und die Beleuchtungsstärke ( $E_{\text{vert}}$ ) während aller Feldphasen an einem festen Messort kontinuierlich gemessen. Je Feldphase wurden drei Untersuchungswochen mit jeweils fünf Arbeitstagen ausgewertet. Bei einer zeitlichen Auflösung von 10 min liegen den Daten sechs Messungen je Stunde, 144 Messungen am Tag, 720 je Untersuchungswoche und 2160 Messungen je Feldphase zugrunde.

Gleiche zeitliche Verläufe der Beleuchtungsparameter während der Feldphasen T1, T2 und T3 sollten sich in vergleichbaren Messgrößen am Globalmessgerät widerspiegeln. Die Auswertung der Messdaten vergleicht daher Mittelwerte und Standardabweichungen für Zeiträume ohne Änderung in den Beleuchtungsparametern und ohne Tageslicht für definierte Steuerwerte zwischen den Feldphasen. Die Steuerwerte und die zugehörigen Zeiträume für die Bestimmung der Kennwerte der Beleuchtungssteuerung sind in Tabelle 3 angegeben.

**Tabelle 3. Steuerwerte und zugehörige Zeiträume für die Bestimmung der Kennwerte der Beleuchtungssteuerung**

Halle/ Feldphase	Steuerwerte:	Zeitraum
<i>Halle 1</i>	<i>CCT   Lichtleistung</i>	
T0	4000 K   50%	5 Uhr bis 7 Uhr und 18 Uhr bis 22 Uhr
T1, T2, T3	3000 K   50%	① 20:30 Uhr bis 4 Uhr
<i>Halle 2</i>	<i>CCT   Lichtleistung</i>	
T0	3800 K   70%	22 Uhr bis 6 Uhr
	3800 K   70%	① 18 Uhr bis 21:30 Uhr
T1, T2, T3	4800 K   100%	② 22:30 Uhr bis 2 Uhr
	3000 K   70%	③ 3 Uhr bis 5 Uhr

CCT: ähnlichste Farbtemperatur

### 3.3.10 Analyse der Lighting-Habits-Intervention

#### 3.3.10.1 Erhebung der Empfehlungs-Umsetzung mit Fragebögen und Studienhandys

Für die Erhebung von Verhaltensänderungen und subjektiven Einschätzungen zur Wirksamkeit der gegebenen Empfehlungen wurde ein Fragebogen entwickelt, der sowohl zu Beginn von T3 – also nach der Einführung der Lighting-Habits-Empfehlungen zwischen T2 und T3 – als auch am Ende der Feldphase T3 eingesetzt wurde. Dabei wurde erfasst, ob die gegebenen Empfehlungen ausprobiert bzw. umgesetzt wurden. Außerdem wurde erhoben, wie die Wirksamkeit der gegebenen Empfehlungen eingeschätzt wurde. An der Fragebogen-Erhebung zu den Empfehlungen nahmen zu Beginn der Feldphase T3, d. h. nach dem Erprobungszeitraum zwischen dem Lighting-Habits-Gespräch (s. Kapitel 3.2.4),  $n = 23$  (88%) Personen teil, nach Abschluss von T3 wurden  $n = 16$  (62%) Erhebungsbögen eingereicht.

Die Empfehlungen zu Licht in der Freizeit wurden an den Untersuchungstagen in T3 mit den spezifisch hierfür entwickelten Prompts der Studienhandys vermittelt (s. Kapitel 3.2.4). Teilnehmende der Lighting-Habits-Gruppe erhielten an den ersten beiden Arbeitstagen je Feldwoche in T3 (Früh- und Spätschicht bzw. nur Früh- oder Tagschicht) Studienhandys mit Empfehlungsprompts. Für Frühschichten waren dies konkret die Empfehlungen:

- nach der Frühschicht ans Tageslicht zu gehen (individueller Zeitpunkt nach Beendigung des Status „Arbeit“ im Studienhandy),
- beim Schlafen die Schlafumgebung abzudunkeln oder eine Schlafmaske zu verwenden (individueller Zeitpunkt, wenn Schlafbereitschaft angegeben wurde),
- bei Nutzung von Bildschirmen, Fernsehen oder Handys die blaulichtfilternden Brillen aufzusetzen, wenn geplant war, in den nächsten zwei Stunden Schlafen zu wollen (bei Angaben zum Freizeitverhalten mit entsprechenden Aktivitäten).

Für die Spätschichten unterschieden sich die Empfehlungen nur hinsichtlich des Zeitraums der Tageslicht-Empfehlungen, die im zeitlich gleichen Zeitraum aber vor der Arbeitsschicht gegeben wurden. Hier wurde empfohlen, ab Mittag möglichst viel Zeit am Tageslicht zu verbringen. Jeder Empfehlungsprompt wurde über spezifische Felder mit einer Antwortmöglichkeit zur Nützlichkeit der gegebenen Empfehlung beendet („Danke, mache ich“ oder „Der Hinweis ist für mich nicht hilfreich“). Hinsichtlich der Verdunklung der Schlafumgebung konnte angegeben werden, ob die Schlafmaske eingesetzt wurde, der Schlafrum verdunkelt oder beides („Danke, ich dunkle den Schlafrum ab“, „Danke, ich nehme die Schlafmaske“, „Der Hinweis ist für mich nicht hilfreich“ oder „Danke, ich mache beides“). Insgesamt wurden über die Studienhandys 220 Empfehlungsprompts in Feldphase T3 gegeben.

#### 3.3.10.2 Erhebung der Beleuchtung in der Freizeit durch individuelle Lichtmessung mit LightWatchern

Für die Analyse der individuellen Lichtprofile in der Freizeit standen zehn LightWatcher® (Technologieberatung Wolf, Object Tracker, Wien) zur Verfügung. Diese sammelten Daten zu Beleuchtungsstärke, Licht in verschiedenen Spektralbereichen (rot 620 nm, grün 540 nm, blau 465 nm) sowie weiteren Parametern in 10-Sekunden-Abständen. An den Feldtagen von T2 und T3 sollten die LightWatcher für jeweils ca. 24 Stunden in jeder Schichtart (Früh-, Tag- oder Spätschicht) der Teilnehmenden aus der Gruppe mit Lighting-Habits-Intervention und der Vergleichsgruppe ohne Interventionen getragen werden. Vor dem Tragen wurden die Teilnehmenden über das korrekte Tragen des Messgerätes aufgeklärt. Der LightWatcher sollte mit Hilfe der magnetischen Brosche auf Höhe des linken Schlüsselbeines auf der äußersten Kleidungsschicht getragen werden. Der Sensor sollte dabei nach oben zeigen. Während der Schlafenszeit sollte er auf dem Nachttisch (nahe am Kopfende des Bettes, mit dem Lichtsensor in Richtung Lichtquelle/ Fenster) abgelegt werden. Bei

den Übergaben der Studienhandys zu Beginn der Feldwoche wurden die LightWatcher zunächst in der Frühschicht ausgegeben und am nächsten Tag eingesammelt, um dann an die Teilnehmenden in Spätschicht weitergegeben zu werden. Längere Profile (mit Messungen über 24 Stunden hinaus) wurden beibehalten, wenn der Empfehlungszeitraum für die Tageslicht-Exposition untersucht werden konnte. Falls LightWatcher nicht vergeben werden konnten (beispielsweise, wenn Teilnehmende aufgrund von Krankheit abwesend waren), wurden diese an weitere Teilnehmende (ggf. als Zweitprofil) weitergegeben. Insgesamt wurden  $m = 145$  Profile für die Analyse der Tageslichtexposition im Empfehlungszeitraum 12 Uhr bis 18 Uhr analysiert, davon  $m = 18$  als Doppelvergaben (mehr als ein Profil je Schichtart und Feldphase je Person).

### 3.3.10.3 Statistische Analyse

Die statistische Analyse der Umsetzung der Lighting-Habits-Intervention erfolgte mit der Auswertung der Befragungen und der Analyse der Reaktionen auf die Prompts der Studienhandys. Die Lichtdaten der LightWatcher wurden mittels der Gerätesoftware OT Sensor (Wolf Technologieberatung, Wien) ausgelesen. Die Kalibrierung wurde anhand der vom Hersteller bereitgestellten Kalibrierungsdateien für jeden Sensor vorgenommen. Die Rohdaten wurden in SAS, Version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) weiterverarbeitet und mit den Vergabedaten aus der Feldphasendokumentation verknüpft. Wenn durch die Kalibrierung negative Werte für die Beleuchtungsstärken vorlagen, wurden die Licht-Messwerte auf 0 gesetzt. Nicht-Tragezeiten (z. B. beim Schlafen) waren zulässig. Für die Analyse des Freizeitverhaltens wurde der Aufenthalt unter Tageslicht im Empfehlungszeitraum zwischen 12 Uhr und 18 Uhr (bei Frühschichten möglichst früh am Tag nach der Frühschicht, bei Spätschichten möglichst am Nachmittag vor der Spätschicht) betrachtet. Für Feldphasen T2 und T3 nach Früh- und Spätschicht wurden hierfür die Beleuchtungsstärken über 1000 lx als approximativer Indikator für den Aufenthalt unter Tageslicht gewählt. Für die Bestimmung der Dauer unter Tageslicht im Empfehlungszeitraum wurde eine Glättung der Beleuchtungsstärke mit jeweils 31 Zeitpunkten (5 Minuten) gewählt und Dauern des Aufenthalts über 1000 lx innerhalb der gewählten Tageszeit berechnet. Für die Analysen wurden der Anteil Lichtprofile mit weniger als 5 Minuten sowie geometrische Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen für längere Dauern berechnet.

### 3.3.11 Übertragbarkeit auf andere Beleuchtungssysteme

In der Projektplanung waren Vergleichsmessungen unter Realbedingungen mit dynamischer Beleuchtung mindestens eines weiteren Herstellers vorgesehen, um die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu sichern. Aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie waren diese nicht möglich. Alternativ wurden daher zum einen Messungen an einem Laboraufbau vorgenommen, indem zwei unterschiedliche Leuchtentypen eingesetzt wurden, und zum anderen erfolgten Simulationen in DIALux, einer Software für die Lichtplanung, mit marktverfügbaren Leuchten mit dynamischer Beleuchtung von fünf anderen Herstellern (Reilecke 2022).

#### 3.3.11.1 Untersuchung im Laboraufbau

##### Versuchsaufbau

In Anlehnung an die Praxisbedingungen wurde ein Montagearbeitsplatz mit integrierter Arbeitsplatzleuchte in einem Versuchsraum aufgebaut, in dem neben der Leuchte der TRILUX GmbH & Co. KG (Leuchte 1) auch eine dynamische Leuchte eines anderen Herstellers (Leuchte 2) als Allgemeinbeleuchtung verbaut wurde. Der Versuchsraum besitzt drei verspiegelte Seitenflächen, um den visuellen Eindruck eines größeren Hallenbereichs zu simulieren. Die Einstellungen für die Allgemeinbeleuchtung im Laboraufbau wurden so vorgenommen, dass sie vergleichbar zu den Ergebnissen der Basismessung an den Arbeitsplätzen (horizontale Beleuchtungsstärke auf der Tischfläche  $E = 500$  lx, Lichtfarbe CCT = 2700 K bis 6500 K, Tischhöhe 0,95 m, Steharbeitsplatz)

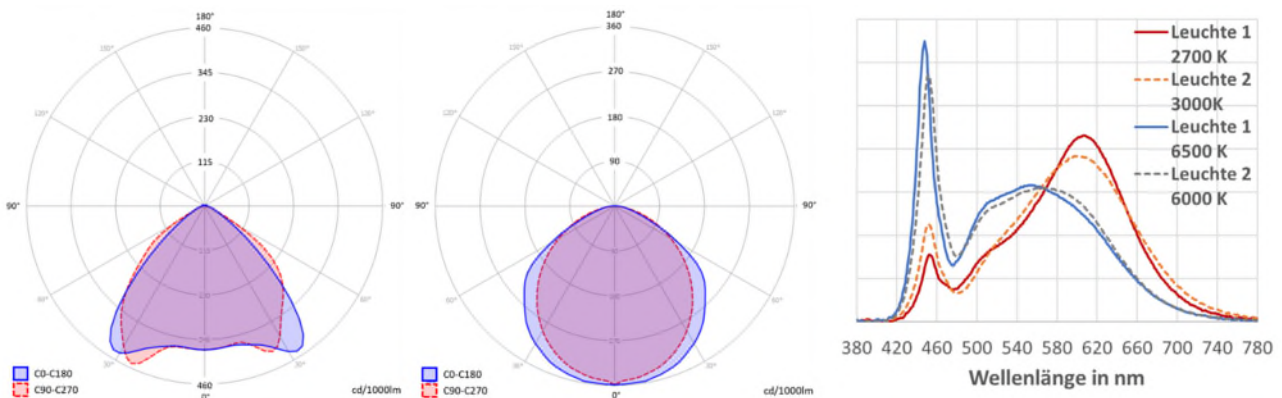


in der Praxis waren. Die Arbeitsplatzbeleuchtung war identisch zu derjenigen, die in den Montagehallen eingesetzt wird, und wurde in der gleichen Höhe von 1,3 m über Tischhöhe montiert. Abbildung 8 zeigt den Laboraufbau.



**Abbildung 8. Grundaufbau des Laborarbeitsplatzes im verspiegelten Versuchsraum mit identischer Arbeitsplatzleuchte (APL) wie in der Felduntersuchung (links); mit einer Blende modifizierter Arbeitsplatzleuchte und unterschiedlichen Leuchten für die Allgemeinbeleuchtung (rechts). Beide Leuchten sind symmetrisch zum Arbeitsplatz und mittig im Raum angeordnet.**

In Abbildung 9 sind für beide untersuchte Leuchtentypen jeweils die Lichtstärkeverteilung, die die Lichtabstrahlcharakteristik einer Lichtquelle beschreibt, in den Ebenen C0-180 und C90-270 gezeigt. Außerdem sind die Spektren für warmweiße und tageslichtweiße Lichtfarben der beiden Leuchten dargestellt. Unterschiede im Leuchtenlichtstrom wurden durch die Wahl der Steuerwerte für die Lichtleistung ausgeglichen.



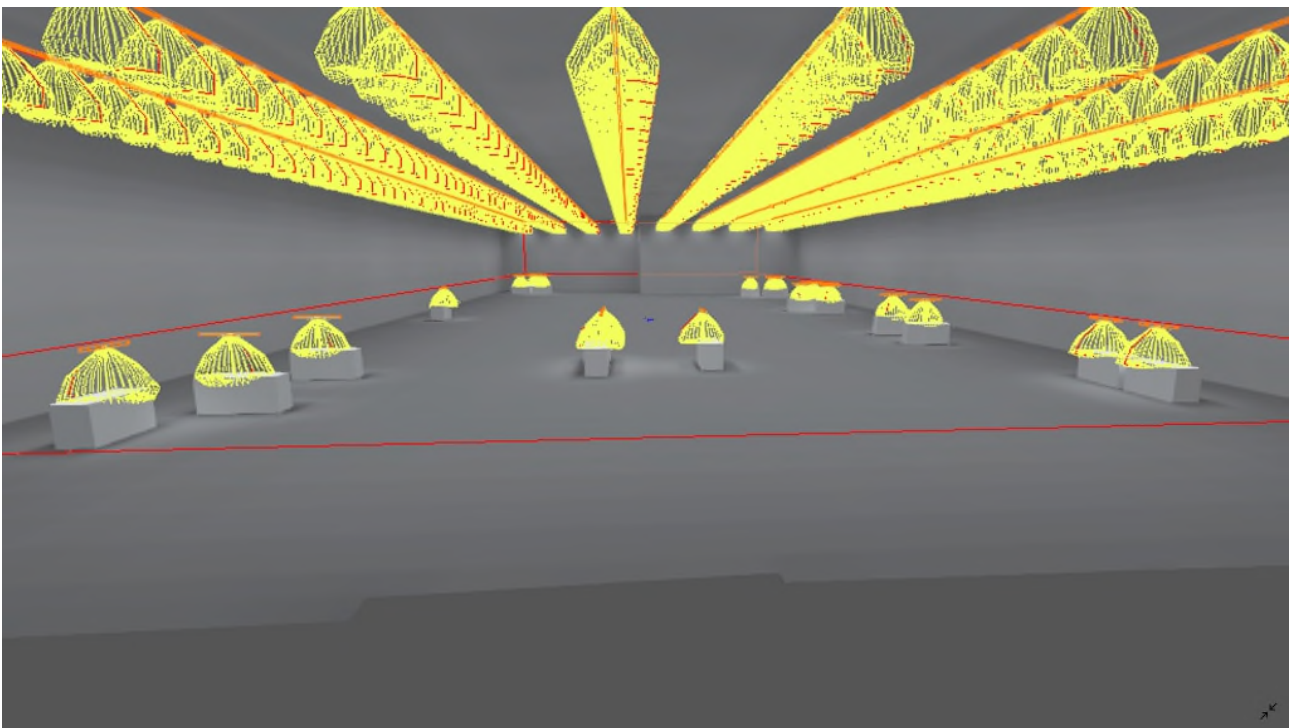
**Abbildung 9. Lichtstärkeverteilung in charakteristischen Ebenen (C0-180 und C90-270) der Leuchte 1 (links) und der Leuchte 2 (Mitte); relative spektrale Verteilungen beider Leuchten für unterschiedliche Lichtfarben, normiert auf gleichen Lichtstrom (rechts)**

### Messmethodik

Die Messungen erfolgten mit gleicher Messgeometrie und Methodik wie in den Untersuchungshallen gemäß Abbildung 4, S. 13. Betrachtet wurden die horizontale Beleuchtungsstärke in der Tischoberfläche, die vertikale Beleuchtungsstärke, die in Augenhöhe bei 1,6 m gemessen wurde, sowie die MEDI-Werte.

### 3.3.11.2 Simulation in DIALux

Um zu zeigen, dass auch andere als die im Feldversuch verwendeten Leuchten geeignet sind, um nichtvisuelle Lichtwirkungen gezielt zu variieren, wurden marktverfügbare Leuchten recherchiert. Für die Simulation wurden fünf Leuchten mit variabler Lichtfarbe von anderen Herstellern ausgewählt (Informationen zu den untersuchten Leuchten siehe im Anhang in Tabelle A 1 und in Abbildung A 7, ab S. 74). Auf Basis der lichttechnischen Daten und der Lichtstärkeverteilung der unterschiedlichen Leuchten wurden Simulationen in DIALux durchgeführt und mit den Simulationsergebnissen der Leuchte 1 (Leuchtentyp, der in den Versuchshallen installiert ist) verglichen. Grundlage für die Simulation war der Hallenplan der Montagehalle 2 mit 21 Arbeitsplätzen und entsprechender Leuchtenanordnung. Für die Arbeitsplätze wurden Quader der Breite 2 m und der Tiefe 0,77 m sowie einer Höhe von 0,95 m genutzt und entsprechend den Gegebenheiten im Lageplan angeordnet. Abbildung 10 zeigt eine Darstellung der Montagehalle 2 mit eingeschalteter Beleuchtung in der Halle und an den Arbeitsplätzen, wie sie in DIALux für die Berechnungen genutzt wurden (Reilecke 2022).



**Abbildung 10. Darstellung der Montagehalle 2 in DIALux mit eingeschalteter Beleuchtung in der Halle und an den Arbeitsplätzen**

Für alle Leuchtentypen wurden die horizontale Beleuchtungsstärke  $E_{\text{hor}}$  auf der Oberfläche des Arbeitsplatzes und die vertikale Beleuchtungsstärke  $E_{\text{vert}}$  in Augenposition einer am Arbeitsplatz stehenden Person berechnet, entsprechend der Messgeometrie nach Abbildung 4, S. 13. Für die Vergleichbarkeit wurden die Leuchtenlichtströme einheitlich je Leuchtentyp angenommen und als Bezugswert der niedrigste Leuchtenlichtstrom gewählt. Die Simulationen wurden für zwei Szenarien ohne und mit arbeitsplatzbezogener Beleuchtung durchgeführt.

## 4 Ergebnisse des Gesamtvorhabens

### 4.1 Rekrutierung und Studienpopulation

Das Studiendesign umfasste für die Umsetzung von dynamischer Beleuchtung am Arbeitsplatz zwei Beleuchtungsinterventionen, die in Halle 1 (Taglicht-Intervention) und Halle 2 (Nachtlicht-Intervention) eingeführt wurden. Die Feldphasen T0 und T2 fanden im Zeitraum November 2021 und 2022 statt, Feldphasen T1 und T3 im Januar und Februar 2022 und 2023. Insgesamt wurden  $n = 67$  Studienteilnehmende gewonnen, die am Baseline-Interview T0 teilgenommen haben. Hier-von kamen  $n = 27$  Teilnehmende aus der Interventionsgruppe ( $n = 13$  in Halle 1 und  $n = 14$  in Halle 2) und  $n = 40$  aus der Vergleichsgruppe. Für die Sicherstellung einer ausreichend großen Vergleichsgruppe für die Untersuchung der kurzfristigen Effekte wurde die Intervention mit Empfehlungen in der Freizeit (Lighting-Habits-Intervention) in Abstimmung mit dem Forschungsbegleitkreis auf die Feldphasen T2 und T3 verschoben. In der Nachrekrutierung im Sommer 2022 wurden weitere  $n = 22$  Personen für eine Teilnahme an der Studie gewonnen. Aufgrund des geringen Anteils an Nachtarbeitenden in der Vergleichsgruppe wurde beschlossen, die Auswahl für die Lighting-Habits-Intervention nur für Beschäftigte ohne Nachtarbeit durchzuführen. Für die Lighting-Habits-Intervention wurden  $n = 26$  Probandinnen und Probanden ohne Tätigkeit im Dreischichtsystem aus der gesamten betrieblichen Vergleichsgruppe geschichtet und nach Rekrutierungszeitraum (Nachrekrutierung oder nicht) und Alter ( $< 45$  Jahre, 45 Jahre und älter) gezogen. Feldphasen T2 und T3 umfassten identische Erhebungen und Untersuchungen wie T0 und T1. Für die Lighting-Habits-Intervention wurden ab dem Ende von Feldphase T2 bei den ausgewählten Teilnehmenden ergänzende Studieninstrumente zur Durchführung und Erhebung der Lighting-Habits eingesetzt (s. Kapitel 3.3.10, S. 33).

Insgesamt  $n = 89$  Personen konnten für eine Teilnahme an der Studie gewonnen werden. Tabelle A 3 im Anhang (S. 78) zeigt die Teilnehmendenzahlen in den einzelnen Feldphasen nach Gruppe. Die Compliance in den Gruppen nahm im Zeitverlauf ab, an T3 nahmen 84% der gesamten Studienpopulation teil. In der Taglichtintervention waren zu T3 noch 9 von 13 Personen (69%) beteiligt. Durch die Nachrekrutierung konnte die Vergleichsgruppe zur Durchführung der Lighting-Habits-Analyse von 40 auf 62 Teilnehmende vergrößert werden. Die Ziehung der Gruppe von Teilnehmenden für die Lighting-Habits-Interventionsgruppe ist in Tabelle A 4 (s. Anhang, S. 79) dargestellt.

Die Studienpopulation ist in Tabelle A 5 (s. Anhang, S. 79) dargestellt. Etwas mehr als drei Viertel der Teilnehmenden waren männliche Probanden, das mittlere Alter betrug 38 Jahre, der mittlere Chronotyp war 4:10 Uhr. In den beiden Gruppen mit Beleuchtungsinterventionen am Arbeitsplatz war der mittlere Chronotyp später, bei der Gruppe mit Nachtlicht-Intervention war der Anteil von Personen, die häusliche Pflegearbeit, leisten höher als bei den anderen Gruppen (36%, Gruppen mit weniger als 5 Personen werden nicht im Detail dargestellt). Die Taglicht-Intervention lag vom Bildungsniveau komplett im mittleren Bereich, die Nachtlicht-Gruppe hatte den größten Anteil von Personen mit niedrigem Bildungsabschluss. In der Gruppe der Lighting-Habits-Intervention war ein etwas höherer Anteil männlicher Probanden. In der Studienpopulation lagen  $n = 11$  Diagnosen von Depressionen sowie  $n = 3$  Diagnosen von Fatigue bei Long Covid und  $n = 1$  Diagnose des Restless-Legs-Syndroms vor.

## 4.2 Ergebnisse der Analyse der Schlafdauer

Für 83 Probandinnen und Probanden (93% der Studienpopulation) konnten valide Schlafdaten gesammelt werden, die in die Analysen einfließen. Tabelle A 6 beschreibt die Studienpopulation (s. Anhang 8.6, S. 80). Die Altersverteilungen der Gruppen waren ähnlich (arithmetisches Mittel 39,2 Jahre), der Chronotyp war bei der Lighting-Habits-Gruppe etwas früher als in den anderen beiden Gruppen. Ein kleiner Teil der Teilnehmenden hatte ein diagnostiziertes und behandeltes Schlaf-Apnoe-Syndrom (6%), vergleichbar mit dem Anteil in der Allgemeinbevölkerung. Besonders in der Nachtlcht-Interventionsgruppe hatten viele Teilnehmende häusliche Verpflichtungen hinsichtlich der Betreuung von kleinen Kindern oder pflegebedürftigen Erwachsenen (39%).

Rohe Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen der Hauptschlaf dauern nach Gruppen und Feldphasen sind in Tabelle A 7 und Tabelle A 8 (s. Anhang 8.6, S. 81 und 82) zu finden. An Arbeitstagen zeigte sich, dass der Schlaf bei Spätschicht bei allen Gruppen und über alle Feldphasen hinweg am längsten dauerte. In der Gruppe der Nachtlcht-Intervention wurden für die Schlaf dauern bei Nachtschichten in den Follow-ups, insbesondere aber in T1 längere Schlaf dauern im Vergleich zur Baseline beobachtet (M in h:mm; T0: 5:13 (95%-KI 4:11-6:14); T1: 5:50 (95%-KI 4:39-7:01); T2: 5:16 (95%-KI 3:49-6:41); T3: 5:32 (95%-KI 4:32-6:31)). Dies ist jedoch auch bei den Nachtschichten der Vergleichsgruppe zu beobachten (M in h:mm; T0: 5:13 (95%-KI 3:23-7:02); T1: 5:23 (95%-KI 4:11-6:36); T2: Gruppen mit weniger als 5 Personen werden nicht dargestellt; T3: 5:34 (95%-KI 4:22-6:45)). In der Gruppe der Taglicht-Intervention waren die Schlaf dauern in den Frühschichten tendenziell rückläufig, ebenso in der Vergleichsgruppe ohne Lighting-Habits-Intervention. Bei den Spätschichten blieben die Schlaf dauern in der Vergleichsgruppe etwa auf dem gleichen Level, mit einem etwas längeren Schlaf in Feldphase T1. Dies war bei der Gruppe der Taglicht-Intervention ebenfalls zu beobachten.

In den ersten Basismodellen, welche die wichtigsten Einflussfaktoren sowie die Messwiederholungen je Studienteilnehmenden berücksichtigen, werden jeweils die Arbeitstage und Wochenenden mit Früh- und Spätschichten in T2 und T3 für die Analyse der Lighting-Habits-Intervention betrachtet. Hierbei wird untersucht, ob ein Einfluss der Lichtempfehlungen in der Freizeit zu beobachten ist und ob die Gruppe der Lighting-Habits-Intervention für die Betrachtung der Langzeiteffekte der Beleuchtungsinterventionen mit der Vergleichsgruppe zusammengelegt werden kann. In Abbildung A 9 (s. Anhang 8.6, S. 83) werden die adjustierten Mittelwerte der Basismodelle sowie die Interaktionsterme für die Lighting-Habits-Intervention und Vergleichsgruppe dargestellt. An Arbeitstagen mit Frühschichten hatte sich die Schlafdauer in der Lighting-Habits-Gruppe von T2 nach T3 erhöht, während sie in der Vergleichsgruppe gleich blieb. Der Interaktionsterm deutet auf einen möglichen Interventionseffekt hin (Interaktionsterm in h:mm; 0:19 (95%-KI 0:01 – 0:37)). Auch an Arbeitstagen in Spätschicht entwickelten sich die Schlaf dauern der Interventionsgruppe tendenziell hin zu längeren Schlaf dauern (Interaktionsterm in h:mm; 0:14 (95%-KI -0:42 – 1:11)). Während an den Arbeitstagen der Schlaf tendenziell verlängert war, wurde an den Wochenenden nach Spätschichten ein negativer Interaktionsterm verbunden mit kürzerem Schlaf in der Interventionsgruppe beobachtet (Interaktionsterm in h:mm; -1:49 (95%-KI -3:09 – 0:29)).

Für die Betrachtung der Beleuchtungsinterventionen in den Hallen wurde als Vergleichsgruppe nur die Gruppe von Teilnehmenden ohne Lighting-Habits-Intervention modelliert, die auch an den ersten beiden Feldphasen teilgenommen hatte (ohne Nachrekrutierung). Tendenziell zeigten alle Gruppen in den Frühschichten eher reduzierte Schlaf dauern, die Interaktionsterme weisen nicht auf einen Einfluss der Intervention hin (s. Anhang 8.6, Abbildung A 10, S. 84). Bei den Spätschichten (s. Anhang 8.6, Abbildung A 11, S. 85) lagen die Schlaf dauern in T1 und T2 der Nachtschichtgruppe tendenziell höher (Interaktionsterme für kurzfristige Effekte in h:mm; T1 vs. T0: 0:37 (95%-



KI -0:11 – 1:26); T2 vs. T0: 0:56 (95%-KI 0:00 – 1:52)). Im rückwärts-rollierenden Schichtsystem liegen die Spätschichten in der Folgeweche der Nachtschichten und Effekte der Vorwoche sind denkbar.

Für die Nachtschichten zeigten sich ebenfalls tendenziell längere Schlafdauern an Arbeitstagen beim Vergleich von Interventionsgruppe zu Vergleichsgruppe (Anhang 8.6, Abbildung A 12, S. 86). An den Wochenenden scheint es hier kurzfristig in T1 ebenfalls eine Tendenz zu längeren Schlafdauern zu geben, jedoch sanken die Schlafdauern in T2 und T3. Insgesamt deutet dies darauf hin, dass im Zeitverlauf an Arbeitstagen etwas länger, aber an den Wochenenden kürzer geschlafen wurde.

#### 4.3 Ergebnisse der Analyse der psychomotorischen Vigilanz

In allen Feldphasen wurden jeweils etwa in der Mitte der jeweiligen Schicht PVT-192®-Tests durchgeführt. In der Baseline-Erhebung T0 wurden insgesamt  $m = 191$  PVT-Tests absolviert. In den folgenden Feldphasen waren es  $m = 213$  (Follow-up T1),  $m = 232$  (Follow-up T2) sowie  $m = 222$  Tests (Follow-up T3). In Tabelle A 9 (s. Anhang 8.6, S. 87) wird die Studienpopulation dargestellt. In allen Gruppen waren mehr Männer (62,3 bis 92,3%) als Frauen vertreten. Die Lighting-Habits-Interventionsgruppe bestand aus 92,3% Männern (höchster Männeranteil). Dagegen zeigte die Taglicht-Interventionsgruppe den geringsten Männeranteil mit 64,3%. Die Verteilung der zirkadianen Präferenz in den Gruppen ähnelte denen der deutschen Bevölkerung mit Ausnahme der Nachtlcht-Intervention, die mehr Abendtypen (38,5%) aufwies. Der Anteil der Personen mit niedrigem Risiko für eine Schlafapnoe lag zwischen 26,9% in der Lighting-Habits-Intervention und 57,1% in der Taglicht-Intervention. Außerdem bestand ein möglicher Einfluss Fatigue-assoziiierter Erkrankungen auf die Vigilanz. In der gesamten Studienpopulation lagen  $n = 11$  Diagnosen von Depressionen sowie  $n = 3$  Diagnosen von Fatigue bei Long Covid und  $n=1$  Diagnose des Restless-Legs-Syndroms vor. Das Alter war in allen Gruppen vergleichbar und lag im Mittel zwischen 38,8 (SD 14,4) und 40,9 (SD 8,7) Jahren. Darüber hinaus wurde der durchschnittliche Koffeinkonsum ermittelt, der bei der Taglicht-Intervention am niedrigsten war (228,1 mg/Tag, SD 154,1) und bei der Nachtlcht-Intervention die höchsten Durchschnittswerte aufwies (386,2 mg/Tag, SD 246,8). Im Folgenden wird die mittlere Reaktionszeit deskriptiv beschrieben. Detailliertere Angaben stratifiziert nach Interventions- und Vergleichsgruppe sind in Tabelle A 10 (Anhang 8.6, S. 88) zu finden.

Die mittlere Reaktionszeit war bei den Studienteilnehmenden der Taglicht-Intervention in der Früh- und Spätschicht am schnellsten im Vergleich zu den anderen Interventionsgruppen und der Vergleichsgruppe. In T0 lag diese in der Frühschicht bei 218 ms (SD 12 ms) und verbesserte sich in T1 auf 207 ms (SD 17 ms). In T2 und T3 bleibt die mittlere Reaktionszeit nahezu gleich (T2: 209 ms (SD 17 ms) und T3: 208 ms (SD 18 ms)). In der Spätschicht erzielte die Gruppe zur Baseline T0 eine mittlere Reaktionszeit von 204 ms (SD 13 ms) und verbesserte sich hier auf 202 ms (SD 12 ms) in T1. In T2 verlangsamte sich die mittlere Reaktionszeit auf 206 ms (SD 17 ms) und verbesserte sich in wieder T3 auf 196 ms (SD 13 ms).

Im Gruppenvergleich zeigten die Teilnehmenden der Nachtlcht-Intervention in der Frühschicht über alle Feldphasen hinweg die langsamsten mittleren Reaktionszeiten. Die mittlere Reaktionszeit betrug in T0 243 ms (SD 23 ms) und verbesserte sich in T1 auf 233 ms (SD 23 ms). Die Reaktionszeiten blieben in T2 mit 232 ms (SD 19 ms) und in T3 mit 233 ms (SD 19 ms) in etwa gleich. Die Nachtlcht-Interventionsgruppe wies während der Spätschicht in T0 eine mittlere Reaktionszeit von 232 ms (SD 27 ms) auf, verbesserte sich in T1 leicht auf 231 ms (SD 28 ms) und in T2 auf 226 ms (SD 18 ms). Sie verlangsamte sich in T3 wieder auf 236 ms (SD 18 ms). Die Nachtlcht-Interventionsgruppe erreichte während der Nachtschicht zur Baseline T0 eine mittlere Reaktionszeit



von 229 ms (SD 21 ms). Die mittleren Reaktionszeiten blieben in T1 mit 230 ms (SD 21 ms) und in T2 mit 228 ms (SD 24 ms) nahezu unverändert. In T3 weiter verbesserte sich die mittlere Reaktionszeit auf 225 ms (SD 15 ms).

Die Vergleichsgruppe zeigte in der Frühschicht im Vergleich während der Früh-, Spät- und Tagschichten in Verlauf von der Baseline T0 zum Follow-up T1 nahezu gleichbleibende mittlere Reaktionszeiten. In der Nachtschicht verbesserte sich die mittlere Reaktionszeit der Vergleichsgruppe von 233 ms (SD 43 ms) in T0 auf 227 ms (SD 19 ms) in T1. Die mittleren Reaktionszeiten der Lighting-Habits-Interventionsgruppe und der Vergleichsgruppe waren während der Früh- und Spätschicht in T2 und T3 annähernd gleich. Die mittleren Reaktionszeiten während der Tagschicht waren in der Lighting-Habits-Interventionsgruppe zu T2 mit 230 ms (SD 17 ms) und T3 mit 227 ms (SD 16 ms) langsamer als in der Vergleichsgruppe.

In einem linearen gemischten Modell (LMM) wurden die mittleren Reaktionszeiten in den Gruppen untersucht. Dabei wurden die Lighting-Habits-Interventions- und die Vergleichsgruppe gemeinsam betrachtet, genauso wie die Früh- und Tagschichten. In Abbildung A 13 (s. Anhang 8.6, S. 89) sind die Ergebnisse des LMM als adjustierten Mittelwerte und Konfidenzintervalle der mittleren Reaktionszeiten für jede Gruppe über die vier Feldphase hinweg darstellt. Die Taglicht-Interventionsgruppe erzielte über alle Feldphasen die niedrigsten Reaktionszeiten, die Kurzzeiteffekte zeigten eine Verbesserung der mittleren Reaktionszeit von T0 zu T1. In der Langzeitanalyse war die leichte Verschlechterung der mittleren Reaktionszeiten der Taglicht-Interventionsgruppe in der Spätschicht im Follow-up T2 auffällig. In Vergleich der Nachtlucht-Interventionsgruppe zur Vergleichsgruppe war eine Überschneidung der Konfidenzintervalle und eine nahezu gleiche Entwicklung über die Feldphasen zu beobachten.

#### 4.4 Ergebnisse der Analyse der Schläfrigkeit

Über die Ausgabe der Studienhandys konnte für die Ermittlung der Schläfrigkeit in den Feldphasen ein großer Anteil der Studienteilnehmenden erreicht werden (s. Anhang 8.6, Tabelle A 11 mit der Darstellung der Studienpopulation, S. 90). Insgesamt konnten zu  $n = 86$  Teilnehmenden der Studienpopulation Schläfrigkeitsdaten gesammelt werden (97%). Die Schläfrigkeitsangaben sind in Tabelle A 12 und Tabelle A 13 und (s. Anhang 8.6, S. 91 – 92) nach Untersuchungsgruppe und Feldphase mit Mittelwerten und 95%-Konfidenzintervallen dargestellt. Hierbei werden ausgehend von der ersten Angabe nach dem Aufwachen die geplanten Zeitpunkte während der Arbeitsschicht (zu Beginn der Schicht und dann alle zwei Stunden) bis zum Schlafengehen aggregiert dargestellt. Die entsprechenden Verläufe sind in den Abbildungen gezeigt (s. Anhang 8.6, Abbildung A 14 – Abbildung A 16, S. 94 – 96). Je niedriger die Kurve verläuft, desto wacher fühlen sich die Studienteilnehmenden. Im Tagesverlauf ist bei allen Kurven die übliche U- bzw. leicht geneigte S-Form der Schläfrigkeit zu beobachten.

Durch die Veränderungen in der Beleuchtung mit hellerem Licht ab dem Morgen bis in den Nachmittag ist von Interesse, ob die Schläfrigkeit in der Tagesmitte gesunken ist. Bezogen auf die Beleuchtung in den Hallen am Tag und hinsichtlich kurzfristiger Effekte (Vergleich von Baseline T0 zu Feldphase T1) ist zu beobachten, dass in der Tagschicht-Gruppe zur Mitte der Schicht und nach sechs Stunden eine geringere Schläfrigkeit dokumentiert wurde (Mitte der Schicht: Taglicht-Intervention M 2,5 (95%-KI 1,9-3,1), Vergleichsgruppe M 3,4 (95%-KI 3,0-3,8). In den Spätschichten wies die Gruppe der Taglicht-Intervention auch zur Baseline T0 eine geringere Schläfrigkeit auf. Hier ist von Interesse, ob die Schläfrigkeit zum Schichtende mit Absenken der melanopisch wirksamen Beleuchtung nicht überproportional zunimmt. Es zeigte sich, dass die Schläfrigkeit insgesamt

in der Gruppe mit Taglicht-Intervention niedriger war (also eine geringere Schläfrigkeit). Dies deutet darauf hin, dass die gewählte Beleuchtung auch bei Absenkung der melanopisch wirksamen Beleuchtung zu keinen Nachteilen führte. Längerfristig zeigte sich, dass beide Interventionsgruppen (die Gruppe der Nachtlicht-Intervention arbeitete tagsüber bereits zur Baseline mit hellerem Licht) im Schichtverlauf tendenziell eine geringere Schläfrigkeit aufwiesen als die Vergleichsgruppe, z. B. in T3 (s. Anhang 8.6, Abbildung A 14, S. 94). Erste orientierende Analysen mit GAMMs unter Berücksichtigung von Messwiederholungen pro Person zeigten einen negativen Interaktionsterm zwischen Untersuchungsgruppe und Zeitpunkt T1 in den Frühschichten, ( $-1,01$  (95%-KI  $-1,55 - -0,48$ )), die auf eine kurzfristige Verringerung der Schläfrigkeit hindeuten.

Hinsichtlich der Schläfrigkeit während der Nachtschichten wurde beobachtet, dass die Vergleichsgruppe in der Nachtschicht der Baseline schläfriger war als die Nachtlicht-Gruppe (s. Anhang 8.6, Abbildung A 16, S. 96). In T1 und T2 zeigten sich bei den beiden Gruppen fast identische Verläufe. In T1 waren beide Gruppen wacher, was sich in der Vergleichsgruppe deutlicher zeigt. Auch in T3 waren die Schläfrigkeitswerte geringer, was mit saisonalen Aspekten zusammenhängen könnte, da möglicherweise im Januar/Februar ein Erholungseffekt durch Urlaube im Jahreswechsel vorliegen könnte. Insgesamt zeigten sich durch die Absenkung der melanopisch wirksamen Beleuchtung ab der Mitte der Nachtschicht keine Hinweise auf eine erhöhte Schläfrigkeit in der Interventionsgruppe.

#### 4.5 Ergebnisse der Analyse von Melatonin und Cortisol im Speichel

Die Studienpopulation für die Hormonanalysen beschränkt sich auf die Interventionsgruppe mit Nachtschicht. Speichelproben wurden in den ersten beiden Nachtschichten einer Schichtwoche gesammelt, die Darstellung fasst beide Untersuchungstage zusammen. Bei Baseline nahmen 14 Personen an den Speichelprobensammlungen teil, in T1 waren es  $n = 10$ , in T2  $n = 11$  und in T3  $n = 12$ .

Die geometrischen Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Melatonin-Werte (in pg/ml) sind in Tabelle A 14 (s. Anhang 8.6, S. 97) dargestellt. In der ersten Hälfte der Nachtschicht sollte durch eine höhere melanopisch wirksame Beleuchtung eine Aktivierung erzielt werden. In der zweiten Schichthälfte sollte durch eine Absenkung der melanopisch wirksamen Beleuchtung eine weniger starke Hemmung der Melatonin-Sekretion (also höhere Melatonin-Werte) bewirkt werden. Die Ausgangswerte zu Schichtbeginn gegen 22 Uhr lagen bei T2 auffällig hoch, was auf starke individuelle Einflussfaktoren und Unterschiede in den zirkadianen Rhythmen hindeutet. In Feldphase T1 lagen die Messwerte für die einzelnen Probenahme-Zeitpunkte niedriger als zur Baseline T0. Hier ist die Betrachtung der Veränderungen bei T2 gegenüber der Baseline T0 und T3 gegenüber T1 und Baseline T0 (gleiche Jahreszeit) hilfreich. Die Werte nach Schichtmitte wiesen zu den späteren Feldphasen höhere Spiegel auf (z. B. Melatonin-Werte in pg/ml 6 Stunden nach Schichtbeginn: T0: 5,35 (95%-KI 4,37 – 6,55); T2: 7,91 (95%-KI 6,72 – 9,31) und T1: 3,07 (95%-KI 2,6 – 3,63); T3: 6,05 (95%-KI 5,14 – 7,12)). In der aktivierenden ersten Schichthälfte lagen die Messwerte unter denen der Baseline T0. Insgesamt konnten höhere Melatonin-Werte zum Ende der Schicht beobachtet werden. In Abbildung A 17 (s. Anhang 8.6, S. 98) sind die Verläufe der logarithmierten Melatonin-Werte der Population in den Feldphasen dargestellt. Es zeigte sich, dass in der Baseline-Erhebung schon zu Beginn der Nachtschicht relativ hohe Melatonin-Werte vorlagen, die insgesamt während der Nachtschicht abnehmend waren. Bei den Verläufen in den Follow-Ups lagen die Melatonin-Werte bei den Speichelproben in der ersten Nachtschicht-Hälfte niedriger und stiegen ab der vierten Speichelprobe (nach sechs Stunden) an. Weiterführende Modelle sollen saisonale Aspekte sowie die insbesondere die individuellen Kurvenverläufe und zeitgenaue Analysen beinhalten.

In Tabelle A 15 (s. Anhang 8.6, S. 99) sind die geometrischen Mittelwerte und 95%-KI der Cortisol-Werte (in nmol/L) zusammen mit der Anzahl der Speichelproben nach Feldphasen aufgeführt. Es zeigte sich, dass die Cortisol-Ausgangswerte zu Schichtbeginn in T2 und T3 höher lagen als in Baseline T0 und T1. Von Interesse ist, ob eine Aktivierung in der ersten Schichthälfte durch eine stärkere melanopisch wirksame Beleuchtung durch höherer Cortisol-Werte deutlich wird. Außerdem ist von Interesse, ob der übliche Anstieg in den Cortisol-Werten am Morgen, der im Dreischichtsystem durch den Wechsel vom Wochenende in die Nachtschicht meist noch vorliegt, verringert ist, da zum Ende der Nachtschicht eine wärmere Lichtfarbe gewählt wurde. Es zeigte sich, dass die Beleuchtung in der ersten Schichthälfte längerfristig nicht für erhöhte Cortisol-Werte sorgte (GM der Cortisol-Werte in der Schichtmitte zu T0: 0,97 (95%-KI 0,66 – 1,43); T1: 0,8 (95%-KI 0,52 – 1,22) T2: 1,16 (95%-KI 0,7 – 1,91) und T3: 0,6 (95%-KI 0,36 – 0,99)). Zum Ende der Schicht ist ein Trend zu niedrigeren Cortisol-Werten erkennbar (GM der Cortisol-Werte am Schichtende zu T0: 1,62 (95%-KI 1 – 2,61); T1: 1,41 (95%-KI 0,9 – 2,2) T2: 1,26 (95%-KI 0,61 – 2,6) und T3: 0,9 (95%-KI 0,57 – 1,41)). Zwischen Schichtende und Schlafbeginn stiegen die Cortisol-Werte der Follow-ups jedoch deutlich auf ca. das Doppelte an. Die Verläufe der logarithmierten Cortisol-Werte sind in Abbildung A 18 (s. Anhang 8.6, S. 100) dargestellt. Tendenziell wurden zum Ende der Nachtschicht (Speichelprobe 5) niedrigere Cortisol-Werte beobachtet. Hinsichtlich der Interpretation ist es von Bedeutung die Aufwachzeiten der Teilnehmenden in multivariablen Modellen einzubinden.

#### 4.6 Ergebnisse der Analyse von Cortisol im Haar

Tabelle A 16 (s. Anhang 8.6, S. 101) zeigt die deskriptive Statistik der n = 80 Teilnehmenden der Haar-Analyse zur jeweiligen Baseline. Dies bedeutet für die Nachtlcht-Intervention (n = 13) und Taglicht-Intervention (n = 12) sowie betriebliche Referenzgruppe (n = 35) den Messzeitpunkt T0 (November 2021) und für die nachrekrutierten Teilnehmenden (n = 20) den Messzeitpunkt T2 (November 2022). Eine Person wurde vor der Analyse aufgrund von Diabetes mellitus Typ 1 aus der Studienpopulation ausgeschlossen. Die Geschlechterverteilung zeigte insgesamt eine Verteilung von 75% männlichen und 25% weiblichen Teilnehmenden. Das mittlere Alter der gesamten Studienpopulation betrug 39,0 Jahre (SD 13,2), wobei 57,5% und 42,5% der Teilnehmenden unter und über 40 Jahren alt waren. Der mittlere Body-Mass-Index (BMI) aller Teilnehmenden betrug 28,1 (SD 5,1). 31,4% aller Teilnehmenden waren normalgewichtig und 40% hatten Übergewicht. 22,5% hatten Adipositas Grad I. Unabhängig von der Art der Behandlung gaben 16,3% aller Teilnehmenden an eine Haarbehandlung durchgeführt zu haben. Ein kritisches Lebensereignis in den vergangenen 12 Monaten gaben unter allen Teilnehmenden 41,3% an. Während in den anderen Gruppen jeweils über die Hälfte aller Studienteilnehmenden hierzu eine Angabe machte, lag der Anteil in der betrieblichen Referenzgruppe bei 17,1%. 30% aller Teilnehmenden hatten zur Baseline eine Führungsposition inne. Der Großteil davon (66,7%) befand sich in der Taglicht-Interventionsgruppe, gefolgt von der betrieblichen Referenzgruppe mit 37,1% Führungskräften. Auf einer Skala von 1 bis 5 (gar nicht bis sehr stark) gaben die Teilnehmenden insgesamt eine mittlere Belastung durch externe Krisen (Krisen-Score) von 2,4 (SD 1,1) an. Die Arbeitsplatzbelastung aller Teilnehmenden zur Baseline (Skala 1-10, gering bis hoch) betrug im Mittel 5,4 (SD 1,3).

Tabelle A 17 (s. Anhang 8.6, S. 102) zeigt deskriptiv die Haarcortisol-Konzentration (HCC, in pg/mg) der Teilnehmenden aller Gruppen über alle Feldphasen nach Ausschluss von n = 1 Person aufgrund von Diabetes mellitus Typ 1. Die Darstellung erfolgt mittels geometrischer Mittelwerte (GM) und 95%-Konfidenzintervalle. Zum Zeitpunkt der Baseline T0 wiesen alle Gruppen die höchsten GM auf (GM total: 5,5 pg/ml, 95%-KI 4,0 – 7,6). In der zweiten Feldphase T1 sank der Wert in allen Gruppen auf 3,4 pg/ml (95%-KI 2,4 – 4,7). In der dritten Feldphase T2 stieg die mittlere HCC in allen Gruppen wieder an, wobei der Anstieg in der Taglicht-Intervention am höchsten

und in der Vergleichsgruppe am niedrigsten war. Die mittlere HCC der Lighting-Habits-Intervention (LH-Intervention) zu T3 lag bei 5,7 pg/ml (95%-KI 3,0 – 10,9 und entsprach in etwa dem Baseline-Wert der anderen Gruppen. In der letzten Feldphase sank die mittlere HCC erneut in allen Gruppen. Außer in der Taglicht-Interventionsgruppe, in der es einen leichten Anstieg gab. Die mittlere Veränderung der HCC in LH-Gruppe sank von T2 zu T3 um 2,78 pg/ml. Abbildung A 19 (s. Anhang 8.6, S. 103) zeigt die GM und Standardfehler (SE) der HCC der Teilnehmenden aus der Vergleichsgruppe und der LH-Gruppe zu den Messzeitpunkten T2 und T3. Es gab keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen diesen Gruppen, sie werden daher in nachfolgenden Analysen zusammengefasst. Abbildung A 20 (S. 103) stellt die zeitliche Entwicklung der HCC der Teilnehmenden anhand eines Liniendiagramms mit GM und SE der Gruppen über alle Feldphasen hinweg dar. Die Fehlerbalken im Diagramm verdeutlichen die Variabilität der Messungen und zeigen visuell die Unterschiede und Trends zwischen den Gruppen und über die Zeit. Abbildung A 21 (s. Anhang 8.6, S. 104) zeigt die adjustierten Mittelwerte der HCC der Teilnehmenden mit 95%-Konfidenzintervallen für alle Studiengruppen und Feldphasen. Die adjustierten Mittelwerte wurden mittels eines LMM unter Berücksichtigung der möglichen Einflussvariablen berechnet. Zu Beginn der Studie (Baseline T0) hatten die Teilnehmenden der Nachtlicht-Intervention den höchsten adjustierten mittleren HCC-Wert, gefolgt von der Vergleichsgruppe und der Taglicht-Intervention. Im Verlauf der Studie zeigten sich ähnliche saisonale Entwicklungen der HCC in den Gruppen. In allen Gruppen sind die adjustierten mittleren HCC-Werte zu Beginn der Studie (Baseline T0) vergleichsweise am höchsten, sinken zu T1 ab, steigen zu T2 wieder an und sinken erneut zu T3. In der Taglicht-Interventionsgruppe ist dieser Trend im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen jedoch deutlich geringer ausgeprägt. Die HCC-Werte sanken von T0 zu T1 ab. Nach diesem Rückgang veränderten sich die Werte nur geringfügig. Der Vergleich der Gruppen untereinander über die Feldphasen hinweg zeigte, dass die Nachtlicht-Intervention zu den Zeitpunkten T0 bis T2 höhere und die Taglicht-Intervention niedrigere HCC-Werte aufwies als die beiden anderen Gruppen. Zum Ende der Studie in T3 hatten alle Gruppen im Mittel ähnliche adjustierte HCC-Werte, wobei die Nachtlicht-Interventionsgruppe leicht niedrigere und die Taglicht-Intervention leicht höhere Werte als die Vergleichsgruppe aufwies.

#### 4.7 Ergebnisse der Analyse der individuellen Beleuchtungswahrnehmung

Tabelle A 18 (s. Anhang 8.6, S. 105) zeigt die Merkmale der Teilnehmenden der Erhebung zur Einschätzung der Hallenbeleuchtung zur Baseline. Für die Nachtlicht- und Taglicht-Intervention sowie die betriebliche Referenzgruppe entspricht dies dem Messzeitpunkt T0 und für die nachrekrutierten Teilnehmenden dem Messzeitpunkt T2. In Tabelle A 19 (s. Anhang 8.6, S. 106) ist die Anzahl und der Anteil der Personen dargestellt, die die Beleuchtung in Hinblick auf die Helligkeit als angenehm empfunden haben. In der Nachtlicht-Interventionsgruppe empfanden 77% der Teilnehmenden die Beleuchtung zu Schichtbeginn der Nachtschicht als angenehm. Dieser Anteil sank nach zwei Stunden auf 69% und blieb bis zum Ende der Schicht stabil bei 69%. Bei T1 sank die Zufriedenheit im Verlauf der Schicht von 78% zu Beginn auf 44% am Ende. Bei T2 war die Zufriedenheit durchgehend hoch, mit 83% zu Beginn und am Ende sowie einem Höchstwert von 92% nach zwei Stunden und in der Mitte der Schicht. Bei T3 blieb die Zufriedenheit ebenfalls hoch, beginnend mit 83% und steigend auf 92% am Ende der Schicht. In der Taglicht-Interventionsgruppe empfanden zu Beginn der Studie in T0 42% der Teilnehmenden die Helligkeit in der Frühschicht als angenehm, dieser Anteil stieg nach zwei Stunden auf 75% und blieb bis zur Mitte der Schicht stabil bei 80%. Nach sechs Stunden sank er auf 50%, bevor er am Ende wieder auf 75% stieg. Bei T1 und T2 blieb die Zufriedenheit konstant hoch, mit Werten zwischen 78% und 100%. Bei T3 blieb die Zufriedenheit ähnlich hoch, wobei sie leicht schwankte zwischen 70% und 90%. In der Spätschicht lag die Zufriedenheit der Helligkeit zur Baseline T0 bei Schichtbeginn bei 82%, sank aber kontinuierlich bis auf



45% am Ende der Schicht. Bei T1 und T2 zeigte sich ein ähnlicher Trend, wobei die Zufriedenheit zu Beginn hoch war (88% bis 91%), aber bis zum Ende der Schicht auf etwa 50% sank. Bei T3 blieb die Zufriedenheit stabil hoch zu Schichtbeginn (100%), sank jedoch bis zum Ende der Schicht auf 57%.

Tabelle A 20 (Anhang 8.6, S. 109) zeigt die Zufriedenheit der Teilnehmenden mit der Beleuchtung im Hinblick auf die Lichtfarbe. Es werden die Anzahl und der Anteil der Personen dargestellt, die die Lichtfarbe als angenehm bewerteten. In der Nachtlcht-Interventionsgruppe wurde die Lichtfarbe zu Schichtbeginn in der Nachtschicht zur Baseline T0 von 62% der Teilnehmenden als angenehm bewertet. Diese Einschätzung stieg mit ein paar Schwankungen zum Schichtende auf 69%. In T1 bleibt die Zufriedenheit über die Schicht hinweg konstant zwischen 56 und 67%. In T2 ist die Einschätzung der Lichtfarbe als angenehm bereits zu Beginn der Schicht hoch (83%), steigt kurz darauf auf 92% und verringert sich dann wieder auf 83%). In der letzten Feldphase wurde die Lichtfarbe von 83% der Teilnehmenden zu Beginn der Schicht als angenehm eingeschätzt. Zur Mitte der Schicht sank dieser Anteil und zum Schichtende waren 92% mit der Lichtfarbe zufrieden. Die Teilnehmenden der Taglicht-Interventionsgruppe gaben zur Baseline nur zur 33% an, zufrieden mit der Lichtfarbe während der Frühschicht zu sein. Dieser Anteil stieg bis zum Schichtende bis auf 75% an. In T1 wurde die Lichtfarbe bereits zu Schichtbeginn überwiegend (80%) als angenehm empfunden und blieb zum Schichtende auf diesem Niveau (70%). In der dritten Feldphase T2 blieb die Einschätzung bis auf in der Schichtmitte durchgehend bei einem Anteil von 78% als angenehm. In T3 war die Zufriedenheit bereits zu Schichtbeginn hoch (80%) und stieg zum Schichtende auf 90%. In der Spätschicht der Taglicht-Interventionsgruppe bewerteten die Teilnehmenden die Lichtfarbe zur Baseline T0 zu 64% als angenehm. Dieser Anteil reduzierte sich zur Schichtmitte und stieg zum Schichtende wieder auf 64% an. In T1 bewerteten 63% der Teilnehmenden die Lichtfarbe als angenehm. Nach zwei Stunden stieg dieser Anteil an und reduzierte sich zum Schichtende auf 38%. In der dritten Feldphase (T2) war die Zufriedenheit mit der Lichtfarbe von Schichtbeginn hoch (82%) und stieg zur Schichtmitte auf 100%. In T3 zeigte sich ein ähnlicher Trend in der Spätschicht der Taglicht-Intervention.

## 4.8 Qualitätssicherung

Es wurden 36 Standardarbeitsanweisungen (*englisch standard operating procedures*, SOP) erstellt. Diese wurden in den Research Data Management Organiser (RDMO) des Projekts eingepflegt. Im Anhang 8.7, S. 116 ist das standardisierte Vorgehen bei den lichttechnischen Messungen zusammengefasst.

## 4.9 Überprüfung der Stabilität der Beleuchtungsintervention

Alle Feldphasen wurden mit kontinuierlichen Globalmessungen begleitet. Aus den Messdaten lassen sich Aussagen sowohl darüber treffen, ob die zeitlichen Verläufe der dynamischen Beleuchtung während der Feldphasen T1, T2 und T3 den Vorgaben für die Lichtintervention entsprachen, als auch zur Stabilität innerhalb einer Feldphase. Die Tabelle 4 und Tabelle 5 fassen die gemittelten Messwerte für alle Feldphasen zusammen, die zum Vergleich für die Steuerwerte herangezogen wurden. Die ausgewerteten Daten zeigen stabile zeitliche Verläufe in allen Feldphasen, die den Vorgabewerten entsprechen. Damit ist eine Abschätzung der photometrischen und melanopischen Größen im Bereich der Arbeitsplätze möglich. Diese sind in Abbildung 6 (S. 19) und Abbildung 7 (S. 20) für beide Untersuchungshallen als MEDI-Werte angegeben.



**Tabelle 4. Mittelwerte und Standardabweichungen für die Messwerte von Lichtfarbe (CCT), vertikalen Beleuchtungsstärke ( $E_{\text{vert}}$ ) und MEDI-Wert am Globalmessort in Montagehalle 1 während der Feldphasen für jeweils 3 Wochen zum Vergleich mit den Steuerwerten, Zeiträume nach Tabelle 3, S. 32**

Feld-phase	Steuerwerte CCT / $\Phi_{\text{rel}}$	Zeitraum	CCT	$E_{\text{vert}}$	MEDI
T0	4000 K / 50%	5 bis 7 Uhr & 18 bis 22 Uhr	3925 K $\pm$ 18 K	216 lx $\pm$ 24 lx	133 lx $\pm$ 5 lx
T1	① 3000 K / 50%	① 20:30 Uhr bis 4 Uhr	2945 K $\pm$ 11 K	259 lx $\pm$ 2 lx	124 lx $\pm$ 1 lx
T2	① 3000 K / 50%	① 20:30 Uhr bis 4 Uhr	2930 K $\pm$ 6 K	239 lx $\pm$ 2 lx	114 lx $\pm$ 1 lx
T3	① 3000 K / 50%	① 20:30 Uhr bis 4 Uhr	2945 K $\pm$ 6 K	238 lx $\pm$ 1 lx	114 lx $\pm$ 1 lx

CCT: ähnlichste Farbtemperatur,  $\Phi_{\text{rel}}$ : relative Lichtleitung;  $E_{\text{vert}}$ : vertikale Beleuchtungsstärke, MEDI: melanopisch äquivalente Tageslichtbeleuchtungsstärke  $E_{\text{mel,v,D65}}$

**Tabelle 5. Mittelwerte und Standardabweichungen für die Messwerte von Lichtfarbe (CCT), vertikalen Beleuchtungsstärke ( $E_{\text{vert}}$ ) und MEDI-Wert am Globalmessort in Montagehalle 2 während der Feldphasen zum Vergleich mit den Steuerwerten, Zeiträume nach Tabelle 3, S. 32**

Feld-phase	Steuerwerte CCT / $\Phi_{\text{rel}}$	Zeitraum	CCT	$E_{\text{vert}}$	MEDI
T0	3800 K / 70%	22 bis 6 Uhr	3227 K $\pm$ 2 K	300 lx $\pm$ 4 lx	164 lx $\pm$ 2 lx
T1	① 3800 K / 70%	① 18 bis 21:30 Uhr	3219 K $\pm$ 3 K	286 lx $\pm$ 1 lx	157 lx $\pm$ 1 lx
	② 4800 K / 100%	② 22:30 bis 2 Uhr	3965 K $\pm$ 3 K	398 lx $\pm$ 5 lx	266 lx $\pm$ 4 lx
	③ 3000 K / 70%	③ 3 bis 5 Uhr	2789 K $\pm$ 2 K	287 lx $\pm$ 2 lx	131 lx $\pm$ 1 lx
T2	① 3800 K / 70%	① 18 bis 21:30 Uhr	3195 K $\pm$ 5 K	271 lx $\pm$ 10 lx	147 lx $\pm$ 6 lx
	② 4800 K / 100%	② 22:30 bis 2 Uhr	3933 K $\pm$ 7 K	373 lx $\pm$ 14 lx	248 lx $\pm$ 9 lx
	③ 3000 K / 70%	③ 3 bis 5 Uhr	2771 K $\pm$ 3 K	269 lx $\pm$ 9 lx	122 lx $\pm$ 4 lx
T3	① 3800 K / 70%	① 18 bis 21:30 Uhr	3191 K $\pm$ 5 K	267 lx $\pm$ 11 lx	146 lx $\pm$ 6 lx
	② 4800 K / 100%	② 22:30 bis 2 Uhr	3925 K $\pm$ 7 K	372 lx $\pm$ 14 lx	246 lx $\pm$ 9 lx
	③ 3000 K / 70%	③ 3 bis 5 Uhr	2767 K $\pm$ 3 K	267 lx $\pm$ 9 lx	121 lx $\pm$ 4 lx

CCT: ähnlichste Farbtemperatur,  $\Phi_{\text{rel}}$ : relative Lichtleitung;  $E_{\text{vert}}$ : vertikale Beleuchtungsstärke, MEDI: melanopisch äquivalente Tageslichtbeleuchtungsstärke  $E_{\text{mel,v,D65}}$

#### 4.10 Ergebnisse der Analyse zur Umsetzung der Lighting-Habits-Intervention

Von den über die zufällige Auswahl gezogenen Studienteilnehmenden der Lighting-Habits-Intervention nahmen  $n = 23$  (88%) an Feldphase T3 teil. Aus den Studienhandys konnten Daten zu den Handyprompts von  $n = 21$  (91% der Teilnehmenden an der Befragung) Teilnehmenden gesammelt werden, von  $n = 22$  lagen Daten zu Lichtprofilen mit LightWatchern vor (s. Tabelle A 21 im Anhang 8.6, S. 112). Die Vergleichsgruppe ohne Lighting-Habits-Intervention aber mit Daten zu Lichtprofilen umfasste  $n = 23$  Probandinnen und Probanden. Die Teilnehmenden dieser Gruppe wiesen etwas häufiger einen niedrigeren Bildungsstand auf, der mittlere Chronotyp war später und es gab seltener pflegebedürftige Angehörige (Daten wegen kleiner Gruppen nicht dargestellt).

Die Antworten zu den Befragungen und zu den Prompts der Studienhandys während der Feldtage sind in Tabelle A 22 (s. Anhang 8.6, S. 113) dargestellt. Zu Beginn der Feldphase reichten diese den Fragebogen zur Erhebung der Umsetzung ein. Alle gaben an, mindestens eine der Empfehlungen ausprobiert zu haben. Zum Ende von T3 reichten 16 (70%) Probandinnen und Probanden den Fragebogen erneut ein, hier gaben noch 88% an, mindestens eine Empfehlung umgesetzt zu haben. Die blaulichtfilternde Brille wurde von mehr als der Hälfte ausprobiert (56%), sie wurden auch während der Feldphase T3 aufgesetzt, hier gaben knapp zwei Drittel der

Befragten an, dass sie die Brillen verwendet hatten. Unter den Anwendern dieser Empfehlung während T3 hatten hierfür alle neutrale bis positive Bewertungen. Bei den Studienhandys gab es an den Untersuchungstagen insgesamt 129 Prompts mit der Empfehlung die blaulichtfilternden Brillen aufzusetzen. Dieser Empfehlung gingen nach den Antworten der Teilnehmenden etwas mehr als zwei Drittel nach (67%) nach. In T3 gaben 64% der Personen an, Blaulichtfilter auf digitalen Endgeräten installiert zu haben, zum Ende von T3 waren dies 50%. Die Bewertung der Wirksamkeit hinsichtlich eines besseren Schlafs der Anwender wurde als mindestens neutral bis gut eingeschätzt. Weitaus häufiger wurde die Verdunkelung des Schlafraums eingesetzt (87% bzw. 83%) und ebenfalls als wirksame Maßnahme eingeschätzt. Mittels der Studienhandys wurden 34 Empfehlungen zur Abdunklung des Schlafraums oder Einsatzes der Schlafmaske während T3 gegeben. In 18% der Fälle wurde hier geantwortet, dass die Empfehlung nicht notwendig sei, sonst wurde sie umgesetzt. Die Empfehlungen für den Aufenthalt unter Tageslicht zu Frühschichten wurden von 87% der Teilnehmenden ausprobiert. Die Teilnehmenden bewerteten dies positiv. Während T3 waren es zwei Drittel (67%), die diese Empfehlung umsetzten und positiv bewerteten. Von den 48 Empfehlungen über Studienhandys wurde in 13% der Fälle angegeben, dass dies keine notwendige Empfehlung sei. Ähnlich sahen die Bewertungen für die Tageslicht-Empfehlungen am Wochenende aus. Die Tageslicht-Empfehlungen bei Spätschicht wurde etwas seltener ausprobiert, während T3 waren es 41% der Befragten. Hier wurden nur 9 Empfehlungsprompts wirksam, es gaben 78% an, dass die Empfehlungen umgesetzt wurden.

Die über die LightWatcher abgeleiteten Dauern des Aufenthalts unter Tageslicht im Empfehlungszeitraum zwischen 12 Uhr und 18 Uhr sind in Tabelle A 23 (s. Anhang 8.6, S. 115) dargestellt. Hierfür wurde ein Wert von 1000 lx als Indiz für den Aufenthalt unter Tageslicht gewählt. Bei den Analysen ist von Interesse, ob sich im Vergleich zwischen beiden Gruppen in T2 und T3 die Aufenthaltsdauer unter Tageslicht bei der Lighting-Habits-Gruppe verlängert hat. Dies wird je nach Schichtart betrachtet. In beiden Feldphasen war der abgeleitete Anteil der Teilnehmenden, die sich nur sehr gering unter Tageslicht aufhielten (0 – 5 Minuten) sehr hoch (zwischen 60% – 83%). Bei den Teilnehmenden der Lighting-Habits-Gruppe, die sich am Tageslicht aufhielten, wurde bei den Frühschichten eine längere Dauer beobachtet (in den Frühschichten der Lighting-Habits-Gruppe GM in h:mm 1:17 (95%-KI 0:29 – 3:24) in T2 und 2:32 (95%-KI 1:07 – 5:45) in T3; in den Frühschichten der Vergleichsgruppe 0:53 (95%-KI 0:13 – 3:31) in T2 und 0:29 (95%-KI 0:02 – 2:27) in T3). Bei den Spätschichten waren die Dauern in beiden Gruppen zwischen T2 und T3 rückläufig.

In der Gruppe mit Lighting-Habits-Intervention lag nur eine geringe Anzahl der Profile mit mehr als 5 Minuten über 1000 lx in T3 vor. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die LightWatcher verdeckt sein können (durch Schals, Jacken), auch wenn empfohlen wurde, diese an der äußersten Kleidungsschicht anzubringen. Weiterhin ist es denkbar, dass der Grenzwert von 1000lx bei am Oberkörper getragenen individuellen Lichtmessgeräten möglicherweise nicht optimal angesetzt ist und auch von der Tragweise abhängen kann. Vergleichende Analysen hierzu liegen aus der wissenschaftlichen Literatur noch nicht vor.

## **4.11 Übertragbarkeit auf andere Beleuchtungssysteme**

### **4.11.1 Untersuchung im Laboraufbau**

Tabelle 6 fasst die Ergebnisse zusammen, die mit den Leuchten 1 und 2 im Laboraufbau für warmweiße und tageslichtweiße Lichtfarben gemessen wurden.

Die Unterschiede in der Abstrahlcharakteristik (Abbildung 9 links und Mitte, S. 35) führen zu einer um etwa 10% niedrigeren vertikalen Beleuchtungsstärke bei Leuchte 2 im Vergleich zur Leuchte 1. Dies erklärt auch die Unterschiede in dieser Größenordnung in den MEDI-Werten beider Leuchten.

Die Spektralverteilungen der Leuchten (Abbildung 9 rechts, S. 35) sind sehr ähnlich und damit unterscheiden sich auch die  $a_{\text{mel},v}$ -Werte kaum. Mit beiden Leuchten lässt sich die Lichtfarbe zwischen warmweiß und tageslichtweiß variieren, so dass sich der  $a_{\text{mel},v}$ -Wert und damit der MEDI-Wert etwa verdoppeln bzw. halbieren lässt. Leuchte 1 bietet gegenüber der Leuchte 2 einen größeren Dynamikbereich von etwa 600 K. Leuchte 2 variiert die Lichtfarbe nur zwischen 3000 K und 6000 K. Beide Leuchten sind jedoch für eine dynamische Lichtfarbensteuerung geeignet.

**Tabelle 6. Vergleich der Messwerte für die Leuchten 1 und 2**

Allgemeinbeleuchtung	Leuchte 1				Leuchte 2			
CCT-Einstellwert	$E_{\text{hor}}$	$E_{\text{vert}}$	$a_{\text{mel},v}$	MEDI	$E_{\text{hor}}$	$E_{\text{vert}}$	$a_{\text{mel},v}$	MEDI
3000 K	500 lx	185 lx	0,44	90 lx	500 lx	169 lx	0,41	76 lx
5800 K	500 lx	188 lx	0,74	154 lx	500 lx	171 lx	0,76	142 lx

CCT: ähnlichste Farbtemperatur,  $E_{\text{hor}}$ : horizontale Beleuchtungsstärke,  $E_{\text{vert}}$ : vertikale Beleuchtungsstärke,  $a_{\text{mel},v}$ : melanopischer Wirkungsfaktor, MEDI: melanopisch äquivalente Tageslichtbeleuchtungsstärke  $E_{\text{mel},v,D65}$

#### 4.11.2 Simulation in DIALux

Die Ergebnisse der Simulation ohne arbeitsplatzbezogene Beleuchtung sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Werte der Leuchten zeigen Differenzen im Bereich bis 12% und damit in der Größenordnung, wie sie auch bei Untersuchungen im Laboraufbau (vgl. Kapitel 4.11.1) gemessen wurden.

**Tabelle 7. Berechnungsergebnisse in DIALux als Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung für 21 Arbeitsplätze, nur Allgemeinbeleuchtung für Ausführungen mit unterschiedlichen Leuchtentypen. Die Werte  $a_{\text{mel},v} = 0,4$  für warmweiße (ww) bzw.  $a_{\text{mel},v} = 0,8$  wurden für tageslichtweiße (tw) Lichtfarbe als Eckwerte des Dynamikbereichs angenommen und sind Grundlage für die Berechnung der Werte für  $\text{MEDI}_{\text{ww}}$  und  $\text{MEDI}_{\text{tw}}$ . Leuchte 1 entspricht dem im Feldversuch verwendeten Leuchtentyp, Leuchte 2 wurde im Laboraufbau untersucht.**

Leuchte	Dynamikbereich	$E_{\text{hor}}$	$E_{\text{vert}}$	$E_{\text{vert}}/E_{\text{hor}}$	$\text{MEDI}_{\text{ww}}$	$\text{MEDI}_{\text{tw}}$
Leuchte 1	2700 K bis 6500 K	497 lx $\pm$ 55 lx	222 lx $\pm$ 37 lx	0,45	93 lx	191 lx
Leuchte 2	3000 K bis 6000 K	479 lx $\pm$ 54 lx	229 lx $\pm$ 44 lx	0,48	96 lx	197 lx
Leuchte 3	2700 K bis 6500 K	478 lx $\pm$ 50 lx	235 lx $\pm$ 42 lx	0,49	99 lx	202 lx
Leuchte 4	2700 K bis 6500 K	482 lx $\pm$ 50 lx	234 lx $\pm$ 42 lx	0,49	98 lx	201 lx
Leuchte 5	2700 K bis 6500 K	459 lx $\pm$ 44 lx	234 lx $\pm$ 41 lx	0,51	98 lx	201 lx
Leuchte 6	2700 K bis 6500 K	431 lx $\pm$ 41 lx	206 lx $\pm$ 33 lx	0,48	86 lx	177 lx

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen im Laboraufbau und der Simulation mit unterschiedlichen Leuchtentypen lassen darauf schließen, dass sich mit dynamischen Leuchten anderer Hersteller ähnliche Werte für die Beleuchtungsstärke und damit bei gleicher Lichtfarbendynamik auch vergleichbare melanopisch bewertete Größen ergeben, wie in den untersuchten Bedingungen.

## 5 Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

### 5.1 Relevante Veröffentlichungen auf dem Forschungsgebiet seit Projektbeginn

In der Veröffentlichung von Brown et al. (Brown et al. 2022) wurden von einem internationalen Expertengremium Empfehlungen zu Beleuchtung in Innenräumen auf Grundlage der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse zusammengefasst. Hinsichtlich der Beleuchtung bei Schichtarbeit wurde darauf hingewiesen, dass der aktuelle Forschungsstand nicht ausreichend ist, um Empfehlungen abzugeben:

Brown, T. M.; Brainard, G. C.; Cajochen, C.; Czeisler, C. A.; Hanifin, J. P.; Lockley, S. W.; Lucas, R. J.; Münch, M.; O'Hagan, J. B.; Peirson, S. N.; Price, L. L. A.; Roenneberg, T.; Schlangen, L. J. M.; Skene, D. J.; Spitschan, M.; Vetter, C.; Zee, P. C.; Wright, K. P. (2022): Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. *PLoS biology*, 20 (3), e3001571.

In verschiedenen Studien wurde der Effekt von veränderter Beleuchtung untersucht. So wurde dynamische Beleuchtung in der Raumfahrt analysiert (Grant et al. 2024; Rahman et al. 2022). Weitere Studien beinhalteten die Untersuchung der Auswirkung von Beleuchtung in verschiedenen Settings in der Nacht bei in (Hébert et al. 2002; Sletten et al. 2021) sowie (Martin et al. 2021) oder auch Wirkungen beim Einsatz im Krankenhaus bei schwangeren Frauen (Bagci et al. 2022):

Rahman, S. A.; Kent, B. A.; Grant, L. K.; Clark, T.; Hanifin, J. P.; Barger, L. K.; Czeisler, C. A.; Brainard, G. C.; St Hilaire, M. A.; Lockley, S. W. (2022): Effects of dynamic lighting on circadian phase, self-reported sleep and performance during a 45-day space analog mission with chronic variable sleep deficiency. *Journal of pineal research*, 73 (4), e12826.

Grant, L. K.; Kent, B. A.; Rahman, S. A.; St Hilaire, M. A.; Kirkley, C. L.; Gregory, K. B.; Clark, T.; Hanifin, J. P.; Barger, L. K.; Czeisler, C. A.; Brainard, G. C.; Lockley, S. W.; Flynn-Evans, E. E. (2024): The effect of a dynamic lighting schedule on neurobehavioral performance during a 45-day simulated space mission. *Sleep advances : a journal of the Sleep Research Society*, 5 (1), zpae032.

Bagci, S.; Wieduwilt, A.; Alsat, E. A.; Blickwedel, J.; Strizek, B.; Di Battista, C.; Lachner, A.; Plischke, H.; Melaku, T.; Müller, A. (2022): Biodynamic lighting conditions preserve nocturnal melatonin production in pregnant women during hospitalization: A randomized prospective pilot study. *Frontiers in endocrinology*, 13, S. 1043366

Sletten, T. L.; Raman, B.; Magee, M.; Ferguson, S. A.; Kennaway, D. J.; Grunstein, R. R.; Lockley, S. W.; Rajaratnam, S. M. W. (2021): A Blue-Enriched, Increased Intensity Light Intervention to Improve Alertness and Performance in Rotating Night Shift Workers in an Operational Setting. *Nature and science of sleep*, 13, S. 647–657.

Hébert, M.; Martin, S. K.; Lee, C.; Eastman, C. I. (2002): The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *Journal of pineal research*, 33 (4), S. 198–203.

Martin, J. S.; Laberge, L.; Sasseville, A.; Bérubé, M.; Alain, S.; Lavoie, J.; Houle, J.; Hébert, M. (2021): Timely use of in-car dim blue light and blue blockers in the morning does not improve circadian adaptation of fast rotating shift workers. *Chronobiology international*, 38 (5), S. 705–719.

Insbesondere wurden auch Studien zur Rolle von Tageslicht für die Gesundheit aus größeren Kohorten wie der UK Biobank veröffentlicht, wie z. B. (Burns et al. 2021) die jedoch nicht direkt im Kontext von Schichtarbeit relevant sind. Ebenso wurden eine Reihe von Studien zu Schichtarbeit der untersuchten Endpunkte jedoch ohne Licht-Interventionsansatz publiziert, z. B. (Casjens et al. 2022).

Eine gute Übersicht über den aktuellen Kenntnisstand zu Beleuchtung bei Schichtarbeit wurde in (Vandahl et al. 2019) gegeben:

Vandahl, C.; Bieske, K.; Schierz, C. (2019): Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit (Literaturstudie). Ilmenau, [https://www.dguv.de/projektdatenbank/0445/literaturstudie\\_schichtarbeit\\_2021\\_11\\_15\\_korr\\_jh.pdf](https://www.dguv.de/projektdatenbank/0445/literaturstudie_schichtarbeit_2021_11_15_korr_jh.pdf).

## 5.2 Schutzrechtsanmeldungen

Seit Beginn 2020 wurden insgesamt 25 Patente zum Thema „Beleuchtung“ beim Deutschen Patentamt angemeldet. Hierunter waren keine, die dynamische Beleuchtung am Arbeitsplatz zum Inhalt hatten (Deutsches Patent- und Markenamt, Stand: 24.06.2024). Die Suche in der internationalen Datenbank Espacenet resultierte in insgesamt 164 Patenten zu den Stichworten zu „lighting, dynamic“. Angrenzende Patente waren Patente zur dynamischen Lichtsteuerung, die nicht im direkten Zusammenhang mit den Zielen und Fragestellungen des Forschungsprojekts verknüpft sind (US11324088B2 Lighting system for dynamic lighting control, CN114222407A Light dynamic adjusting system device matched with biological rhythm, method and application).

Im Rahmen der Studie wurden keine patentrechtlich relevanten Instrumente oder Methoden entwickelt oder verwendet. Es sind auch keine Patentanmeldungen vorgesehen, da das Projekt keine Technologien oder Verfahren umfasst, die für den Patentschutz in Frage kämen.



## 6 Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks und Schlussfolgerungen

### 6.1 Zusammenfassung

Für die Charakterisierung der Beleuchtungsverhältnisse in den Montagehallen wurde ein valides Messkonzept entwickelt, das sich bewährt hat. Durch die kontinuierlichen Messungen am Globalmessort konnten die Beleuchtungsverhältnisse während der Feldphasen T0 bis T3 überwacht und die gewünschten Beleuchtungsbedingungen nachgewiesen werden. Auf Basis der im Vorfeld durch die Charakterisierung von Beleuchtungsanlage und Steuerung gewonnenen Erkenntnisse war eine Abschätzung mittlerer MEDI-Werte an den Arbeitsplätzen für die Feldphasen möglich. Wertvoll war auch die Kontrolle der Beleuchtungssteuerung zwischen den Feldphasen, um im Problemfall eingreifen zu können. Auf diese Weise wurden die Zeitumstellungen überwacht und die Steuerkurven an frühere Sonnenaufgangs- und spätere Sonnenuntergangszeiten zwischen April und Oktober angepasst.

Aus den Messdaten der Globalmessung sind keine Aussagen über die Nutzung der Zusatzbeleuchtung an den Arbeitsplätzen möglich. Zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang erfasst die Globalmessung auch einfallendes Tageslicht. Eine Abschätzung bezüglich der Arbeitsplätze ist jedoch nur qualitativ möglich, ein Tageslichtquotient wurde nicht bestimmt. Die Messdaten wurden verwendet, um gleichzeitig eine Abschätzung über die Wetterbedingungen vorzunehmen und sonnige und trübe Tage im Untersuchungszeitraum zu erheben.

#### Kurzfristige Effekte der Beleuchtungsinterventionen

Die Beleuchtungsempfehlungen führten zu einer Verlängerung des Schlafs bei Frühschichten und einer längeren Aufenthaltsdauer am Tageslicht unter den Probanden in der Gruppe der Lighting-Habits-Intervention. An Wochenenden nach Spätschichten war jedoch ein eher negativer Effekt verbunden mit kürzeren Schlafdauern zu beobachten. Hinsichtlich der Beleuchtungsintervention in der Nacht zeigte sich eine Tendenz zu längerem Schlaf nach den Nachtschichten. In den Frühschichten war der Schlaf tendenziell kürzer, was jedoch auch bei der Vergleichsgruppe festzustellen war. In der Taglicht-Interventionsgruppe wurde eine geringere Schläfrigkeit zur Mitte der Frühschicht festgestellt. Es konnten keine Nachteile durch die niedrigere melanopisch wirksame Beleuchtung zum Ende der Spätschicht festgestellt werden. Kurzfristig lagen die Melatonin-Werte unter denen der Baseline, was jedoch hinsichtlich der Rolle der saisonalen Wirkungen noch genau herausgearbeitet werden muss. Die mittleren Reaktionszeiten der PVT-Tests der Taglicht-Interventionsgruppe waren sowohl in der Früh- als auch der Spätschicht im Follow-up T1 schneller als zur Baseline T0. Die Nachlicht-Interventionsgruppe zeigte im Follow-up T1 in der Frühschicht schnellere mittlere Reaktionszeiten als zur Baseline. Die mittleren Reaktionszeiten der Vergleichsgruppe waren in allen Schichtarten nahezu unverändert. Die Haarcortisol-Konzentrationen als Marker für Langzeitstress sanken bei den Teilnehmenden aller Gruppen. Die Teilnehmenden bewerteten die Helligkeit und Lichtfarbe der Hallenbeleuchtung in 2-Stunden-Abständen. In einer ersten deskriptiven Auswertung war die Zufriedenheit mit der Helligkeit und Lichtfarbe der Taglicht-Intervention besonders in den Frühschichten nach der Umstellung höher als im Ausgangszustand. In der Nachlicht-Interventionsgruppe gaben im Follow-up T1 weniger Teilnehmende als zur Baseline eine Bewertung ab, kurzfristig zeigte sich eher eine Verschlechterung nach der Umstellung.

## Längerfristige Effekte der Beleuchtungsumstellung

Längerfristig zeigte sich in der Nachtschichtgruppe ein längerer Schlaf sowohl an Arbeitstagen mit Nachtschicht als auch mit Spätschicht. Da die Nachtschicht in der Woche vor der Spätschicht stattfindet, sind Effekte durch die Vorwoche denkbar. In den Frühschichten war der Schlaf tendenziell bei allen Gruppen kürzer. Hinsichtlich der Hormonprofile zeigte sich längerfristig, dass die Melatonin-Werte in der ersten Nachthälfte unter denen der Baseline lagen, jedoch zum Ende der Nachtschicht höher waren. Dies würde auf eine Verschiebung hindeuten, jedoch ist hier die detaillierte Betrachtung unter Berücksichtigung der individuellen Verläufe notwendig. Weiterhin zeigte sich, dass die Beleuchtung in der ersten Schichthälfte längerfristig nicht zu erhöhten Cortisol-Werten führte. Zum Ende der Schicht zeigte sich ein Trend zu niedrigeren Cortisol-Werten. Insgesamt ist die Betrachtung der Verläufe unter Berücksichtigung der Aufwachzeiten wichtig. Die Taglicht-Interventionsgruppe erreichte im PVT-Test in allen Feldphasen die niedrigsten mittleren Reaktionszeiten während der Früh- und Spätschicht. Die Teilnehmenden der Nachtlucht-Interventionsgruppe erreichten in allen Feldphasen während der Nachtschichten niedrigere mittlere Reaktionszeiten als die Vergleichsgruppe. In weiteren statistischen Modellen wird geprüft werden, ob es Unterschiede in der Entwicklung der mittleren Reaktionszeiten, der Fehler und Performance Lapses gab. Beim Verlauf der Haarcortisol-Konzentrationen als Marker für Langzeitstress zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Es lagen saisonale Schwankungen vor. In der Tendenz sanken die HCC-Werte in allen Gruppen im Zeitverlauf. Mögliche Erklärungsansätze für rückläufigen Stress im Langzeitvergleich über die Effekte der Beleuchtungsinterventionen hinaus sind noch zu untersuchen. In den Feldphasen T2 und T3 bewerteten beide Interventionsgruppen die Helligkeit und Lichtfarbe der Hallenbeleuchtung häufiger als angenehm im Vergleich zur Ausgangsbeleuchtung. Multivariate Auswertungen werden zeigen, ob es Personengruppen gab, die die Umsetzung der dynamischen Beleuchtung bedeutend besser bewerteten.

Diese vorgestellten Ergebnisse bieten einen Überblick über die kurz- und längerfristigen Effekte der Beleuchtungsumstellung auf Schlaf, Schläfrigkeit, Melatonin, Cortisol und HCC-Werte. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die saisonalen Einflüsse und die komplexen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Endpunkten besser zu verstehen.

## 6.2 Limitationen

Aufgrund der SARS-CoV2-Pandemie lag die Rekrutierungsquote hinter den Erwartungen zu Projektbeginn zurück. In Abstimmung mit dem Forschungsbegleitkreis wurde entschieden, die Studie fortzuführen und gegebenenfalls orientierende Analysen durchzuführen, da die Studienpopulation dennoch deutlich größer war als bei vergleichbaren anderen Interventionsstudien. Durch die kurzfristige Einbettung von Befragungen zur Belastung durch die SARS-CoV2-Pandemie konnten Analysen zum Einfluss der individuellen Belastung durchgeführt werden. Diese zeigten insgesamt keinen starken Einfluss auf die untersuchten Endpunkte. Dennoch ist es möglich, dass eine zusätzliche Belastung in den verschiedenen Feldphasen bei allen Gruppen vorlag.

Vor diesem Hintergrund wurde eine potenzielle Rolle von Wetterdaten bei den Feldphasen deutlich. Da die Feldphasen im Winter und auch während der einsetzenden Ukraine-Krise stattfanden, wurden stärkere Schwankungen der Raumtemperaturen in den Hallen möglich, da Betrieben in Deutschland empfohlen wurde, die Mindesttemperatur am Arbeitsplatz als Energiesparmaßnahme herunterzusetzen. War dies im ursprünglichen Untersuchungsplan nicht vorgesehen, wird aktuell geprüft, ob Daten zum Raumklima in den Hallen während der Feldphasen eingebunden werden können. Daten zum Wetter während der Feldphasen wurden bereits bereitgestellt und sollen in die weitergehenden Analysen und Publikationen einfließen.

Für die Analyse der Freizeitempfehlungen wurden LightWatcher eingesetzt, die Daten für die Analyse der individuellen Lichtprofile sammelten. Im Kontext dieser groß angelegten Studie war dieser Teilaspekt mit einer geringen Anzahl an Geräten mit hohem Aufwand verbunden und lieferte nur eine geringe Anzahl Lichtprofile. Eine Möglichkeit für weitergehende Untersuchungen der individuellen Lichtprofile wird die Datenanalyse der in den Aktigraphie-Geräten eingebauten Lichtsensoren beinhalten. Diese werden jedoch aufgrund des Tragens über einen längeren Zeitraum meist unter der Kleidung getragen und sind daher nur bedingt aussagekräftig.

Lichtmesswerte für nichtvisuelle Lichtwirkungen sind üblicherweise vertikale Beleuchtungsstärken in Augenhöhe. Darauf beziehen sich auch die in diesem Bericht angegebenen MEDI-Werte. Die damit angegebene horizontale Blickrichtung entspricht aber nicht den Blickrichtungen während einer Tätigkeit. Bei der Mehrheit von Montagetätigkeiten ist der Blick auf die Hände innerhalb des Greifraums gerichtet. Orientierende Messungen zeigen typische Neigungswinkel der Blickrichtung von Mittel -30° bis -60° gegenüber der horizontalen Blickrichtung. Da Beleuchtung typischerweise über der Kopfhöhe installiert ist, sind durch die Blickrichtung nach unten deutlich geringere Beleuchtungsstärken am Auge zu erwarten. Bei orientierenden Messungen ergaben sich für typische Blickrichtungen ein Verhältnis der mittleren Beleuchtungsstärke am Auge zur vertikalen Beleuchtungsstärke von 0,6. Dies moduliert bei gleichem Lichtspektrum die melanopische Größen im gleichen Ausmaß (Bieske et al. 2023). Gegebenenfalls sind auch Alterseffekte bei den Betrachtungen von nichtvisuellen Lichtwirkungen zu berücksichtigen (DIN/TS 67600:2022-08; DIN/TS 5031-100:2021-11).

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung der Effekte der durchgeführten Interventionen an den Arbeitsplätzen ist die Ausgangssituation in der Baseline-Erhebung. So orientierte sich die Beleuchtung in beiden Hallen in den verschiedenen Arbeitsschichten bereits an den allgemeinen Empfehlungen. Insbesondere wurde in Montagehalle 2 während der Nachtschichten bereits eine Beleuchtung eingesetzt, die keine starke melanopisch Wirksamkeit besitzt und sich bereits an den Empfehlungen für Beleuchtung am Arbeitsplatz orientierte (Ausschuss für Arbeitsstätten 2018). Mit der Begrenzung der CCT auf maximal 4100 K und einer Akzeptanzgrenze von 3000°K lag kein großer Spielraum für Veränderungen in Halle 2 vor. In Halle 1 konnte zwischen 6500°K und 3000°K ein größerer Umfang an Lichtfarbenänderung realisiert werden. Bei größeren Reizunterschieden könnten deutlichere Effekte beobachtet werden.

### **6.3 Allgemeine Einschätzung von Beleuchtung bei Schichtarbeit auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse**

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Studie nach Ablauf des Forschungsprojekts dargestellt. Die Analyse der Endpunkte wird voraussichtlich hinsichtlich einer Reihe von Aspekten (z. B. Wetterdaten) verfeinert. Nach aktuellem Stand zeigen sich durch die durchgeführten Interventionen keine Nachteile für die Beschäftigten. Während für die psychomotorische Vigilanz und Schläfrigkeit am Tag vermutlich eher Vorteile zu sehen sind, zeigten sich in den Frühschichten hinsichtlich der Hauptschlafdauer leichte Rückgänge. Dies lässt sich möglicherweise mit einem „Sommerereffekt“ bei einer stärkeren melanopisch wirksamen Beleuchtung am Tag im Winter erklären, der durch weitere Studien mit einer größeren Studienpopulation geprüft werden sollte.

## 7 Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

### 7.1 Bisherige Umsetzung der Forschungsergebnisse

Im Verlauf des Forschungsprojektes wurden bereits einige Erkenntnisse zur Umsetzung von Beleuchtungsinterventionen in Feldstudien, Teilaspekte des Forschungsprojektes und Beschreibungen des Konzepts der Studie veröffentlicht, bzw. auf Tagungen vorgetragen.

Vorträge sowie Abstracts und Tagungsbände (Vortragende jeweils unterstrichen):

- Sylvia Rabstein, Katrin Rieger, Robert Herold, Sarah Affolderbach, Lukas Damerau, Karin Bieske, Christoph Schierz, Anna Arlinghaus, Dirk Pallapies, Thomas Brüning, Volker Harth, Thomas Behrens: *Interventionsstudie zu kurz- und langzeitlichen Auswirkungen dynamischer Beleuchtung am Arbeitsplatz und Lichtempfehlungen in der Freizeit bei Schichtarbeitenden Pilotstudie zur Akzeptanz verschiedener Beleuchtungssituationen für eine Intervention zu dynamischer Beleuchtung bei Schichtarbeitenden*. (erweiterter Vortrag und Abstract, 10. Symposium Licht und Gesundheit, Dortmund, April 2024)
- Robert Herold, Lukas Damerau, Sarah Affolderbach, Sophie Schümann, Katrin Rieger, Dirk Pallapies, Thomas Brüning, Thomas Behrens, Sylvia Rabstein, Volker Harth: *Anpassung an die Herausforderungen externer Krisen im Rahmen einer Schichtarbeits-Interventionsstudie*. (erweiterter Vortrag und Abstract, Forum AG Epidemiologie, 64. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeits- und Umweltmedizin, München, März 2024)
- Sarah Affolderbach, Robert Herold, Lukas Damerau, Katrin Rieger, Karin Bieske, Christoph Schierz, Dirk Pallapies, Thomas Behrens, Thomas Brüning, Sylvia Rabstein, Volker Harth: *Untersuchung von Unterschieden in der Vigilanz von Beschäftigten in verschiedenen Schichtsystemen mit unterschiedlicher Beleuchtung in der Baseline-Erhebung einer Interventionsstudie*. (Vortrag und Abstract, 64. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeits- und Umweltmedizin, München, März 2024)
- Katrin Rieger, Robert Herold, Sarah Affolderbach, Lukas Damerau, Karin Bieske, Christoph Schierz, Anna Arlinghaus, Dirk Pallapies, Thomas Brüning, Thomas Behrens, Volker Harth, Sylvia Rabstein: *Kurzzeitige Auswirkungen von dynamischer Beleuchtung am Arbeitsplatz auf die subjektive Schläfrigkeit von Schichtarbeitenden*. (Vortrag und Abstract, 64. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeits- und Umweltmedizin, München, März 2024)
- Sarah Affolderbach, Robert Herold, Lukas Damerau, Katrin Rieger, Karin Bieske, Christoph Schierz, Dirk Pallapies, Thomas Behrens, Thomas Brüning, Volker Harth, Sylvia Rabstein: *The effect of a dynamic light intervention on subjective and objective vigilance in shift workers*. (Effects of Light beyond Vision Results of a Scientific Workshop September 12<sup>th</sup> & 13<sup>th</sup> 2023, Federal Institute for Occupational Safety and Health (BauA), Dortmund. (baua: Focus). DOI 10.21934/baua:focus20231107, September 2023)

- Rabstein, Sylvia; Bieske, Karin; Herold, Robert; Rieger, Katrin; Schierz, Christoph; Brüning, Thomas; Harth, Volker; Behrens, Thomas: *Pilotstudie zur Akzeptanz verschiedener Beleuchtungssituationen für eine Intervention zu dynamischer Beleuchtung bei Schichtarbeitenden*. (Abstract und Vortrag, 18. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Epidemiologie Deutschen Gesellschaft für Epidemiologie, Würzburg 2023)
- Rabstein, Sylvia; Bieske, Karin; Herold, Robert; Rieger, Katrin; Schierz, Christoph; Brüning, Thomas; Harth, Volker; Behrens, Thomas: *Pilotstudie zur Akzeptanz verschiedener Beleuchtungssituationen für eine Intervention zu dynamischer Beleuchtung bei Schichtarbeitenden*. (Abstract und Kurzvortrag/Poster, 10. Symposium der Arbeitszeitgesellschaft, Wien 2023)
- Bieske, Karin; Schierz, Christoph; Rabstein, Sylvia; Harth, Volker: *Steuerung nichtvisueller Lichtwirkungen mit Einbindung arbeitsplatzbezogener Beleuchtung*. (Beitrag im Tagungsband und Vortrag, 25. Europäischer Lichtkongress LICHT2023, Salzburg. S. 212-223)

#### Publikationen:

- Rabstein, Sylvia; Lehmann, Maria (2022): *Das richtige Licht bei Schichtarbeit*. Kooperationsprojekt untersucht die Auswirkung von verschiedenen Lichtmustern, IPA-Journal (3), S. 29-31.

## 7.2 Weiterer Umsetzungs- und Verwertungsplan

Im Rahmen des Projekts wurde ein umfassender Plan zur Umsetzung und Verwertung der gewonnenen Forschungsdaten und Ergebnisse entwickelt. Dieser Plan umfasst mehrere Schwerpunkte und sieht eine fortlaufende Veröffentlichung der Ergebnisse in verschiedenen Formaten vor.

#### *Publikationen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften*

Es ist geplant, zu den einzelnen Themengebieten wissenschaftliche Publikationen in renommierten Fachzeitschriften zu veröffentlichen. Diese Publikationen werden sich auf die kurz- und langfristigen Auswirkungen dynamischer Beleuchtung am Arbeitsplatz sowie Beleuchtungsempfehlungen in der Freizeit bezogen auf die untersuchten gesundheitlichen Endpunkte konzentrieren:

- Schlafdauer und Schlafqualität sowie damit verbundene weitere Aspekte der Schlaf-Wach-Zyklen (z. B. sozialer Jetlag)
- Zirkadiane Profile der Hormone Melatonin und Cortisol im Speichel bei Nachtschichtarbeit
- Psychomotorische Vigilanz während der Arbeitsschicht
- Cortisol im Haar als Marker der individuellen Stressbelastung
- Individuelle Beleuchtungswahrnehmung
- Individuelle Schläfrigkeitsverläufe

Zusätzliche Aspekte werden die kurzfristige Integration von Fragebögen zur COVID-19-Pandemie in eine epidemiologische Feldstudie oder auch die Erhebung individueller Lichtprofile sein. Nach den ersten Publikationen ist weiterhin geplant, auch die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Endpunkten zu untersuchen. Insbesondere sind komplexe Modelle für die Analysen geplant, die verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigen. Derzeit wird beispielsweise geprüft, ob und wie Daten zu Wetter und Temperatur sowie das Raumklima in den Hallen in die Modelle eingebunden werden können. Analysen, die im ursprünglichen Forschungsplan nicht vorgesehen



waren und von der Verfügbarkeit der Daten abhängig sind, werden flexibel und in Abstimmung zwischen den Forschungspartnern verfolgt.

### *Beratung*

Neben den wissenschaftlichen Publikationen und der Teilnahme an wissenschaftlichen Kongressen planen wir auch die folgenden Schritte, um die Ergebnisse unserer Forschung in die Praxis umzusetzen und relevante Gremien zu beraten. Da die Erstellung der Publikationen und die Umsetzung der Beratung in einem dynamischen Forschungsumfeld stattfinden, wird kein fester Zeitplan festgelegt. Dies ermöglicht es uns, flexibel auf neue Erkenntnisse und Entwicklungen zu reagieren, ohne verbindliche Versprechungen hinsichtlich spezifischer Zeitrahmen zu machen.

- *Beratung von Gremien:*

Ein Ziel ist es, das Sachgebiet Beleuchtung der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) und die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) bezüglich hinsichtlich der aktuellen Publikationen aus dem Forschungsprojekt zu informieren. Bereits veröffentlichte Ergebnisse können in aktuelle Empfehlungen oder auch in passenden Medien der DGUV verbreitet und diskutiert werden.

- *Fachgespräche und Veranstaltungen:*

Es ist geplant, an Veranstaltungen und Fachgesprächen der DGUV sowie interessierten Fachgesellschaften oder Normungsgremien teilzunehmen, um unsere publizierten Ergebnisse und Empfehlungen zu diskutieren und zu verbreiten.

Anhand der qualitätsgesicherten Verwertung und sorgfältigen Analyse der Daten stellen wir sicher, dass die gewonnenen Erkenntnisse nicht nur in der wissenschaftlichen Gemeinschaft verbreitet, sondern auch in die relevanten Beratungsgremien integriert werden und gegebenenfalls Umsetzung in die Praxis finden. Insbesondere können sich aus den Ergebnissen und aus deren Interpretation im Kontext der wissenschaftlichen Literatur konkrete Empfehlungen für die Unfallversicherungsträger ergeben.

## **8 Anhänge**

### **8.1 Literaturverzeichnis**

### **8.2 Lichttechnisches Glossar**

### **8.3 Abkürzungsverzeichnis**

### **8.4 Tabellenverzeichnis**

### **8.5 Abbildungsverzeichnis**

### **8.6 Tabellen und Abbildungen**

### **8.7 Best Practice: Studienbegleitende lichttechnische Messungen**

## 8.1 Literaturverzeichnis

Angerer, P.; Schmook, R.; Elfantel, I.; Li, J. (2017): Night Work and the Risk of Depression. *Deutsches Arzteblatt international*, 114 (24), S. 404–411.

Ausschuss für Arbeitsstätten (2018): Empfehlung des Ausschusses für Arbeitsstätten (ASTA) - Künstliche biologisch wirksame Beleuchtung in Arbeitsstätten. Online verfügbar unter <https://www.baua.de/DE/Die-BAuA/Aufgaben/Geschaeftsfuehrung-von-Ausschuessen/ASTA/pdf/Beleuchtung.html>, zuletzt geprüft am 04.07.2024.

Ausschuss für Arbeitsstätten (2023): Beleuchtung und Sichtverbindung. Technische Regeln für Arbeitsstätten. Online verfügbar unter [https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?__blob=publicationFile).

Baczynska, K. A.; Khazova, M.; O'Hagan, J. B. (2019): Sun exposure of indoor workers in the UK - survey on the time spent outdoors. *Photochemical & photobiological sciences: Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, 18 (1), S. 120–128.

Bagci, S.; Wieduwilt, A.; Alsat, E. A.; Blickwedel, J.; Strizek, B.; Di Battista, C.; Lachner, A.; Plischke, H.; Melaku, T.; Müller, A. (2022): Biodynamic lighting conditions preserve nocturnal melatonin production in pregnant women during hospitalization: A randomized prospective pilot study. *Frontiers in endocrinology*, 13, S. 1043366.

Behrens, T.; Rabstein, S.; Wichert, K.; Erbel, R.; Eisele, L.; Arendt, M.; Dragano, N.; Brüning, T.; Jöckel, K.-H. (2017): Shift work and the incidence of prostate cancer. A 10-year follow-up of a German population-based cohort study. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 43 (6), S. 560–568.

Berson, D. M.; Dunn, F. A.; Takao, M. (2002): Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science (New York, N.Y.)*, 295 (5557), S. 1070–1073.

Bieske, K. (2010): Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme. Dissertation. Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik der TU Ilmenau, (11), Der Andere Verlag Tönning, ISBN 978-3-89959-999-2.

Bieske, K.; Schierz, Ch.; Rabstein, S.; Harth, V.: (2023): Steuerung nichtvisueller Lichtwirkungen mit Einbindung arbeitsplatzbezogener Beleuchtung. Salzburg 26.-29.03.2023: Licht 2023, Vortrag.

Bieske, K.; Vandahl, C.; Schierz, C. (2023): Einfluss der Blickrichtung auf das Licht für nichtvisuelle Lichtwirkungen. *Licht*, (7), S. 66–71.

Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.; Greeson, J. M.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M. D. (2001): Action spectrum for melatonin regulation in humans. Evidence for a novel circadian photoreceptor. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 21 (16), S. 6405–6412.

Brown, T. M.; Brainard, G. C.; Cajochen, C.; Czeisler, C. A.; Hanifin, J. P.; Lockley, S. W.; Lucas, R. J.; Münch, M.; O'Hagan, J. B.; Peirson, S. N.; Price, L. L. A.; Roenneberg, T.; Schlangen, L. J. M.; Skene, D. J.; Spitschan, M.; Vetter, C.; Zee, P. C.; Wright, K. P. (2022): Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. *PLoS biology*, 20 (3), e3001571.

Buijs, R. M.; Hermes, M. H.; Kalsbeek, A. (1998): The suprachiasmatic nucleus-paraventricular nucleus interactions. A bridge to the neuroendocrine and autonomic nervous system. *Progress in brain research*, 119, S. 365–382.

- Bundesamt, Statistisches (2018): Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Erwerbsbeteiligung der Bevölkerung, Ergebnisse des Mikrozensus zum Arbeitsmarkt 2017. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Servicesuche\\_Formular.html?templateQueryString=fachserie+4.1&cl2Taxonomies\\_Themen\\_0=arbeitsmarkt](https://www.destatis.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Servicesuche_Formular.html?templateQueryString=fachserie+4.1&cl2Taxonomies_Themen_0=arbeitsmarkt), zuletzt geprüft am 01.04.2019.
- Burns, A. C.; Saxena, R.; Vetter, C.; Phillips, A. J. K.; Lane, J. M.; Cain, S. W. (2021): Time spent in outdoor light is associated with mood, sleep, and circadian rhythm-related outcomes: A cross-sectional and longitudinal study in over 400,000 UK Biobank participants. *Journal of affective disorders*, 295, S. 347–352.
- Cajochen, C.; Münch, M.; Kriebitzsch, S.; Kräuchi, K.; Steiner, R.; Oelhafen, P.; Orgül, S.; Wirz-Justice, A. (2005): High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism*, 90 (3), S. 1311–1316.
- Casjens, S.; Brenscheidt, F.; Tisch, A.; Beermann, B.; Brüning, T.; Behrens, T.; Rabstein, S. (2022): Social jetlag and sleep debts are altered in different rosters of night shift work. *PloS one*, 17 (1), e0262049.
- Choi, L.; Liu, Z.; Matthews, C. E.; Buchowski, M. S. (2011): Validation of accelerometer wear and nonwear time classification algorithm. *Medicine and science in sports and exercise*, 43 (2), S. 357–364.
- CIE S 026/E:2018. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light. Wien: International Commission on Illumination (CIE).
- Cole, R. J.; Kripke, D. F.; Gruen, W.; Mullaney, D. J.; Gillin, J. C. (1992): Automatic sleep/wake identification from wrist activity. *Sleep*, 15 (5), S. 461–469.
- Cordina-Duverger, E.; Menegaux, F.; Popa, A.; Rabstein, S.; Harth, V.; Pesch, B.; Brüning, T.; Fritschi, L.; Glass, D. C.; Heyworth, J. S.; Erren, T. C.; Castaño-Vinyals, G.; Papantoniou, K.; Espinosa, A.; Kogevinas, M.; Grundy, A.; Spinelli, J. J.; Aronson, K. J.; Guénel, P. (2018): Night shift work and breast cancer: a pooled analysis of population-based case-control studies with complete work history. *European journal of epidemiology*, 33 (4), S. 369–379.
- DIN/TS 67600:2022-08. Deutsches Institut für Normung e. V.: Ergänzende Kriterien für die Lichtplanung und Lichtanwendung im Hinblick auf nichtvisuelle Wirkungen von Licht. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN/TS 5031-100:2021-11. Deutsches Institut für Normung e. V.: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Symbole und Wirkungsspektren. Berlin: Beuth Verlag.
- Fritschi, L.; Glass, D. C.; Heyworth, J. S.; Aronson, K.; Girschik, J.; Boyle, T.; Grundy, A.; Erren, T. C. (2011): Hypotheses for mechanisms linking shiftwork and cancer. *Medical hypotheses*, 77 (3), S. 430–436.
- Grant, L. K.; Kent, B. A.; Rahman, S. A.; St Hilaire, M. A.; Kirkley, C. L.; Gregory, K. B.; Clark, T.; Hanifin, J. P.; Barger, L. K.; Czeisler, C. A.; Brainard, G. C.; Lockley, S. W.; Flynn-Evans, E. E. (2024): The effect of a dynamic lighting schedule on neurobehavioral performance during a 45-day simulated space mission. *Sleep advances: a journal of the Sleep Research Society*, 5 (1), zpae032.
- Harvey, S. B.; Modini, M.; Joyce, S.; Milligan-Saville, J. S.; Tan, L.; Mykletun, A.; Bryant, R. A.; Christensen, H.; Mitchell, P. B. (2017): Can work make you mentally ill? A systematic meta-review

of work-related risk factors for common mental health problems. *Occupational and environmental medicine*, 74 (4), S. 301–310.

Hébert, M.; Martin, S. K.; Lee, C.; Eastman, C. I. (2002): The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *Journal of pineal research*, 33 (4), S. 198–203.

Huiberts, L. M.; Smolders, K. C. H. J.; Kort, Y. A. W. de (2017): Seasonal and time-of-day variations in acute non-image forming effects of illuminance level on performance, physiology, and subjective well-being. *Chronobiology international*, 34 (7), S. 827–844.

IARC Monographs Vol 124 group (2019): Carcinogenicity of night shift work. *The Lancet. Oncology*, 20 (8), S. 1058–1059.

Jensen, H. I.; Markvart, J.; Holst, R.; Thomsen, T. D.; Larsen, J. W.; Eg, D. M.; Nielsen, L. S. (2016): Shift work and quality of sleep: effect of working in designed dynamic light. *International archives of occupational and environmental health*, 89 (1), S. 49–61.

Juda, M.; Vetter, C.; Roenneberg, T. (2013): The Munich ChronoType Questionnaire for Shift-Workers (MCTQShift). *Journal of biological rhythms*, 28 (2), S. 130–140.

Kantermann, T.; Schierz, C.; Harth, V. (2018): Gesicherte arbeitsschutzrelevante Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen. Eine Literaturstudie. Online verfügbar unter [https://www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/KAN-Studie/de/2018\\_KAN-Literaturstudie\\_Nichtvisuelle\\_Wirkung\\_von\\_Licht.pdf](https://www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/KAN-Studie/de/2018_KAN-Literaturstudie_Nichtvisuelle_Wirkung_von_Licht.pdf), zuletzt geprüft am 01.04.2019.

Kazemi, Z.; Mazloumi, A.; Nasl Saraji, G.; Barideh, S. (2016): Fatigue and workload in short and long-haul train driving. *Work (Reading, Mass.)*, 54 (2), S. 425–433.

Kecklund, G.; Eriksen, C. A.; Akerstedt, T. (2008): Police officers attitude to different shift systems: association with age, present shift schedule, health and sleep/wake complaints. *Applied ergonomics*, 39 (5), S. 565–571.

Leger, D.; Bayon, V.; Elbaz, M.; Philip, P.; Choudat, D. (2011): Underexposure to light at work and its association to insomnia and sleepiness: a cross-sectional study of 13,296 workers of one transportation company. *Journal of psychosomatic research*, 70 (1), S. 29–36.

Leppämäki, S.; Partonen, T.; Piironen, P.; Haukka, J.; Lönnqvist, J. (2003): Timed bright-light exposure and complaints related to shift work among women. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 29 (1), S. 22–26.

Lotz, A.; Kendzia, B.; Gawrych, K.; Lehnert, M.; Brüning, T.; Pesch, B. (2013): Statistical methods for the analysis of left-censored variables. *GMS Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie*, 9 (2), Doc05;ISSN 1860-9171.

Lowden, A.; Akerstedt, T.; Wibom, R. (2004): Suppression of sleepiness and melatonin by bright light exposure during breaks in night work. *Journal of sleep research*, 13 (1), S. 37–43.

Lowden, A.; Åkerstedt, T. (2012): 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. *Chronobiology international*, 29 (5), S. 641–649.

Lowden, A.; Öztürk, G.; Reynolds, A.; Bjorvatn, B. (2019): Working Time Society consensus statements: Evidence based interventions using light to improve circadian adaptation to working hours. *Industrial health*.

Manenschijn, L.; van Kruysbergen, R. G. P. M.; Jong, F. H. de; Koper, J. W.; van Rossum, E. F. C. (2011): Shift work at young age is associated with elevated long-term cortisol levels and body mass index. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism*, 96 (11), E1862-5.



- Markytan, A.; Gall, D. (2021): Untersuchungen der Mehrkomponenten-Beleuchtung am Bildschirmarbeitsplatz. Abschlussbericht. TU Ilmenau, (12).
- Marquié, J.-C.; Tucker, P.; Folkard, S.; Gentil, C.; Ansiau, D. (2015): Chronic effects of shift work on cognition: findings from the VISAT longitudinal study. *Occupational and environmental medicine*, 72 (4), S. 258–264.
- Martin, J. S.; Laberge, L.; Sasseville, A.; Bérubé, M.; Alain, S.; Lavoie, J.; Houle, J.; Hébert, M. (2021): Timely use of in-car dim blue light and blue blockers in the morning does not improve circadian adaptation of fast rotating shift workers. *Chronobiology international*, 38 (5), S. 705–719.
- Office of the Report on Carcinogens, Division of the National Toxicology Program (2018): Draft Report on Carcinogens Monograph on Night Shift Work and Light at Night. Draft RoC Monograph on Night Shift Work and Light at Night. Online verfügbar unter [https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/about\\_ntp/.../2018/.../landraftmonograph20180824.pdf](https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/about_ntp/.../2018/.../landraftmonograph20180824.pdf), zuletzt geprüft am 01.04.2019.
- Owen, J.; Arendt, J. (1992): Melatonin suppression in human subjects by bright and dim light in antarctica: time and season-dependent effects. *Neuroscience letters*, 137 (2), S. 181–184.
- Pachito, D. V.; Eckeli, A. L.; Desouky, A. S.; Corbett, M. A.; Partonen, T.; Rajaratnam, S. M.; Riera, R. (2018): Workplace lighting for improving alertness and mood in daytime workers. *The Cochrane database of systematic reviews*, 3, CD012243.
- Pesch, B.; Harth, V.; Rabstein, S.; Baisch, C.; Schiffermann, M.; Pallapies, D.; Bonberg, N.; Heinze, E.; Spickenheuer, A.; Justenhoven, C.; Brauch, H.; Hamann, U.; Ko, Y.; Straif, K.; Brüning, T. (2010): Night work and breast cancer - results from the German GENICA study. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 36 (2), S. 134–141.
- ISO/CIE 23539:2023. Photometry - The CIE System of Physical Photometry. Genf und Wien: International Organization for Standardization (ISO) and International Commission on Illumination (CIE).
- Rabstein, S.; Burek, K.; Lehnert, M.; Beine, A.; Vetter, C.; Harth, V.; Putzke, S.; Kantermann, T.; Walther, J.; Wang-Sattler, R.; Pallapies, D.; Brüning, T.; Behrens, T. (2019): Differences in twenty-four-hour profiles of blue-light exposure between day and night shifts in female medical staff. *The Science of the total environment*, 653, S. 1025–1033.
- Rabstein, S.; Harth, V.; Justenhoven, C.; Pesch, B.; Plöttner, S.; Heinze, E.; Lotz, A.; Baisch, C.; Schiffermann, M.; Brauch, H.; Hamann, U.; Ko, Y.; Brüning, T. (2014): Polymorphisms in circadian genes, night work and breast cancer: results from the GENICA study. *Chronobiology international*, 31 (10), S. 1115–1122.
- Rabstein, S.; Harth, V.; Pesch, B.; Pallapies, D.; Lotz, A.; Justenhoven, C.; Baisch, C.; Schiffermann, M.; Haas, S.; Fischer, H.-P.; Heinze, E.; Pierl, C.; Brauch, H.; Hamann, U.; Ko, Y.; Brüning, T. (2013): Night work and breast cancer estrogen receptor status--results from the German GENICA study. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 39 (5), S. 448–455.
- Rahman, S. A.; Kent, B. A.; Grant, L. K.; Clark, T.; Hanifin, J. P.; Barger, L. K.; Czeisler, C. A.; Brainard, G. C.; St Hilaire, M. A.; Lockley, S. W. (2022): Effects of dynamic lighting on circadian phase, self-reported sleep and performance during a 45-day space analog mission with chronic variable sleep deficiency. *Journal of pineal research*, 73 (4), e12826.
- Reilecke, T. (2022): Messung dynamischer Beleuchtung an Industriearbeitsplätzen. Masterarbeit. TU Ilmenau.

- Rouch, I.; Wild, P.; Ansiau, D.; Marquié, J.-C. (2005): Shiftwork experience, age and cognitive performance. *Ergonomics*, 48 (10), S. 1282–1293.
- Saper, C. B. (2013): The central circadian timing system. *Current opinion in neurobiology*, 23 (5), S. 747–751.
- Sasseville, A.; Benhaberou-Brun, D.; Fontaine, C.; Charon, M.-C.; Hebert, M. (2009): Wearing blue-blockers in the morning could improve sleep of workers on a permanent night schedule. A pilot study. *Chronobiology international*, 26 (5), S. 913–925.
- Simons, K. S.; Boeijen, E. R. K.; Mertens, M. C.; Rood, P.; Jager, C. P. C. de; van den Boogaard, M. (2018): Effect of Dynamic Light Application on Cognitive Performance and Well-being of Intensive Care Nurses. *American journal of critical care: an official publication, American Association of Critical-Care Nurses*, 27 (3), S. 245–248.
- Slanger, T. E.; Gross, J. V.; Pinger, A.; Morfeld, P.; Bellinger, M.; Duhme, A.-L.; Reichardt Ortega, R. A.; Costa, G.; Driscoll, T. R.; Foster, R. G.; Fritschi, L.; Sallinen, M.; Liira, J.; Erren, T. C. (2016): Person-directed, non-pharmacological interventions for sleepiness at work and sleep disturbances caused by shift work. *The Cochrane database of systematic reviews*, (8), CD010641.
- Sletten, T. L.; Raman, B.; Magee, M.; Ferguson, S. A.; Kennaway, D. J.; Grunstein, R. R.; Lockley, S. W.; Rajaratnam, S. M. W. (2021): A Blue-Enriched, Increased Intensity Light Intervention to Improve Alertness and Performance in Rotating Night Shift Workers in an Operational Setting. *Nature and science of sleep*, 13, S. 647–657.
- Smolensky, M. H.; Sackett-Lundeen, L. L.; Portaluppi, F. (2015): Nocturnal light pollution and underexposure to daytime sunlight: Complementary mechanisms of circadian disruption and related diseases. *Chronobiology international*, 32 (8), S. 1029–1048.
- Stevens, R. G. (1987): Electric power use and breast cancer. A hypothesis. *American journal of epidemiology*, 125 (4), S. 556–561.
- Tähkämö, L.; Partonen, T.; Pesonen, A.-K. (2019): Systematic review of light exposure impact on human circadian rhythm. *Chronobiology international*, 36 (2), S. 151–170.
- Tanaka, K.; Takahashi, M.; Tanaka, M.; Takanao, T.; Nishinoue, N.; Kaku, A.; Kato, N.; Tagaya, H.; Miyaoka, H. (2011): Brief morning exposure to bright light improves subjective symptoms and performance in nurses with rapidly rotating shifts. *Journal of occupational health*, 53 (4), S. 258–266.
- Thapan, K.; Arendt, J.; Skene, D. J. (2001): An action spectrum for melatonin suppression. Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *The Journal of physiology*, 535 (Pt 1), S. 261–267.
- van Drongelen, A.; Boot, C. R. L.; Hlobil, H.; Smid, T.; van der Beek, A. J. (2016): Process evaluation of a tailored mobile health intervention aiming to reduce fatigue in airline pilots. *BMC public health*, 16, S. 894.
- Vandahl, C.; Bieske, K.; Schierz, C. (2019): Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit (Literaturstudie). Ilmenau, [https://www.dguv.de/projektdatenbank/0445/literaturstudie\\_schichtarbeit\\_2021\\_11\\_15\\_korr\\_jh.pdf](https://www.dguv.de/projektdatenbank/0445/literaturstudie_schichtarbeit_2021_11_15_korr_jh.pdf).
- Vetter, C.; Dashti, H. S.; Lane, J. M.; Anderson, S. G.; Schernhammer, E. S.; Rutter, M. K.; Saxena, R.; Scheer, F. A. J. L. (2018): Night Shift Work, Genetic Risk, and Type 2 Diabetes in the UK Biobank. *Diabetes care*, 41 (4), S. 762–769.

Vyas, M. V.; Garg, A. X.; Iansavichus, A. V.; Costella, J.; Donner, A.; Laugsand, L. E.; Janszky, I.; Mrkobrada, M.; Parraga, G.; Hackam, D. G. (2012): Shift work and vascular events: systematic review and meta-analysis. *BMJ (Clinical research ed.)*, 345, S. e4800.

## 8.2 Lichttechnisches Glossar

**Licht** *elektromagnetische Strahlung, die beim Menschen unmittelbar eine visuelle Empfindung oder Wahrnehmung auslösen kann*

**Wellenlänge**  $\lambda$  in nm *Länge einer Periode der elektromagnetischen Strahlung*

**Lichtstrom**  $\Phi$  in lm *Lichtleistung einer Lichtquelle*

$$\phi_v = K_m \sum_{780 \text{ nm}}^{380 \text{ nm}} \phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

$\phi_{e,\lambda}$  spektraler Strahlungsfluss in W/nm

$K_m$  photometrisches Strahlungsäquivalent bei 555 nm:  
 $K_m = 683 \text{ lm/W}$

$V(\lambda)$  spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges

*Gewichtungsfunktion zur Definition lichttechnischer Größen mit einer Empfindlichkeit im Spektralbereich zwischen 380 nm und 780 nm mit einem Maximum bei 555 nm*

$\Delta\lambda$  Wellenlängenintervall in nm  
*ergibt sich z. B. aus der spektralen Auflösung einer Messung, typisches Wellenlängenintervall für Berechnungen:  $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$*

**Bestrahlungsstärke**  $E_e$  in W/m<sup>2</sup> *strahlungsphysikalische Größe, die den auf eine Fläche auftreffenden Strahlungsfluss  $\Phi_e$  beschreibt, kann aus spektralen Bestrahlungsstärken berechnet werden:*

$$E_e = \sum_{\lambda_u}^{\lambda_o} E_{e,\lambda}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

$E_{e,\lambda}$  spektrale Bestrahlungsstärke in W/(m<sup>2</sup> nm)

**Beleuchtungsstärke**  $E$  in lx = lm/m<sup>2</sup> *lichttechnische Größe, die den pro Fläche auftreffenden Lichtstrom beschreibt. Typisch werden horizontale Beleuchtungsstärken angegeben, also der Lichteinfall auf eine horizontale Fläche.  $E_{\text{vert}}$  bezeichnet die vertikale Beleuchtungsstärke, beispielsweise für Angaben, die sich auf die Augenebene beziehen. Bei lichttechnischen Größen kann auf den Index  $v$  (visuell) auch verzichtet werden. Sie kann aus spektralen Bestrahlungsstärken berechnet werden:*

$$E_v = K_m \sum_{780 \text{ nm}}^{380 \text{ nm}} E_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

**Leuchtdichte**  $L$  in cd/m<sup>2</sup> = lm/(sr m<sup>2</sup>) *Maß für die Helligkeit einer Fläche*

$$L_v = K_m \sum_{780 \text{ nm}}^{380 \text{ nm}} L_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

$L_{e,\lambda}$  spektrale Strahldichte in W/(sr m<sup>2</sup> nm)

**melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke**  $E_{e, mel}$  in  $W/m^2$

Größe zur Beschreibung der nichtvisuellen Lichtwirkung

$$E_{e, mel} = \sum_{\lambda_u}^{\lambda_o} E_{e, \lambda}(\lambda) \cdot S_{mel}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

$S_{mel}(\lambda)$  Wirkungsfunktion für die spektrale Empfindlichkeit der ipRGC (intrinsisch photosensitive retinale Ganglienzellen)

Gewichtungsfunktion zur Definition melanopischer Größen  
größte Empfindlichkeit im Bereich zwischen 450 nm und 530 nm (Halbwertsbreite) mit einem Maximum bei 490 nm

**melanopischer Wirkungskfaktor**  $a_{mel, v}$

Verhältnis der melanopisch bewerteten Bestrahlungsstärke zur  $V(\lambda)$ -bewerteten Bestrahlungsstärke

$$a_{mel, v} = \frac{E_{e, mel}}{E_{e, v}} = \frac{E_{e, mel}}{E_v} \cdot K_m$$

$E_{e, v}$   $V(\lambda)$ -bewerteten Strahlungsgröße

$$E_{e, v} = \sum_{\lambda_u}^{\lambda_o} E_{e, \lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda = \frac{E_v}{K_m}$$

**melanopische äquivalente Tageslichtbeleuchtungsstärke**  $E_{v, mel, D65}$  in lx  
auch **MEDI**

Vergleichsgröße: Beleuchtungsstärke bei Tageslicht mit 6500 K (D65), die dieselbe melanopische Lichtwirkung hervorruft

$$\begin{aligned} E_{v, mel, D65} &= E_v \cdot a_{mel, v} \cdot 1,10357 = E_{e, mel} \cdot K_m \cdot 1,10357 \\ &= E_{e, mel} \cdot 683 \frac{lm}{W} \cdot 1,10357 = E_{e, mel} \cdot 753,7 \frac{lm}{W} \end{aligned}$$

**Spektrum**

spektrale Verteilung einer Strahlungsgröße abhängig von der Wellenlänge:  $E_{e, \lambda}(\lambda)$ ,  $\Phi_{e, \lambda}(\lambda)$ ,  $L_{e, \lambda}(\lambda)$

**Lichtfarbe**

beschreibt das farbliche Aussehen des Lichts einer Lichtquelle; wird durch die (ähnlichste) Farbtemperatur CCT in Kelvin (K) gekennzeichnet. Weißes Licht mit einer höheren ähnlichsten Farbtemperatur besitzt einen höheren relativen Spektralanteil im kurzwelligen Bereich im Vergleich zu niedrigeren ähnlichsten Farbtemperaturen, die eine wärmere (orange-gelbliche) Lichtfarbe besitzen. Dadurch ist deren nicht visuelle Lichtwirkung entsprechend größer.

**Farbwiedergabeindex CIE  $R_a$**

Kennzahl zur Beschreibung der Farbwiedergabeeigenschaft einer Lichtquelle, deren Spektrum der Farbeindruck farbiger Objekte bestimmt

**Transmissionsgrad  $\tau$**

beschreibt Lichtdurchlässigkeit und Filterwirkung eines Materials

**Lichtausbeute**  
in  $lm/W$

Verhältnis von Lichtstrom zur verbrauchten elektrischen Leistung, Maß dafür, wie gut eine elektrische Lichtquelle die elektrische Leistung in Licht umwandelt

**Lichtstärkeverteilungskurve (LVK)**

Darstellung für Lichtstärkeverteilung einer Lichtquelle mit der die Abstrahlcharakteristik beschrieben wird

basierend auf (DIN/TS 5031-100:2021-11) Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Symbole und Wirkungsspektren; (ISO/CIE 23539:2023) Photometry - The CIE System of Physical photometry und (CIE S 026/E:2018) CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light.



### 8.3 Symbole und Abkürzungen

Symbol/ Abkürzung	Bedeutung
95%-KI	95%-Konfidenzintervall
$a_{\text{mel},v}$	melanopischer Wirkungsfaktor
ASTA	Ausschuss für Arbeitsstätten
ASR	Arbeitsstättenregelung
AllgB	Allgemeinbeleuchtung
APL	Arbeitsplatzbezogene Beleuchtung
APL+B	Arbeitsplatzbezogene Beleuchtung mit Blende
BG RCI	Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie
BMI	<i>englisch Body-Mass-Index</i> , Körpermasse-Index
bzw.	Beziehungsweise
CCT	ähnlichste Farbtemperatur
$\Delta\text{CCT}$	Bereich der ähnlichsten Farbtemperatur, Dynamikumfang der Lichtfarbenänderung
COPSOQ	<i>englisch COPENHAGEN PSYCHOSOCIAL QUESTIONNAIRE</i> , Kopenhagener Fragebogen zu psychosozialen Belastungen
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DIALux	Lichtplanungssoftware
D65	Lichtart D65 (Tageslicht bei 6500 K)
$\Delta\text{CCT}$	Bereich der Lichtfarbenänderung
ELISA	Enzyme-Linked Immunosorbent Assay
$E_{\text{vert}}$	vertikale Beleuchtungsstärke
$E_{\text{hor}}$	horizontale Beleuchtungsstärke
$E_{\text{mel},v,d65}$	melanopisch äquivalente Tageslichtbeleuchtungsstärke (auch MEDI)
e.V.	eingetragener Verein
ggf.	gegebenenfalls
GLM	Gemischtes lineares Modell
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GM	Geometrischer Mittelwert
GT3X-BT	Modellbezeichnung eines Aktigraphie-Geräts von Actigraph (Pensacola, Florida, USA)
HCC	<i>englisch Hair Cortisol Concentration</i> , Haarcortisol-Konzentration
IARC	<i>englisch International Agency for Research into Cancer</i> , Internationale Agentur für Krebsforschung
IPA	Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der DGUV
ipRGC	Intrinsische lichtempfindliche retinale Ganglienzellen
IR	Infrarot
KAN	Kommission Arbeitsschutz und Normung
K	Kelvin, Einheit der Farbtemperatur
KSS	<i>englisch Karolinska Sleepiness Scale</i> , Schläfrigkeitsskala
LED	<i>englisch Light Emitting Diode</i> , lichtemittierende Diode
Lighting-Habits, LH	<i>englisch Lighting</i> , Licht/Beleuchtung, <i>Habits</i> , Gewohnheiten
lm	Lumen, Einheit des Lichtstroms
LMM	Lineares gemischtes Modell
LVK	Lichtstärkeverteilungskurve
lx	Lux, Einheit der Beleuchtungsstärke
m	Anzahl (meist proben- oder untersuchungsbezogen)
m	Meter
mm	Millimeter

Symbol/ Abkürzung	Bedeutung
M	Mittelwert
MEDI	<i>englisch</i> Melanopic Equivalent Daylight Illuminance melanopisch äquivalente Tageslichtbeleuchtungsstärke $E_{\text{mel},v,d65}$
MSF <sub>sc</sub>	<i>englisch</i> Mid Sleep on Free days after late shifts Sleep Corrected, Schlafmitte an freien Tagen nach Spätschicht, korrigiert nach längerem Schlaf am Wochenende
N	Anzahl (personenbezogene Grundgesamtheit)
n	Anzahl
NASA-TLX	<i>englisch</i> NASA Task Load Index, NASA-Fragebogen zur Arbeitsbelastung
n. b.	nicht bestimmbar
nm	Nanometer, Einheit der Wellenlänge
nmol/L	Nanomol pro Liter
Nr.	Nummer
NSC	Nucleus Suprachiasmaticus
OR	Odds Ratio Schätzung
pg/ml	Pikogramm pro Milliliter
PRISM	Software Graph-Pad PRISM
PVT-192	<i>englisch</i> Psychomotor Vigilance Task Monitor, psychomotorische Vigilanztestung
R	Statistik-Software und Programmiersprache R
RDMO	Research Data Management Organiser
RE54041	ELISA-Kit für Melatonin von IBL International GmbH
RE2611	ELISA-Kit für Cortisol von IBL International GmbH
rMEQ	<i>englisch</i> reduced Morningness-Eveningness Questionnaire, reduzierter Fragebogen zu Bestimmung der zirkadianen Präferenz
RTCV	<i>englisch</i> Reaction Time Coefficient of Variation, Reaktionszeitvariationskoeffizient
s.	siehe
S.	Seite
SARS-CoV2	Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus
SAS	Statistisches Analyse System
SD	<i>englisch</i> Standard Deviation, Standardabweichung
SOP	<i>englisch</i> Standard Operating Procedure, Standardarbeitsanweisung
T0	Baseline-Erhebung, erste Feldphase, Oktober/November 2021
T1	erste Follow-up-Erhebung, Januar/Februar 2022
T2	zweite Follow-up-Erhebung, Oktober/November 2022
T3	dritte Follow-up-Erhebung, Januar/Februar 2023
TU	Technische Universität
u. a.	unter anderem
UKE	Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
usw.	und so weiter
UV	Ultraviolett
VK	Variationskoeffizient
ZfAM	Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin
z. B.	zum Beispiel
XIMES	Firma XIMES GmbH, Erlangen
$\Phi$	Lichtstrom in lm
$\lambda$	Wellenlänge in nm
$\tau$	Transmissionsgrad
$\tau_{V,D65}$	visueller Transmissionsgrad bei D65
$\tau_{\text{mel},D65}$	melanopischer Transmissionsgrad bei D65
$\chi^2$	$\chi^2$ Chi Quadrat Test, Testverfahren der Statistik

## 8.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Spektralverteilungen für unterschiedliche Lichtfarben der Hallenbeleuchtung mit Angaben zum melanopischen Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ und zum MEDI-Wert bei Beleuchtungsstärken am Auge von $E_{vert} = 250$ lx bzw. $E_{vert} = 125$ lx. Die unterste Zeile enthält prozentuale Werte, die sich durch die Änderung der Lichtfarbe ausgehend von 4000 K ergeben.....	11
Tabelle 2. Mittelwerte und Standardabweichung der Messung an 11 Arbeitsplätzen in Halle 1 (Lichtintervention am Tag) und an 21 Arbeitsplätzen in Halle 2 (Lichtintervention in der Nacht), nur Allgemeinbeleuchtung .....	14
Tabelle 3. Steuerwerte und zugehörige Zeiträume für die Bestimmung der Kennwerte der Beleuchtungssteuerung .....	32
Tabelle 4. Mittelwerte und Standardabweichungen für die Messwerte von Lichtfarbe (CCT), vertikalen Beleuchtungsstärke ( $E_{vert}$ ) und MEDI-Wert am Globalmessort in Montagehalle 1 während der Feldphasen für jeweils 3 Wochen zum Vergleich mit den Steuerwerten, Zeiträume nach Tabelle 3, S. 32.....	45
Tabelle 5. Mittelwerte und Standardabweichungen für die Messwerte von Lichtfarbe (CCT), vertikalen Beleuchtungsstärke ( $E_{vert}$ ) und MEDI-Wert am Globalmessort in Montagehalle 2 während der Feldphasen zum Vergleich mit den Steuerwerten, Zeiträume nach Tabelle 3, S. 32 .....	45
Tabelle 6. Vergleich der Messwerte für die Leuchten 1 und 2 .....	47
Tabelle 7. Berechnungsergebnisse in DIALux als Mittelwert $\pm$ Standardabweichung für 21 Arbeitsplätze, nur Allgemeinbeleuchtung für Ausführungen mit unterschiedlichen Leuchtentypen. Die Werte $a_{mel,v} = 0,4$ für warmweiße (ww) bzw. $a_{mel,v} = 0,8$ wurden für tageslichtweiße (tw) Lichtfarbe als Eckwerte des Dynamikbereichs angenommen und sind Grundlage für die Berechnung der Werte für $MEDI_{ww}$ und $MEDI_{tw}$ . Leuchte 1 entspricht dem im Feldversuch verwendeten Leuchtentyp, Leuchte 2 wurde im Laboraufbau untersucht. ....	47

## Tabellen im Anhang

Tabelle A 1. Lichttechnische Daten der für die Simulation verwendeten der Leuchten .....	75
Tabelle A 2. Übersicht zu untersuchten Gläsern mit Blaulichtfilter mit Angabe zum visuellen ( $\tau_{V,D65}$ ) und melanopischen ( $\tau_{mel,D65}$ ) Transmissionsgrad bei Tageslicht (D65) .....	76
Tabelle A 3. Übersicht zu den Teilnehmendenzahlen der einzelnen Feldphasen (Interviews in T0 – T3) .....	78
Tabelle A 4. Ziehung der Gruppe für die Lighting-Habits-Intervention am 24.10.2022.....	79
Tabelle A 5. Beschreibung der Studienpopulation .....	79
Tabelle A 6. Beschreibung der Studienpopulation zur Analyse der Schlafdauer.....	80
Tabelle A 7. Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der Hauptschlafdauer in Stunden nach Schichtart und Feldphase .....	81
Tabelle A 8. Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall des Hauptschlafs in Stunden nach Schichtart und Feldphase .....	82
Tabelle A 9. Beschreibung der Studienpopulation zur Analyse der psychomotorischen Vigilanz .....	87
Tabelle A 10. Mittlere Reaktionszeiten der Psychomotorischen Vigilanz (in ms) nach Ausschluss von Lapses und Fehlstarts nach Untersuchungsgruppe und Feldphase .....	88
Tabelle A 11. Beschreibung der Studienpopulation mit Schläfrigkeitsangaben.....	90
Tabelle A 12. Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der Karolinska Sleepiness Scale für die Taglicht-Interventions- und Vergleichsgruppe nach Feldphase .....	91
Tabelle A 13. Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der Karolinska Sleepiness Scale der Nachtlicht-Interventions- und Vergleichsgruppe nach Feldphasen .....	92
Tabelle A 14. Beschreibung der Melatonin-Werte (in pg/ml) in der Nachtlicht-Interventionsgruppe nach Feldphase .....	97
Tabelle A 15. Beschreibung der Cortisol-Werte (in nmol/L) in der Nachtlicht-Interventionsgruppe nach Feldphase .....	99
Tabelle A 16. Beschreibung der Studienpopulation mit Haarproben für die Analyse der Haarcortisol-Konzentration zur Baseline <sup>1</sup> .....	101

Tabelle A 17. Geometrische Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Haarcortisol-Konzentration (in pg/mg) nach Interventionsgruppe und Feldphase nach Ausschluss von n = 1 Person aufgrund Diabetes mellitus Typ 1 .....	102
Tabelle A 18. Beschreibung der Studienpopulation mit Angaben zur Einschätzung der Beleuchtung in Hinblick auf Helligkeit und Lichtfarbe zur Baseline.....	105
Tabelle A 19. Anzahl und Anteil der Angaben zur Hallenbeleuchtung, die in Hinblick auf die Helligkeit als „angenehm“ eingeschätzt haben .....	106
Tabelle A 20. Anzahl und Anteil der Angaben zur Hallenbeleuchtung, die in Hinblick auf die Lichtfarbe als „angenehm“ eingeschätzt haben .....	109
Tabelle A 21. Beschreibung der Studienpopulationen mit Informationen zu Umsetzung der Lighting-Habits-Empfehlungen .....	112
Tabelle A 22. Eigenangaben der Teilnehmenden zu den Lighting-Habits-Empfehlungen zu T3 (Befragungen und Studienhandys) .....	113
Tabelle A 23. Dauer des Aufenthalts unter Tageslicht im Empfehlungszeitraum (in h:mm) mittels LightWatcher <sup>1</sup> nach Schichtart in Lighting-Habits-Gruppe und Vergleichsgruppe in T2 und T3.....	115

## 8.5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Untersuchungsgruppen und Beleuchtungsintervention .....	7
Abbildung 2. Bilder der Montagehallen, links: Montagehalle 1 mit Oberlichtern für Lichtintervention am Tag in Früh- und Spätschicht, rechts: Montagehalle 2 mit Sheddach für Lichtintervention in der Nachtschicht	11
Abbildung 3. links: Typischer Montagearbeitsplatz mit Arbeitsplatzleuchte (APL), Mitte: symmetrische und bereitstrahlende Lichtstärkeverteilung der APL, rechts: Spektralverteilung der APL mit CCT = 4000 K	12
Abbildung 4. links: Skizze der Messgeometrie für Größen, die auf vertikaler ( $E_{\text{vert}}$ ) und horizontaler ( $E_{\text{hor}}$ ) Ebene am Montagearbeitsplatz mit Arbeitsplatzbeleuchtung (APL) gemessen werden. rechts: Zeitgleich erfolgten Spektralmessungen am Globalmessplatz und Messungen am realen Arbeitsplatz. Dieser Arbeitsplatz wurde als Referenzmessplatz gewählt. Gezeigt ist die modifizierte APL, die mit einer Blende zur Kontrolle der Lichtabstrahlung versehen wurde. ....	13
Abbildung 5. links: Einfluss der Arbeitsplatzbeleuchtung (APL) auf den wirksamen Dynamikbereich der ähnlichsten Farbtemperatur $\Delta\text{CCT}$ für die vertikale Augenebene einer Person in einer Höhe von 1,6 m bei einer Blickrichtung geradeaus bei 100% Lichtstrom der APL und rechts: nach der Modifikation Arbeitsplatzbeleuchtung mit Blende (APL+B) und Reduktion des Leuchtenlichtstroms auf 50%.....	17
Abbildung 6. Zeitlicher Verlauf der Steuerwerte Lichtfarbe (CCT) und Lichtleistung ( $\phi$ ) und die resultierenden mittleren MEDI-Werte für dynamische Beleuchtung am Tag in Früh- und Spätschicht in Montagehalle 1 während der Feldphasen T1 - T3 im Vergleich zur Baseline T0. Zusätzlich ist der Effekt durch die arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL mit Blende) angegeben. Tageslicht ist dabei nicht berücksichtigt. Zusätzlich eingezeichnet sind die Zeiträume ① und ② für die Überprüfung der Beleuchtungsparameter nach Tabelle 3, S 32. ....	19
Abbildung 7. Zeitlicher Verlauf der Steuerwerte Lichtfarbe (CCT) und Lichtleistung ( $\phi$ ) und die resultierenden mittleren MEDI-Werte für dynamische Beleuchtung in der Nachtschicht in Halle 2 während der Feldphasen T1 bis T3 im Vergleich zur Baseline. Zusätzlich ist der Effekt durch die arbeitsplatzbezogene Beleuchtung (APL mit Blende) angegeben. Zusätzlich eingezeichnet sind die Zeiträume ①, ② und ③ für die Überprüfung der Beleuchtungsparameter nach Tabelle 3, S. 32. ....	20
Abbildung 8. Grundaufbau des Laborarbeitsplatzes im verspiegelten Versuchsraum mit identischer Arbeitsplatzleuchte (APL) wie in der Felduntersuchung (links); mit einer Blende modifizierter Arbeitsplatzleuchte und unterschiedlichen Leuchten für die Allgemeinbeleuchtung (rechts). Beide Leuchten sind symmetrisch zum Arbeitsplatz und mittig im Raum angeordnet. ....	35
Abbildung 9. Lichtstärkeverteilung in charakteristischen Ebenen (C0-180 und C90-270) der Leuchte 1 (links) und der Leuchte 2 (Mitte); relative spektrale Verteilungen beider Leuchten für unterschiedliche Lichtfarben, normiert auf gleichen Lichtstrom (rechts) .....	35
Abbildung 10. Darstellung der Montagehalle 2 in DIALux mit eingeschalteter Beleuchtung in der Halle und an den Arbeitsplätzen .....	36

### Abbildungen im Anhang

Abbildung A 1. Hallenplan mit einer Übersicht zu den Arbeitsplätzen – Montagehalle 1 .....	71
Abbildung A 2: Leuchtenplan – Montagehalle 1 .....	71
Abbildung A 3: Hallenplan mit einer Übersicht zu den Arbeitsplätzen – Montagehalle 2 .....	72
Abbildung A 4: Leuchtenplan – Montagehalle 2 .....	72
Abbildung A 5: Hallenbeleuchtung links: Foto der Leuchte, die als Hallenbeleuchtung (AllgB) eingesetzt ist, Mitte: Lichtstärkeverteilung, tiefbreitstahlend, rechts: Spektralverteilung der warmweißen und tageslichtweißen LED-Typen.....	73
Abbildung A 6: Arbeitsplatzbezogene Beleuchtung links: Montagearbeitsplatz mit Arbeitsplatzleuchte (APL), Mitte: Lichtstärkeverteilung der APL, symmetrische bereitstrahlend, rechts: Spektralverteilung der APL mit CCT = 4000 K .....	73
Abbildung A 7: Überblick der Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) der für die Simulation verwendeten Leuchten; Dargestellt sind die charakteristischen Ebenen C0-180 und C90-270, die quer und längs zur Leuchtenachse orientiert sind. Die Drehachse steht senkrecht zur Leuchtenachse. ....	74
Abbildung A 8: Spektrale Transmission von Gläsern mit Blaulichtfilter, Bezeichnung nach Tabelle A 2 .....	77



Abbildung A 9. Adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) der Dauer des Hauptschlafes (in h:mm) für Feldphasen T2 und T3 in den Vergleichsgruppen mit und ohne Lighting-Habits-Intervention adjustiert nach Datenherkunft (Aktigraphie, Schlaftagebuch), Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt und Bildungslevel; Interaktionsterme für die Interaktion von Gruppe und Feldphase .....	83
Abbildung A 10. Adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) der Dauer des Hauptschlafes (in h:mm) bei Frühschicht für Feldphasen Baseline bis T3 in der Taglicht- und Nachtlicht-Interventionsgruppe und Vergleichsgruppe (ohne Nachrekrutierte und ohne Lighting-Habits-Intervention; adjustiert nach Datenherkunft (Aktigraphie, Schlaftagebuch), Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt und Bildungslevel; Interaktionsterme für die Interaktion von Gruppe und Feldphase .....	84
Abbildung A 11. Adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) der Dauer des Hauptschlafes (in h:mm) bei Spätschicht für Feldphasen Baseline bis T3 in der Taglicht- und Nachtlicht-Interventionsgruppe und Vergleichsgruppe (ohne Nachrekrutierte und ohne Lighting-Habits-Intervention) adjustiert nach Datenherkunft (Aktigraphie, Schlaftagebuch), Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt und Bildungslevel; Interaktionsterme für die Interaktion von Gruppe und Feldphase .....	85
Abbildung A 12. Adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) der Dauer des Hauptschlafes (in h:mm) bei Nachtschicht für Feldphasen Baseline bis T3 in der Taglicht- und Nachtlicht-Interventionsgruppe und Vergleichsgruppe (ohne Nachrekrutierte und ohne Lighting-Habits-Intervention); adjustiert nach Datenherkunft (Aktigraphie, Schlaftagebuch), Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt und Bildungslevel; Interaktionsterme für die Interaktion von Gruppe und Feldphase .....	86
Abbildung A 13. Adjustierte Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der mittleren PVT-Reaktionszeiten nach Untersuchungsgruppe und Feldphase.....	89
Abbildung A 14. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Schläfrigkeitsangaben in den Frühschichten nach Untersuchungsgruppe und Feldphase .....	94
Abbildung A 15. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Schläfrigkeitsangaben (nach Karolinska Sleepiness Scale) in den Spätschichten nach Untersuchungsgruppe und Feldphase.....	95
Abbildung A 16. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Schläfrigkeitsangaben (nach Karolinska Sleepiness Scale) in den Nachtschichten nach Untersuchungsgruppe und Feldphase.....	96
Abbildung A 17. Boxplots der logarithmierten Melatonin-Werte (in pg/ml) der Nachtlicht-Interventionsgruppe nach Feldphase; die Zeitpunkte der Speichelprobenahme entsprechen 1 = Schichtbeginn, 2 = nach 2 Stunden, 3 = Schichtmitte, 4 = nach 6 Stunden, 5 = Schichtende, 6 = vor dem Schlafen, 7 = nach dem Aufwachen, 8 = ca. 30 Minuten nach dem Aufwachen .....	98
Abbildung A 18. Boxplots der logarithmierten Cortisol-Werte (in nmol/L) der Nachtlicht-Interventionsgruppe nach Feldphase; die Zeitpunkte der Speichelprobenahme entsprechen 1 = Schichtbeginn, 2 = nach 2 Stunden, 3 = Schichtmitte, 4 = nach 6 Stunden, 5 = Schichtende, 6 = vor dem Schlafen, 7 = nach dem Aufwachen, 8 = ca. 30 Minuten nach dem Aufwachen .....	100
Abbildung A 19. Geometrische Mittelwerte und Standardfehler der Haarcortisol-Konzentration (in pg/mg) nach Untersuchungsgruppe und Feldphase.....	103
Abbildung A 20. Geometrische Mittelwerte und Standardfehler der Haarcortisol-Konzentration (in pg/mg) nach Untersuchungsgruppe und Feldphase.....	103
Abbildung A 21. Adjustierte Mittelwerte und 95%- Konfidenzintervalle der Haarcortisol-Konzentration (in pg/mg) nach Untersuchungsgruppe und Feldphase .....	104

## 8.6 Tabellen und Abbildungen

Hallenplan mit einer Übersicht zu den Arbeitsplätzen sowie Leuchtenplan

Montagehalle 1 zur Untersuchung der Lichtintervention am Tag in Früh- und Spätschicht

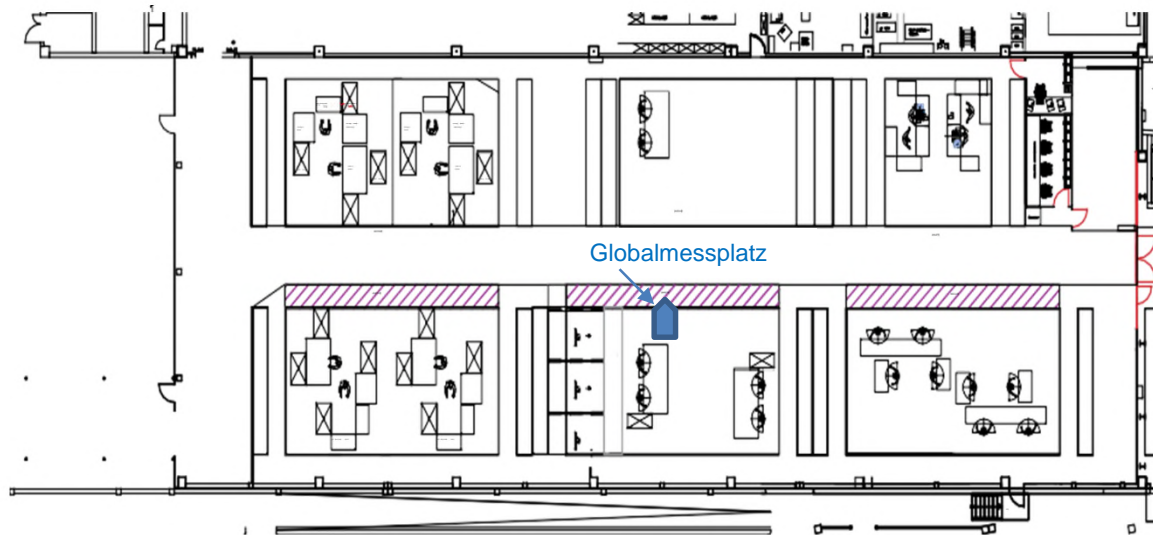
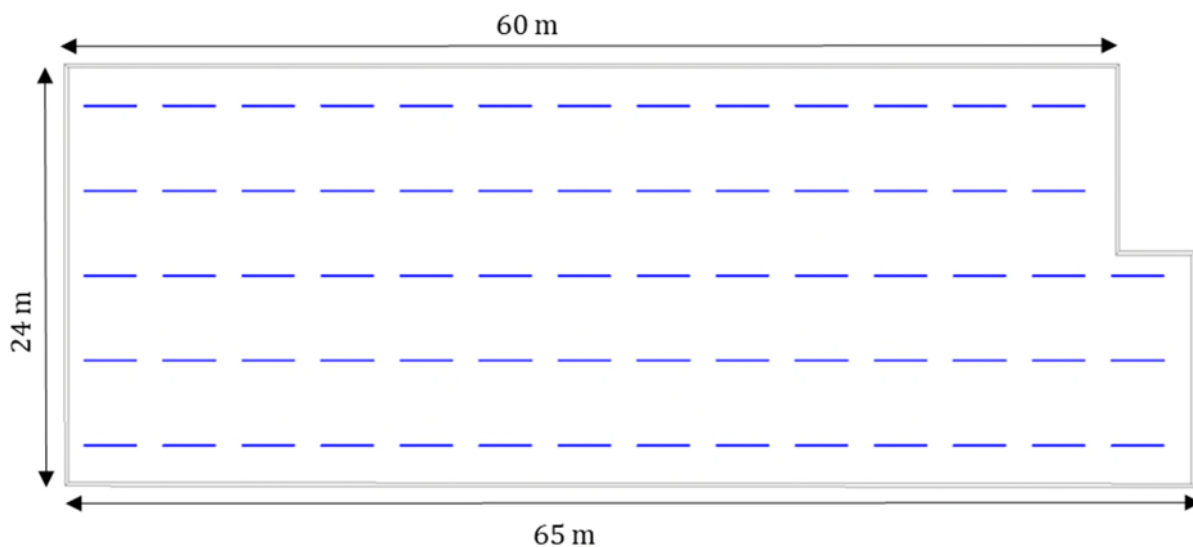


Abbildung A 1. Hallenplan mit einer Übersicht zu den Arbeitsplätzen – Montagehalle 1

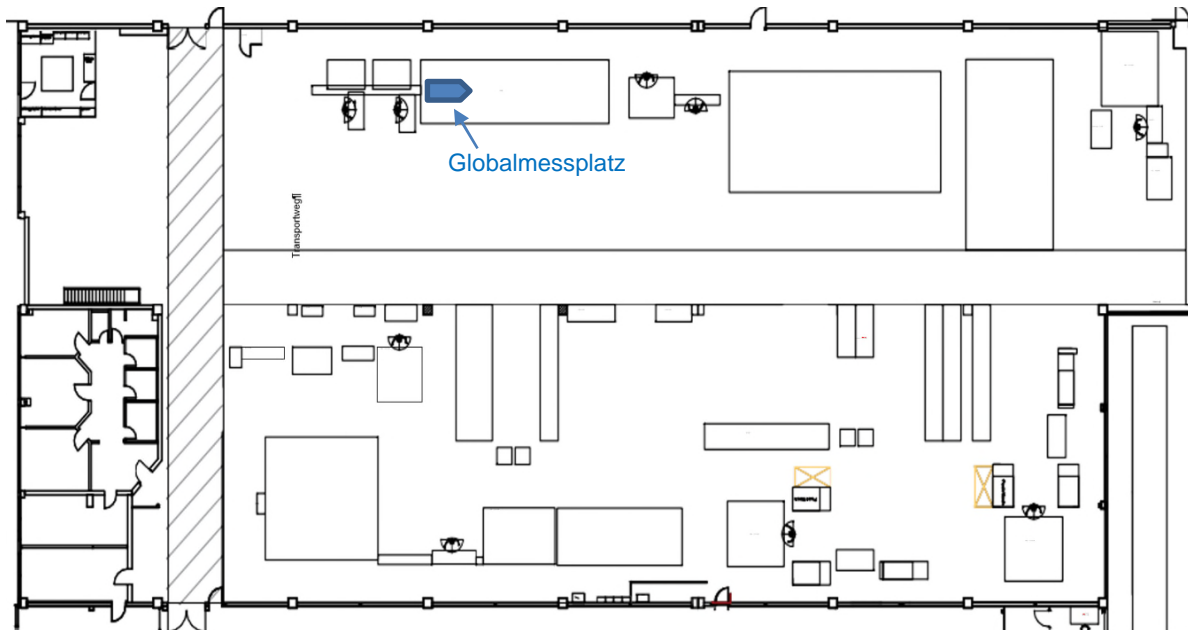


Montagehöhe: 8,0 m; Pendellänge: 1,0 m; Lichtpunkthöhe: 7,087 m

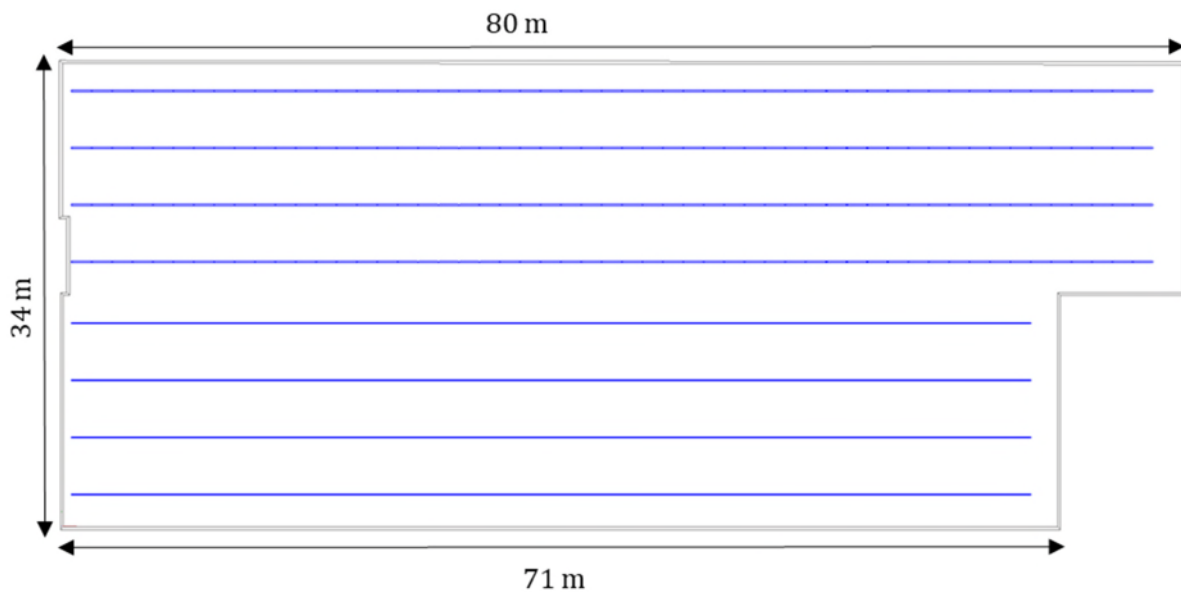
Feldanordnung vorn: 3 Reihen mit je 28 Leuchten, hinten: 2 Reihen mit 26 Leuchten

Abbildung A 2: Leuchtenplan – Montagehalle 1

## Montagehalle 2 zur Untersuchung der Lichtintervention nachts während der Nachtschicht



**Abbildung A 3: Hallenplan mit einer Übersicht zu den Arbeitsplätzen – Montagehalle 2**

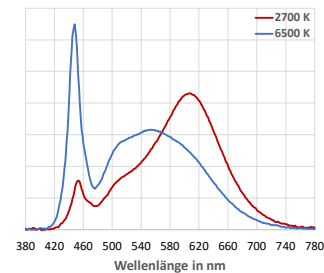
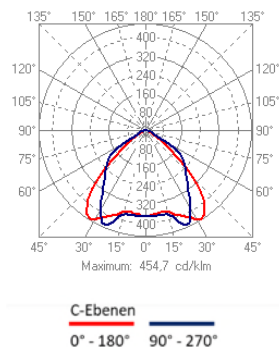


Montagehöhe: 7,5 m; Pendellänge: 0,5 m; Lichtpunkthöhe: 7,335 m  
 Feldanordnung vorn: 4 Reihen mit je 47 Leuchten, hinten: 4 Reihen mit je 53 Leuchten

**Abbildung A 4: Leuchtenplan – Montagehalle 2**

## Eingesetzte Leuchtentypen

### Hallenbeleuchtung: E-Line Act 7650 TB LED10000 (Act DWW) ETDD (Fa. Trilux/ Arnsberg)



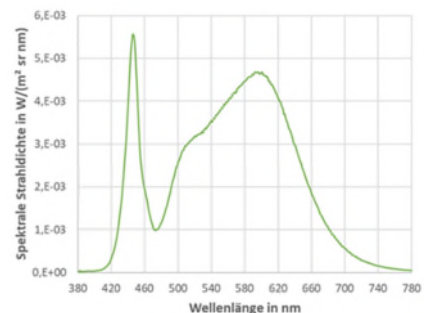
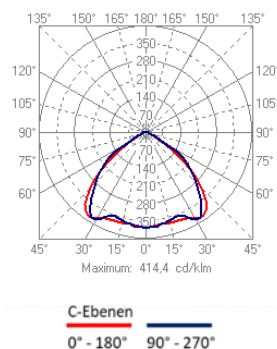
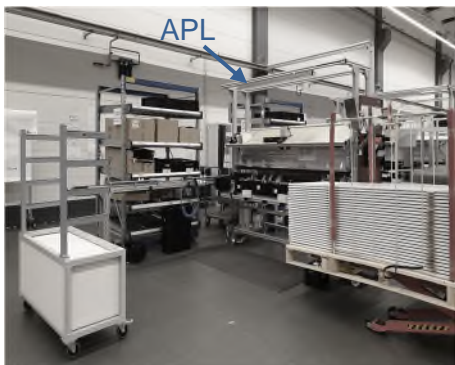
#### Abbildung A 5: Hallenbeleuchtung

links: Foto der Leuchte, die als Hallenbeleuchtung (AllgB) eingesetzt ist, Mitte: Lichtstärkeverteilung, tiefbreitstrahlend, rechts: Spektralverteilung der warmweißen und tageslichtweißen LED-Typen

#### Lichttechnische Angaben:

- Bemessungslichtstrom: 10400 lm, Bemessungsleistung: 68 W, Leuchten-Lichtausbeute: 153 lm/W
- Lichtfarbe: variabel (warmweiß - tageslichtweiß), ähnlichste Farbtemperatur (CCT): variabel (2700 K – 6500 K)
- allgemeiner Farbwiedergabeindex: CIE  $R_a > 80$
- Maße (L x B): 1475 mm x 63 mm
- mit elektronischem Betriebsgerät zum Schalten, Dimmen und Steuern der Lichtfarbe mittels DALI Device Type 8 fähigem Steuergerät

### Arbeitsplatzbezogene Beleuchtung: 7650 B LED 4000-840 ETDD (Fa. Trilux/ Arnsberg)



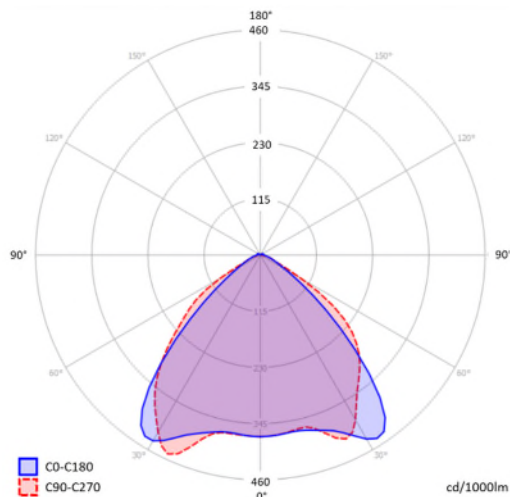
#### Abbildung A 6: Arbeitsplatzbezogene Beleuchtung

links: Montagearbeitsplatz mit Arbeitsplatzleuchte (APL), Mitte: Lichtstärkeverteilung der APL, symmetrische bereitetstrahlend, rechts: Spektralverteilung der APL mit CCT = 4000 K

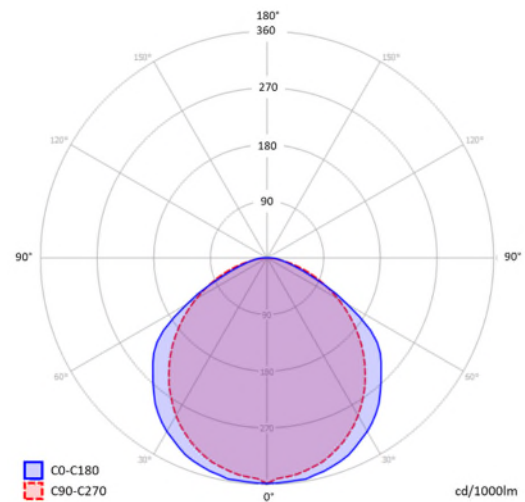
#### Lichttechnische Angaben:

- Bemessungslichtstrom: 4100 lm, Bemessungsleistung: 26 W, Leuchten-Lichtausbeute: 157 lm/W
- Lichtfarbe: neutralweiß, ähnlichste Farbtemperatur (CCT): 4000 K
- allgemeiner Farbwiedergabeindex: CIE  $R_a > 80$
- Maße (L x B): 1475 mm x 63 mm
- mit elektronischem Betriebsgerät, schaltbar

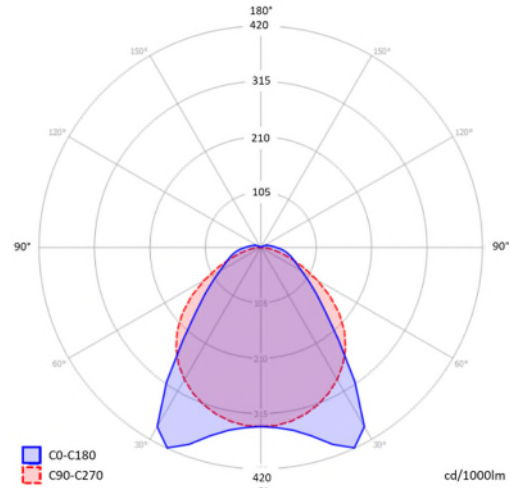
## Testleuchten für die Simulation in DIALux



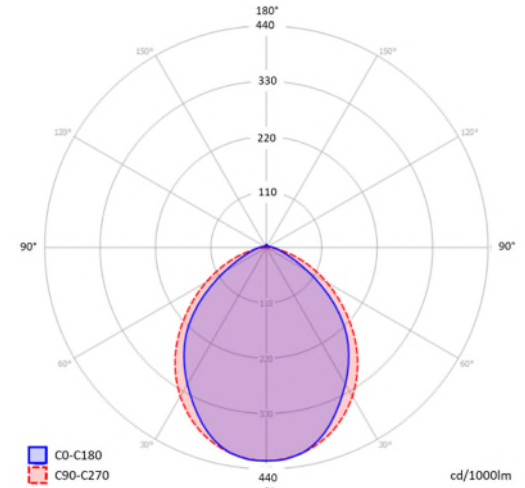
LVK der Leuchte 1



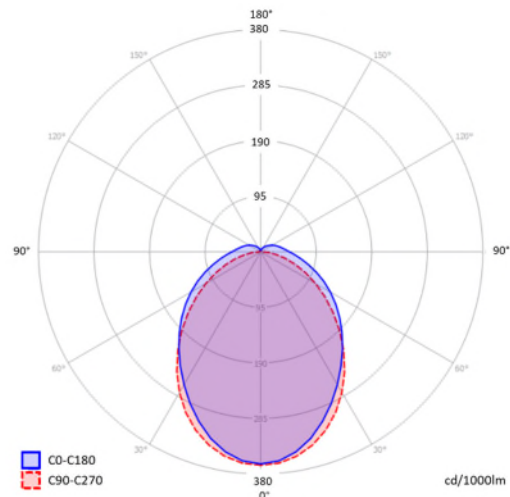
LVK der Leuchte 2



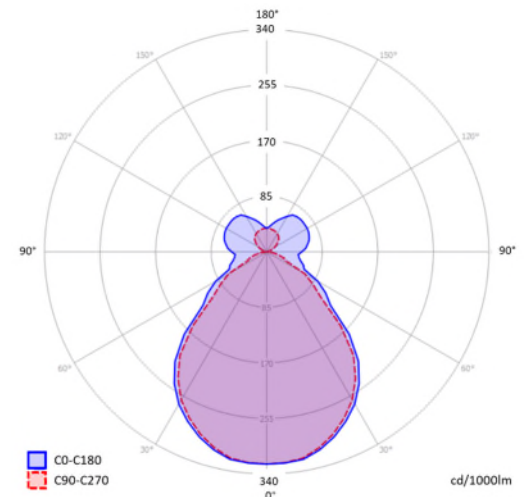
LVK der Leuchte 3



LVK der Leuchte 4



LVK der Leuchte 5



LVK der Leuchte 6

**Abbildung A 7: Überblick der Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) der für die Simulation verwendeten Leuchten; Dargestellt sind die charakteristischen Ebenen C0-180 und C90-270, die quer und längs zur Leuchtenachse orientiert sind. Die Drehachse steht senkrecht zur Leuchtenachse.**










**Tabelle A 1. Lichttechnische Daten der für die Simulation verwendeten der Leuchten**

<b>Leuchten- typ</b>	<b>Lichtstrom</b>	<b>elektr. Leistung</b>	<b>Licht- ausbeute</b>	<b><math>\Delta CCT</math></b>	<b>dimm- bar?</b>	<b>CIE <math>R_a</math></b>
Leuchte 1	7632 lm	57,6 W	112 lm/W	2700 K – 6500 K	ja	80
Leuchte 2	6900 lm	63,0 W	110 lm/W	3000 K – 6000 K	ja	80
Leuchte 3	5265 lm	52,1 W	101 lm/W	2700 K – 6500 K	ja	90
Leuchte 4	7740 lm	57,0 W	144 lm/W	2700 K – 6500 K	ja	80
Leuchte 5	6500 lm	51,0 W	127 lm/W	2700 K – 6500 K	ja	80-89
Leuchte 6	5500 lm	46,6 W	118 lm/W	2700 K – 6500 K	ja	90

$\Delta CCT$ : Dynamikbereich der Lichtfarbe (der ähnlichsten Farbtemperatur), CIE  $R_a$ : allgemeiner Farbwiedergabeindex

## Gläser mit Blaulichtfilter

**Tabelle A 2. Übersicht zu untersuchten Gläsern mit Blaulichtfilter mit Angabe zum visuellen ( $\tau_{V,D65}$ ) und melanopischen ( $\tau_{mel,D65}$ ) Transmissionsgrad bei Tageslicht (D65)**

Glas	Firma	Ausführungsart	Abbildung	$\tau_{V,D65}$	$\tau_{mel,D65}$
B01	AVOALRE	Brille		0,80	0,59
B02	Cyxus	Clip		0,86	0,64
B03	SUERTREE	Brille		0,59	0,16
B04	HOUSON	Brille		0,85	0,48
B05	KLIM Optic	Clip		0,87	0,55
B06	KLIM Optic	Brille		0,85	0,54
B07	GOITEIA	Clip		0,45	0,04

### Spektrale Transmission von Gläsern mit Blaulichtfilter

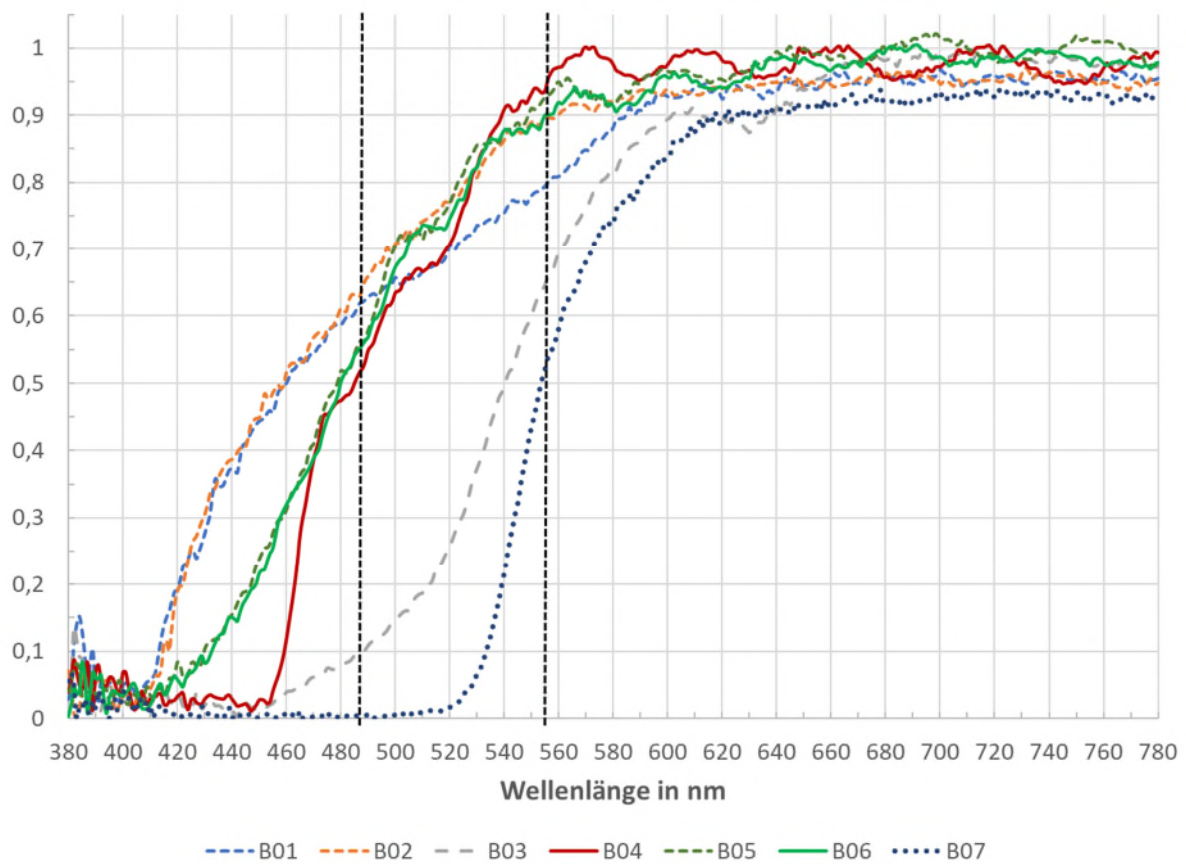


Abbildung A 8: Spektrale Transmission von Gläsern mit Blaulichtfilter, Bezeichnung nach Tabelle A 2

## Übersicht zu den Teilnehmendenzahlen

*Tabelle A 3. Übersicht zu den Teilnehmendenzahlen der einzelnen Feldphasen (Interviews in T0 – T3)*

	Feldphase	Nachtlicht- Intervention	Taglicht- Intervention	Vergleichsgruppe (N = 62)		Gesamt
		(N = 14)	(N = 13)	Lighting-Habits- intervention (N = 26)	Vergleichs- gruppe (N = 36)	(N = 89)
<b>Anzahl Teilnehmender am Interview, n</b>	T0	14	13	40		67
	T1	13	11	38		62
	T2	13	11	25	29	79
	T3	13	9	24	28	75

N, n: Anzahl der Teilnehmenden

**Tabelle A 4. Ziehung der Gruppe für die Lighting-Habits-Intervention am 24.10.2022**

Altersgruppe	Auswahl in Gruppe <sup>1</sup>	Vergleichsgruppe in T0			Nachrekrutierung		Gesamt
		3-Schicht-System <sup>2</sup> (N = 8)	2-Schicht-System (N = 17)	Tagschicht (N = 15)	2-Schicht-System (N = 8)	Tagschicht (N = 12)	
< 45 Jahre	Lighting-Habits Auswahl	-	50%	45%	50%	50%	15
	Vergleichsgruppe	100%	50%	55%	50%	50%	21
≥ 45 Jahre	Lighting-Habits Auswahl	-	45%	50%	50%	50%	10
	Vergleichsgruppe	100%	55%	50%	50%	50%	14

<sup>1</sup> N = 2 Teilnehmende wurden nach dem 24.10.2022 rekrutiert, davon wurde eine Person zusätzlich in die Lighting-Habits-Gruppe gewählt; <sup>2</sup> 3-Schicht-System: Früh-, Spät-, Nachtschichten, 2-Schicht-System: Früh- und Spätschichten, Tagschicht: Permanente Früh- oder Tagschicht; randomisierte Auswahl nach Altersgruppe (< 45 Jahre; ≥ 45 Jahre), Rekrutierungszeitraum (T0; T2) und Schichtsystem (Früh-/Spätschicht, permanente Schicht), N: Anzahl der Teilnehmenden

**Tabelle A 5. Beschreibung der Studienpopulation**

	Nachtlcht-Intervention (N = 14)		Taglicht-Intervention (N = 13)		Lighting-Habits Intervention (N = 26)		Vergleichsgruppe ohne Intervention (N = 36)		Gesamt (N = 89)	
Männlich, n (%)	9	(64,3)	9	(69,2)	24	(92,3)	26	(72,2)	68	(76,4)
Alter, M (SD) <sup>1</sup>	39,9	(8,7)	37,8	(11,2)	39,7	(14,9)	37,6	(14,4)	38,5	(13,2)
BMI, M (SD) <sup>1</sup>	26,3	(3,7)	29,1	(6,6)	28,1	(4,3)	28,1	(5,2)	28,0	(5,0)
Chronotyp, M (SD, in h:mm) <sup>2</sup>	4:44	(1:50)	4:40	(1:37)	3:37	(1:11)	4:09	(1:38)	4:10	(1:36)
Pflegebedürftige Angehörige, n (%) <sup>3</sup>	5	(35,7)	*	*	*	*	*	*	11	(12,4)
Bildung, n (%) <sup>3</sup>										
Niedrig	*	*	*	*	*	*	5	(13,9)	10	(11,2)
Mittel	9	(64,3)	13	(100)	21	(80,8)	25	(69,4)	68	(76,4)
Hoch	*	*	*	*	*	*	6	(16,7)	11	(12,4)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; <sup>1</sup> Alter und BMI bei Erstinterview, <sup>2</sup> ermittelt anhand der Aktigraphie, <sup>3</sup> Bildungsniveau nach ISCED; M: Mittelwert, SD: Standardabweichung, N, n: Anzahl der Teilnehmenden, BMI: Body-Mass-Index



## Ergebnisse der Analyse der Schlafdauer

*Tabelle A 6. Beschreibung der Studienpopulation zur Analyse der Schlafdauer*

	<b>Nachtlicht- Intervention (N = 13)</b>		<b>Taglicht- Intervention (N = 13)</b>		<b>Lighting-Habits Intervention (N = 25)</b>		<b>Vergleichsgruppe ohne Intervention (N = 25)</b>		<b>Gesamt (N = 83)</b>	
Männlich, n (%)	8	(61,5)	9	(69,2)	23	(92,0)	23	(71,9)	63	(75,9)
Alter, M (SD) <sup>1</sup>	39,9	(8,3)	37,8	(11,2)	40,5	(14,6)	38,8	(14,9)	39,2	(13,2)
BMI, M (SD) <sup>1</sup>	26,2	(3,8)	29,1	(6,6)	28,3	(4,2)	28,1	(5,4)	28,1	(5,1)
Chronotyp, M (SD, in h:mm) <sup>2</sup>	4:32	(1:44)	4:40	(1:37)	3:36	(4:11)	4:09	(1:38)	4:08	(1:33)
Verdunkeln des Schlafraums, n (%)	10	(76,9)	9	(69,2)	10	(66,7)	15	(68,2)	44	(69,8)
Pflegebedürftige Angehörige, n (%)	5	(38,5)	*	*	*	*	*	*	11	(13,3)
Bildung, n (%) <sup>3</sup>										
Niedrig	*	*			*	*	*	*	9	(10,8)
Mittel	8	(61,5)	13	(100)	20	(80,0)	22	(68,8)	63	(75,9)
Hoch	*				*	*	*	*	11	(13,3)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; <sup>1</sup> Alter und BMI bei Erstinterview, <sup>2</sup> mittels Aktigraphie, <sup>3</sup> Bildungsniveau nach ISCED; M: Mittelwert, SD:°Standardabweichung, N, n: Anzahl der Teilnehmenden, SD: Standardabweichung, BMI: Body-Mass-Index

**Tabelle A 7. Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der Hauptschlafdauer in Stunden nach Schichtart und Feldphase**

	Nachtlich- Intervention			Taglich- Intervention			Vergleichs- gruppe		
	n	M	(95%-KI)	n	M	(95%-KI)	n	M	(95%-KI)
<b>Baseline</b>									
Arbeitstag									
Frühschicht	11	5:44	(5:02 – 6:26)	9	5:46	(5:11 – 6:19)	26	5:39	(5:16 – 6:01)
Spätschicht	11	6:28	(5:25 – 7:32)	10	7:36	(5:38 – 8:28)	20	6:26	(5:46 – 7:06)
Nachtschicht	11	5:13	(4:11 – 6:14)				6	5:13	(3:23 – 7:02)
Tagschicht							10	6:14	(5:46 – 6:41)
Arbeitsfreier Tag nach									
Frühschicht	9	6:54	(5:13 – 8:30)	10	7:23	(6:13 – 8:32)	26	7:02	(6:25 – 7:40)
Spätschicht	11	7:02	(6:13 – 7:52)	9	7:37	(6:53 – 8:21)	21	6:58	(6:19 – 7:37)
Nachtschicht	11	7:15	(6:06 – 8:24)				6	6:12	(5:19 – 7:04)
Tagschicht				*	*	*	10	6:32	(6:00 – 7:04)
<b>T1</b>									
Arbeitstag									
Frühschicht	11	5:29	(4:47 – 6:10)	8	5:24	(4:14 – 6:34)	25	5:50	(5:31 – 6:08)
Spätschicht	9	6:55	(5:29 – 8:20)	7	7:09	(5:37 – 8:40)	19	6:43	(6:01 – 7:24)
Nachtschicht	10	5:50	(4:39 – 7:01)				7	5:23	(4:11 – 6:36)
Tagschicht				*	*	*	10	6:34	(6:07 – 7:01)
Arbeitsfreier Tag nach									
Frühschicht	8	7:08	(5:46 – 8:29)	7	7:59	(6:45 – 9:13)	24	7:35	(7:06 – 8:03)
Spätschicht	11	7:37	(6:32 – 8:40)	7	7:41	(6:26 – 8:55)	21	7:04	(6:18 – 7:50)
Nachtschicht	9	7:34	(6:25 – 8:45)				7	6:17	(5:24 – 7:10)
Tagschicht				*	*	*	10	6:57	(6:16 – 7:37)

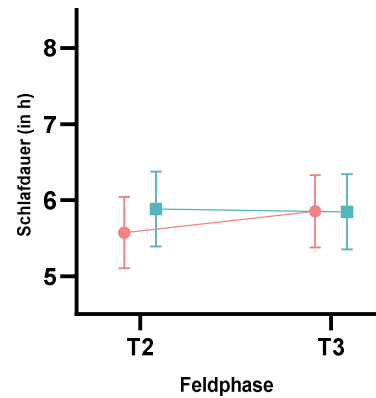
\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt, M: Mittelwert, (95%-KI): 95%-Konfidenzintervall, n: Anzahl der Teilnehmenden

**Tabelle A 8. Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall des Hauptschlafs in Stunden nach Schichtart und Feldphase**

	Nachtlicht- Intervention			Taglicht- Intervention			Vergleichs- gruppe					
							Mit Lightings-Habits			Ohne Lighting-Habits		
	n	M	(95%-KI)	n	M	(95%-KI)	n	M	(95%-KI)	n	M	(95%-KI)
<b>T2</b>												
Arbeitstag												
Frühschicht	8	5:32	(4:37 – 6:26)	9	5:23	(4:29 – 6,28)	21	5:38	(5:04 – 6,18)	19	5:40	(5:12 – 6:07)
Spätschicht	6	6:22	(4:59 – 7:43)	9	6:35	(5:67 – 7,37)	11	6:04	(5:08 – 6,97)	12	6:23	(5:34 – 7:11)
Nachtschicht	9	5:16	(3:49 – 6:41)							*	*	*
Tagschicht				*	*	*	5	5:25	(4:20 – 6:29)	6	6:20	(5:51 – 6:49)
Arbeitsfreier Tag nach												
Frühschicht	9	6:26	(5:17 – 7:34)	9	7:47	(6:32 – 9,02)	20	7:18	(6:33 – 8:03)	19	7:17	(6:40 – 7:54)
Spätschicht	7	7:16	(6:11 – 8:19)	9	7:50	(6:41 – 8,97)	13	7:24	(6:21 – 8:27)	10	6:14	(5:06 – 7:21)
Nachtschicht	11	6:35	(5:23 – 7:46)							5	6:14	(5:57 – 7:30)
Tagschicht				*	*	*	5	6:40	(5:18 – 8:02)	6	7:10	(6:13 – 8:05)
<b>T3</b>												
Arbeitstag mit												
Frühschicht	8	5:37	(4:06 – 7:07)	7	5:17	(4:02 – 6:30)	18	5:49	(5:24 – 6:14)	20	5:25	(4:52 – 5:58)
Spätschicht	8	7:05	(5:21 – 8:48)	7	6:52	(5:00 – 8:44)	7	6:03	(4:54 – 7:11)	15	6:26	(5:37 – 7:15)
Nachtschicht	10	5:32	(4:32 – 6:31)							5	5:34	(4:21 – 6:45)
Tagschicht				*	*	*	5	5:53	(5:06 – 6:39)	6	6:43	(6:07 – 7:19)
Arbeitsfreier Tag nach												
Frühschicht	7	7:52	(5:57 – 9:46)	7	7:15	(6:01 – 8:29)	15	7:17	(6:03 – 8,53)	19	7:35	(6:51 – 8:18)
Spätschicht	6	7:12	(5:23 – 9:00)	7	6:53	(5:10 – 8:35)	7	6:20	(4:42 – 7:56)	14	7:05	(5:48 – 8:20)
Nachtschicht	9	6:29	(5:40 – 7:17)							6	6:41	(4:35 – 8:46)
Tagschicht				*	*	*	5	6:51	(5:10 – 8:31)	6	7:21	(6:35 – 8:05)

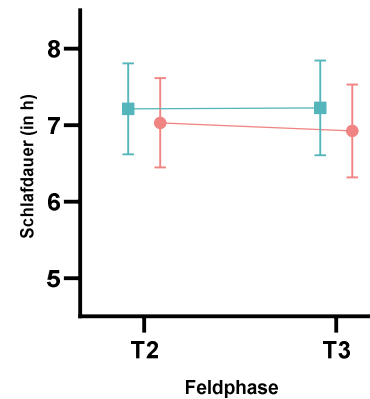
\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt, M: Mittelwert, (95%-KI): 95%-Konfidenzintervall, n: Anzahl der Teilnehmenden

Arbeitstage mit Frühschichten



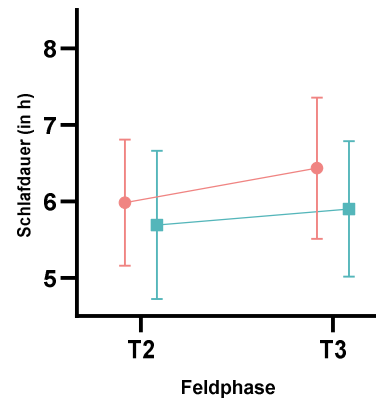
Interaktionsterm: 0:19 (95%-KI 0:01 – 0:37)

Wochenende nach Frühschichten



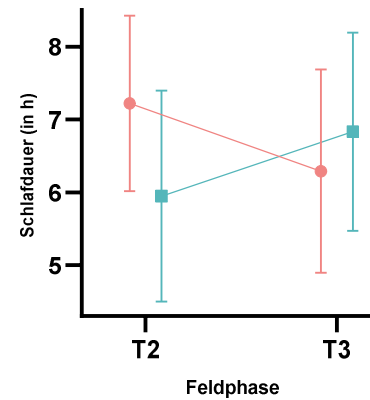
Interaktionsterm: -0:07 (95%-KI -0:41 – 0:27)

Arbeitstage mit Spätschichten



Interaktionsterm: 0:14 (95%-KI -0:42 – 1:11)

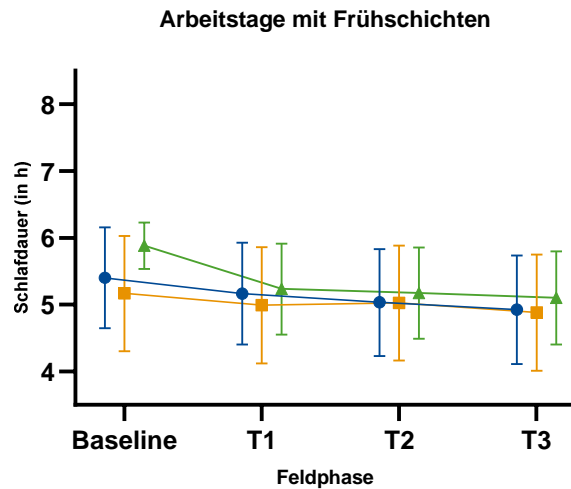
Wochenenden mit Spätschichten



Interaktionsterm: -1:49 (95%-KI -3:09 – -0,29)

—●— Vergleichsgruppe mit LH  
—■— Vergleichsgruppe ohne LH

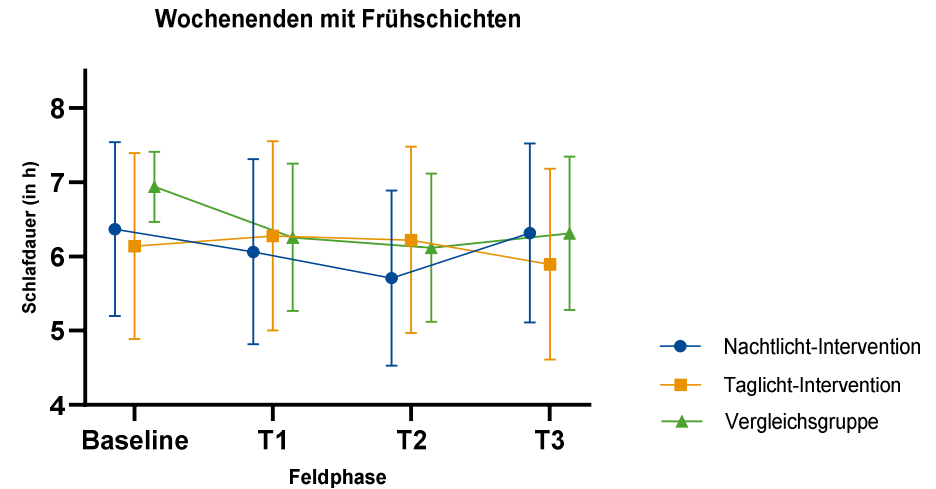
**Abbildung A 9. Adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) der Dauer des Hauptschlafes (in h:mm) für Feldphasen T2 und T3 in den Vergleichsgruppen mit und ohne Lighting-Habits-Intervention adjustiert nach Datenherkunft (Aktigraphie, Schlaftagebuch), Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt und Bildungslevel; Interaktionsterme für die Interaktion von Gruppe und Feldphase**



*Interaktionen*

*Taglicht-Intervention*      T0/T1: -0:22 (95%-KI -0:50 – 0:07)  
    T0/T2: -0:16 (95%-KI -0:44 – 0:12))  
    T0/T3: -0:21 (95%-KI -0:51 – 0:10)

*Nachtlicht-Intervention*    T0/T1: -0:26 (95%-KI -0:59 – 0:07)  
    T0/T2: -0:30 (95%-KI -1:05 – 0:05)  
    T0/T3: -0:32 (95%-KI -1:11 – 0:06)



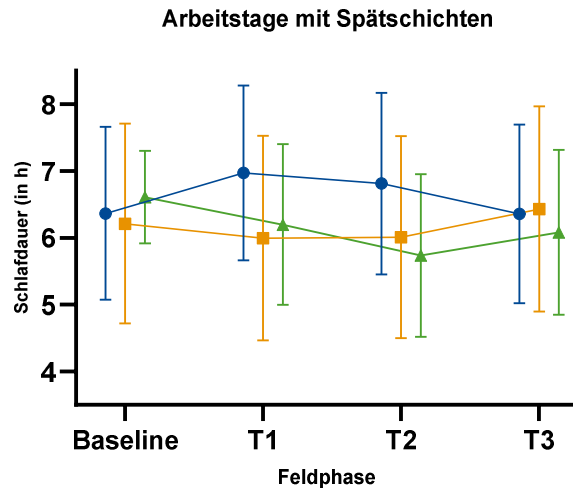
*Interaktionen*

*Taglicht-Intervention*      T0/T1: -0:16 (95%-KI -1:04 – 0:32)  
    T0/T2: -0:11 (95%-KI -0:58 – 0:36)  
    T0/T3: -0:43 (95%-KI -1:36 – 0:11))

*Nachtlicht-Intervention*    T0/T1: -0:32 (95%-KI -0:71 – 0:06)  
    T0/T2: -0:56 (95%-KI -1:59 – 0:08)  
    T0/T3: -0:31 (95%-KI -1:37 – 0:36)

**Abbildung A 10. Adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) der Dauer des Hauptschlafes (in h:mm) bei Frühschicht für Feldphasen Baseline bis T3 in der Taglicht- und Nachtlicht-Interventionsgruppe und Vergleichsgruppe (ohne Nachrekrutierte und ohne Lighting-Habits-Intervention; adjustiert nach Datenherkunft (Aktigraphie, Schlafstagebuch), Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt und Bildungslevel; Interaktionsterme für die Interaktion von Gruppe und Feldphase**

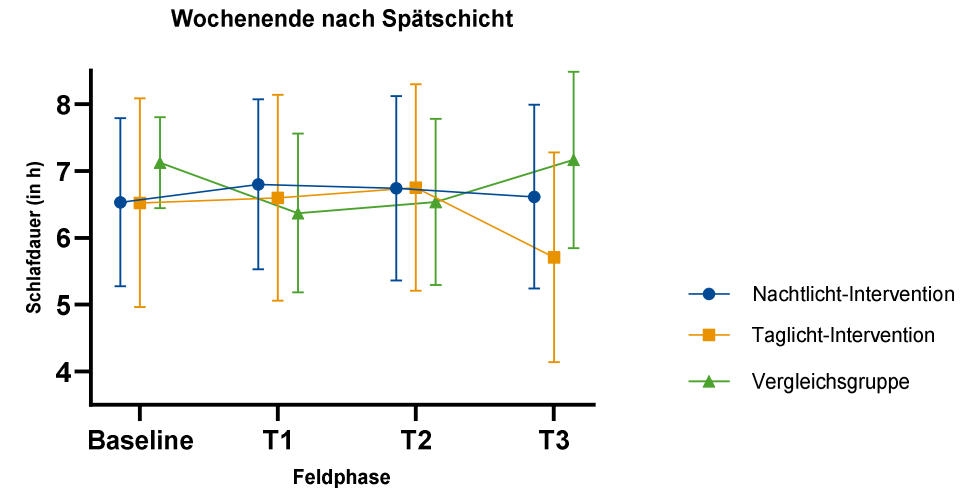




*Interaktionen*

*Taglicht-Intervention* T0/T1: -0:12 (95%-KI -1:00 – 0:36)  
T0/T2: 0:17 (95%-KI -0:31 – 1:05)  
T0/T3: 0:21 (95%-KI -0:30 – 1:12)

*Nachtlicht-Intervention* T0/T1: 0:37 (95%-KI -0:11 – 1:26)  
T0/T2: **0:56 (95%-KI 0:00 – 1:52)**  
T0/T3: 0:08 (95%-KI -0:48 – 1:04)

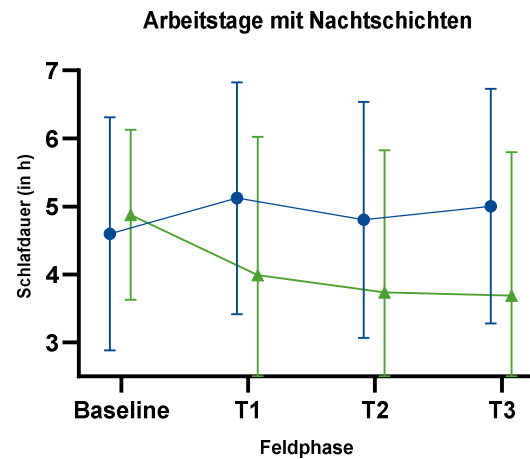


*Interaktionen*

*Taglicht-Intervention* T0/T1: -0:02 (95%-KI -1:03 – 1:07)  
T0/T2: -0:01 (95%-KI -1:08 – 1:11)  
T0/T3: **-1:39 (95%-KI -2:53 – -0:25)**

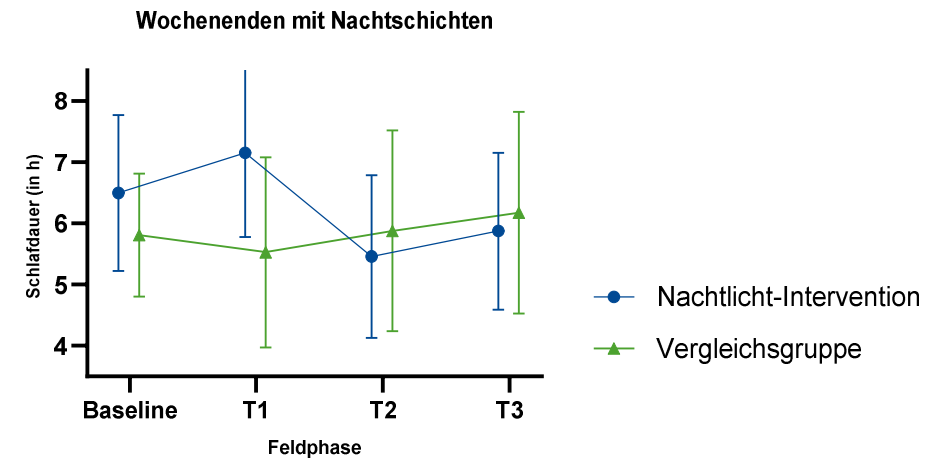
*Nachtlicht-Intervention* T0/T1: 0:14 (95%-KI -0:50 – 1:17)  
T0/T2: 0:01 (95%-KI -1:15 – 1:16)  
T0/T3: -0:45 (95%-KI -2:04 – 0:34)

**Abbildung A 11. Adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) der Dauer des Hauptschlafes (in h:mm) bei Spätschicht für Feldphasen Baseline bis T3 in der Taglicht- und Nachtlicht-Interventionsgruppe und Vergleichsgruppe (ohne Nachrekrutierte und ohne Lighting-Habits-Intervention) adjustiert nach Datenherkunft (Aktigraphie, Schlaftagebuch), Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt und Bildungslevel; Interaktionsterme für die Interaktion von Gruppe und Feldphase**



Interaktionen

Nachtlcht-Intervention T0/T1: 0:31 (95%-KI -0:26 – 1:28)  
 T0/T2: 0:27 (95%-KI -0:41 – 1:35)  
 T0/T3: 0:42 (95%-KI -0:31 – 1:54)



Interaktionen

Nachtlcht-Intervention T0/T1: 0:34 (95%-KI -1:01 – 2:09)  
 T0/T2: -1:29 (95%-KI -3:05 – 0:08)  
 T0/T3: -1:22 (95%-KI -2:56 – 0:13)

**Abbildung A 12. Adjustierte Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen (95%-KI) der Dauer des Hauptschlafes (in h:mm) bei Nachtschicht für Feldphasen Baseline bis T3 in der Taglicht- und Nachtlcht-Interventionsgruppe und Vergleichsgruppe (ohne Nachrekrutierte und ohne Lighting-Habits-Intervention); adjustiert nach Datenherkunft (Aktigraphie, Schlaftagebuch), Alter, Geschlecht, Chronotyp, pflegebedürftige Angehörige im Haushalt und Bildungslevel; Interaktionsterme für die Interaktion von Gruppe und Feldphase**

## Ergebnisse der Testung der psychomotorischen Vigilanz

*Tabelle A 9. Beschreibung der Studienpopulation zur Analyse der psychomotorischen Vigilanz*

	Feldphase	Taglicht- Intervention (N = 14)	Nachtlicht- Intervention (N = 13)	Lighting-Habits- Intervention (N = 26)	Vergleichs- gruppe (N = 36)
Männlich, n (%)	T0	9 (64,3)	9 (69,2)		31 (77,5)
	T1	8 (61,5)	7 (63,6)		29 (76,3)
	T2	9 (64,3)	9 (69,3)	24 (92,3)	26 (72,2)
	T3	9 (69,2)	7 (70,0)	22 (91,7)	19 (67,9)
Zirkadiane Präferenz*, n (%)					
Morgentyp	T2	7 (29,2)		21 (39,6)	
Intermediärtyp		9 (37,5)		26 (49,1)	
Abendtyp		8 (33,3)		6 (11,3)	
Morgentyp	T3	8 (36,4)		18 (29,5)	
Intermediärtyp		7 (31,8)		30 (49,2)	
Abendtyp		7 (31,8)		13 (21,3)	
Schlafapnoe, n (%)					
STOP-BANG- Fragebogen	T2	5 (38,5)	7 (63,6)	18 (72,0)	13 (46,4)
	T3	-	-	-	-
Alter, M (SD)	T0	37,9 (11,2)	39,9 (8,7)		38,5 (14,6)
	T1	38,2 (11,1)	40,0 (8,9)		38,7 (14,6)
	T2	38,9 (11,2)	40,9 (8,7)	40,31 (15,2)	38,83 (14,4)
	T3	39,3 (11,6)	41,0 (8,9)	40,46 (15,1)	39,14 (14,4)
Koffein <sup>1</sup> , M (SD)	T2	228,1 (154,1)	386,2 (246,8)	357,3 (220,9)	293,4 (239,2)
	T3	-	-	-	-

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt, <sup>1</sup> Koffein nach Bundesinstitut für Risikobewertung in (mg/Tag); M: Mittelwert, SD: Standardabweichung, N, n: Anzahl der Teilnehmenden

**Tabelle A 10. Mittlere Reaktionszeiten der Psychomotorischen Vigilanz (in ms) nach Ausschluss von Lapses und Fehlstarts nach Untersuchungsgruppe und Feldphase**

Schicht	Feldphase	Taglicht- Intervention (N = 14)	Nachtlicht- Intervention (N = 13)	Lighting-Habits Intervention (N = 26)	Vergleichs- gruppe (N = 36)
		M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)
Frühschicht	T0	217,6 (12,4)	242,5 (23,3)		227,6 (21,6)
	T1	207,4 (17,0)	232,6 (23,1)		226,97 (21,5)
	T2	209,0 (16,8)	232,1 (19,4)	223,36 (20,0)	225,1 (19,0)
	T3	208,4 (18,3)	233,1 (18,5)	226,07 (19,4)	227,6 (17,8)
Spätschicht	T0	203,8 (12,6)	231,8 (27,1)		222,61 (25,6)
	T1	201,8 (12,0)	230,7 (27,5)		223,46 (22,2)
	T2	206,4 (17,0)	226,3 (18,1)	220,1 (24,5)	222,5 (20,6)
	T3	196,5 (12,5)	236,2 (18,1)	228,4 (21,4)	225,4 (24,3)
Nachtschicht	T0		229,3 (21,2)		232,7 (42,6)
	T1		229,7 (20,6)		226,6 (18,6)
	T2		228,3 (24,0)		229,0 (16,0)
	T3		225,2 (14,9)		224,3 (25,1)
Tagschicht	T0				227,52 (20,7)
	T1				224,58 (18,9)
	T2			230,4 (17,0)	212,4 (7,0)
	T3			226,6 (15,5)	212,8 (8,5)

M: Mittelwert, SD: Standardabweichung, N: Anzahl der Teilnehmenden

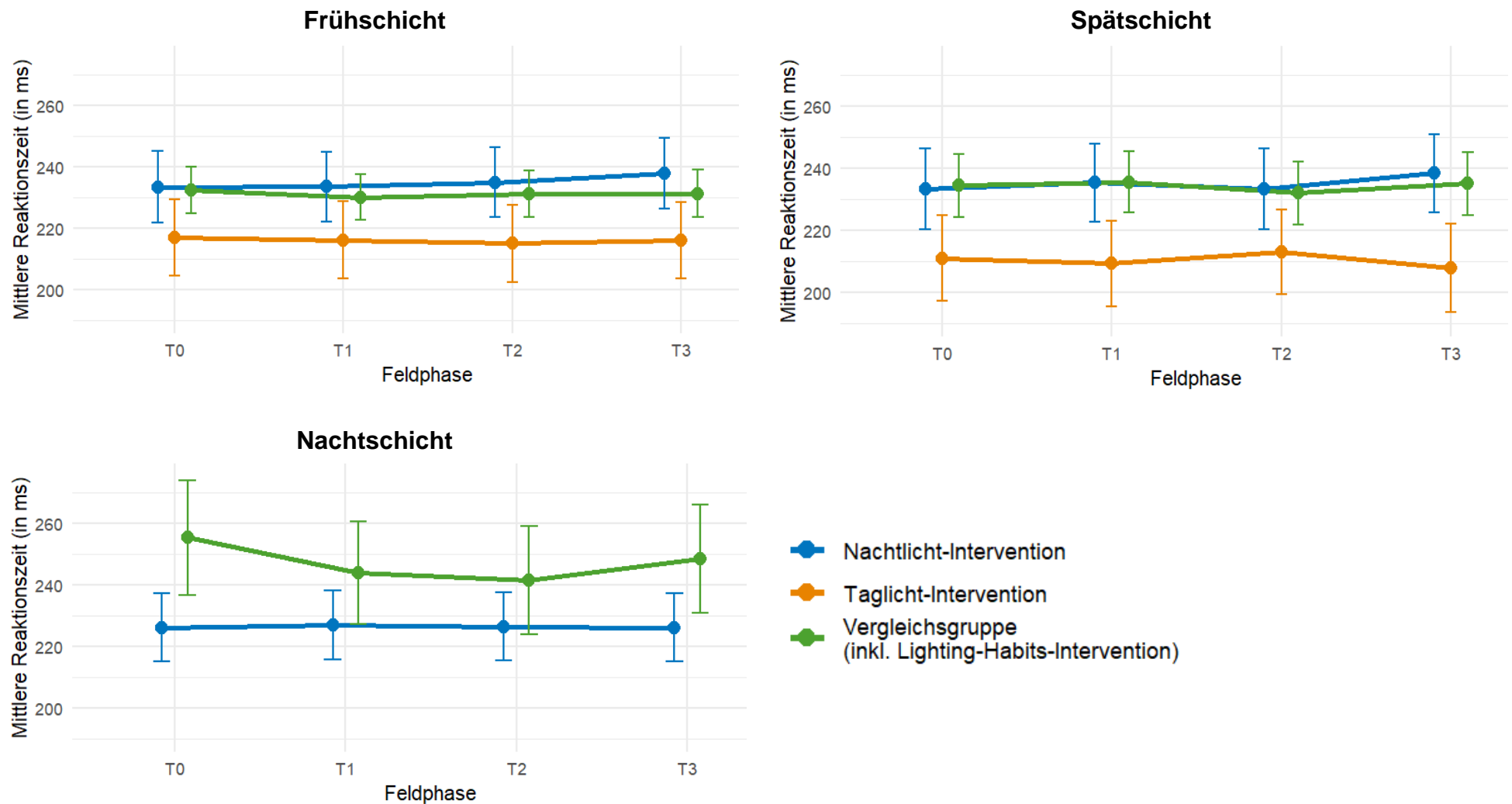


Abbildung A 13. Adjustierte Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der mittleren PVT-Reaktionszeiten nach Untersuchungsgruppe und Feldphase



## Ergebnisse der Analyse der Schläfrigkeit

**Tabelle A 11. Beschreibung der Studienpopulation mit Schläfrigkeitsangaben**

	Nachtlicht- Intervention (N = 14)		Taglicht- Intervention (N = 13)		Lighting-Habits Intervention (N = 24)		Vergleichsgruppe ohne Intervention (N = 35)		Gesamt (N = 86)	
Männlich, n (%)	9	(64,3)	9	(69,2)	22	(91,7)	25	(71,4)	65	(75,6)
Alter, M (SD) <sup>1</sup>	39,9	(8,7)	37,8	(11,2)	40,0	(14,6)	37,9	(14,5)	38,8	(13,1)
BMI, M (SD) <sup>1</sup>	26,3	(3,7)	29,1	(6,6)	28,2	(4,3)	28,0	(5,3)	30,0	(5,0)
Chronotyp, M (SD, in h:mm) <sup>2</sup>	4:44	(1:50)	4:40	(1:37)	3:34	(1:12)	4:09	(1:38)	4:10	(1:35)
Pflegebedürftige Angehörige, n (%)	5	(35,7)	*	*	*	*	*	*	11	(12,8)
Bildung, n (%) <sup>3</sup>										
Niedrig	*	*	*	*	*	*	5	(14,3)	10	(11,6)
Mittel	9	(64,3)	13	(100)	19	(79,2)	24	(68,6)	65	(75,6)
Hoch	*	*	*	*	*	*	6	(17,1)	11	(12,8)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt <sup>1</sup> Alter und BMI bei Erstinterview, <sup>2</sup> mittels Aktigraphie, <sup>3</sup> Bildungsniveau nach ISCED; M: Mittelwert, N, n: Anzahl Teilnehmender, SD: Standardabweichung, BMI: Body-Mass-Index

**Tabelle A 12. Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der Karolinska Sleepines Scale für die Taglicht-Interventions- und Vergleichsgruppe nach Feldphase**

	Baseline				T1				T2				T3			
	Taglicht-Intervention		Vergleichsgruppe		Taglicht-Intervention		Vergleichsgruppe		Taglicht-Intervention		Vergleichsgruppe		Taglicht-Intervention		Vergleichsgruppe <sup>1</sup>	
	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)
Frühschicht (6 – 14 Uhr)																
Aufwachen	13	4,54 (3,31 – 5,76)	41	5,73 (5,13 – 6,33)	13	5,85 (4,69 – 6,70)	41	4,83 (4,18 – 5,48)	11	5,45 (3,97 – 6,94)	60	5,27 (4,79 – 5,74)	13	4,54 (3,31 – 5,76)	24	5,96 (5,15 – 6,77)
Schichtbeginn	17	2,88 (2,26 – 3,51)	41	3,63 (3,13 – 4,14)	11	3,36 (1,98 – 4,75)	30	3,83 (3,17 – 4,49)	7	2,57 (0,81 – 4,33)	47	3,49 (3,02 – 3,96)	17	2,88 (2,26 – 3,51)	22	4,18 (3,31 – 5,05)
+2h	13	2,62 (1,94 – 3,29)	34	3,35 (2,90 – 3,81)	11	3,09 (1,99 – 4,19)	36	3,42 (2,93 – 3,90)	9	2,67 (1,65 – 3,68)	56	3,09 (2,77 – 3,41)	13	2,62 (1,94 – 3,29)	24	3,75 (3,09 – 4,41)
Mitte der Schicht	14	2,71 (2,36 – 3,07)	50	3,76 (3,35 – 4,17)	12	2,50 (1,86 – 3,14)	43	3,42 (3,02 – 3,82)	10	3,10 (1,69 – 4,51)	61	3,31 (3,12 – 3,50)	14	2,71 (2,36 – 3,07)	35	3,54 (3,13 – 3,95)
+6h	16	2,88 (2,26 – 3,49)	24	3,75 (3,25 – 4,25)	15	2,60 (2,05 – 3,15)	35	3,54 (3,20 – 3,89)	10	3,80 (2,69 – 4,91)	50	3,44 (3,17 – 3,71)	16	2,88 (2,26 – 3,49)	21	3,52 (2,99 – 4,06)
Ende der Schicht	14	2,50 (1,96 – 3,04)	37	4,08 (3,51 – 4,66)	15	3,13 (2,30 – 3,97)	38	4,11 (3,67 – 4,54)	7	3,57 (2,28 – 4,86)	40	3,40 (3,05 – 3,75)	14	2,50 (1,96 – 3,04)	25	3,92 (3,43 – 4,41)
Vor dem Schlafengehen	14	6,50 (5,33 – 7,67)	42	6,76 (6,28 – 7,25)	15	6,53 (5,53 – 7,53)	41	6,46 (5,92 – 7,01)	11	5,55 (4,41 – 6,68)	66	6,65 (6,26 – 7,04)	14	6,50 (5,33 – 7,67)	28	6,32 (5,68 – 6,96)
Spätschicht (14 – 22 Uhr)																
Aufwachen	17	4,47 (3,60 – 5,34)	29	4,83 (3,96 – 5,70)	13	4,15 (2,97 – 5,33)	29	5,00 (4,17 – 5,83)	20	4,15 (3,15 – 5,15)	37	4,59 (3,99 – 5,20)	12	5,42 (4,46 – 6,37)	20	4,70 (3,83 – 5,57)
Schichtbeginn	4	3,75 (1,03 – 6,47)	28	3,21 (2,73 – 3,70)	0	na	17	3,94 (3,20 – 4,68)	7	2,71 (2,26 – 3,17)	19	3,05 (2,38 – 3,72)	8	2,13 (1,18 – 3,07)	18	2,94 (2,39 – 3,50)
+2h	25	2,76 (2,42 – 3,10)	20	3,00 (2,63 – 3,37)	16	2,69 (1,97 – 3,41)	20	3,15 (2,52 – 3,78)	18	2,28 (1,69 – 2,86)	24	3,21 (2,76 – 3,66)	11	2,55 (1,79 – 3,30)	24	2,96 (2,57 – 3,34)
Mitte der Schicht	22	2,77 (2,30 – 3,25)	31	3,45 (3,13 – 3,78)	19	3,16 (2,47 – 3,84)	22	3,32 (2,76 – 3,87)	24	2,25 (1,85 – 2,65)	23	3,70 (3,00 – 4,39)	9	2,78 (1,64 – 3,92)	26	3,08 (2,59 – 3,56)
+6h	19	3,63 (3,03 – 4,24)	27	4,07 (3,47 – 4,67)	13	3,00 (2,40 – 3,60)	19	4,05 (3,17 – 4,94)	11	2,73 (2,05 – 3,41)	27	3,67 (3,09 – 4,25)	9	1,56 (1,00 – 2,11)	23	3,87 (3,28 – 4,46)
Ende der Schicht	19	4,05 (3,20 – 4,91)	22	5,36 (4,40 – 6,33)	12	3,75 (2,89 – 4,61)	16	4,25 (3,27 – 5,23)	12	3,25 (2,43 – 4,07)	24	4,96 (4,15 – 5,77)	2	n.b.	18	4,61 (3,95 – 5,27)
Vor dem Schlafengehen	17	6,65 (5,84 – 7,46)	31	6,77 (6,09 – 7,46)	14	6,14 (4,91 – 7,38)	31	5,45 (4,65 – 6,25)	21	6,19 (5,31 – 7,07)	38	5,84 (5,10 – 6,59)	13	5,85 (4,96 – 6,73)	20	7,15 (6,31 – 7,99)

<sup>1</sup> Ohne Lighting-Habits Interventionsgruppe, M: Mittelwert, (95%-KI): 95%-Konfidenzintervall, m: Anzahl Angaben, n.b. nicht bestimmbar

**Tabelle A 13. Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der Karolinska Sleepines Scale der Nachtlicht- Interventions- und Vergleichsgruppe nach Feldphasen**

	Baseline				T1				T2				T3			
	Nachtlicht-Intervention		Vergleichsgruppe		Nachtlicht-Intervention		Vergleichsgruppe		Nachtlicht-Intervention		Vergleichsgruppe		Nachtlicht-Intervention		Vergleichsgruppe <sup>1</sup>	
	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)
Frühschicht (6 – 14 Uhr)																
Aufwachen	15	4,40 (3,62 – 5,18)	41	5,73 (5,13 – 6,33)	22	4,09 (3,41 – 4,77)	41	4,83 (4,18 – 5,48)	16	5,06 (4,16 – 5,96)	60	5,27 (4,79 – 5,74)	17	4,29 (3,60 – 4,99)	24	5,96 (5,15 – 6,77)
Schichtbeginn	18	3,28 (2,64 – 3,91)	41	3,63 (3,13 – 4,14)	23	3,83 (3,36 – 4,29)	30	3,83 (3,17 – 4,49)	18	3,61 (2,85 – 4,38)	47	3,49 (3,02 – 3,96)	17	3,76 (3,15 – 4,38)	22	4,18 (3,31 – 5,05)
+2h	16	2,69 (2,26 – 3,11)	34	3,35 (2,90 – 3,81)	19	3,26 (2,87 – 3,65)	36	3,42 (2,93 – 3,90)	19	3,32 (2,95 – 3,68)	56	3,09 (2,77 – 3,41)	16	3,13 (2,45 – 3,80)	24	3,75 (3,09 – 4,41)
Mitte der Schicht	18	2,78 (2,41 – 3,14)	50	3,76 (3,35 – 4,17)	23	3,43 (2,92 – 3,95)	43	3,42 (3,02 – 3,82)	18	3,06 (2,62 – 3,49)	61	3,31 (3,12 – 3,50)	17	2,88 (2,37 – 3,39)	35	3,54 (3,13 – 3,95)
+6h	14	3,43 (2,80 – 4,06)	24	3,75 (3,25 – 4,25)	19	3,16 (2,62 – 3,70)	35	3,54 (3,20 – 3,89)	12	3,50 (2,99 – 4,01)	50	3,44 (3,17 – 3,71)	9	2,67 (2,28 – 3,05)	21	3,52 (2,99 – 4,06)
Ende der Schicht	13	3,31 (2,44 – 4,18)	37	4,08 (3,51 – 4,66)	6	2,83 (2,04 – 3,62)	38	4,11 (3,67 – 4,54)	13	3,77 (2,87 – 4,66)	40	3,40 (3,05 – 3,75)	14	2,93 (2,45 – 3,41)	25	3,92 (3,43 – 4,41)
Vor dem Schlafengehen	15	6,80 (5,91 – 7,69)	42	6,76 (6,28 – 7,25)	22	6,23 (5,40 – 7,06)	41	6,46 (5,92 – 7,01)	16	6,50 (5,80 – 7,20)	66	6,65 (6,26 – 7,04)	18	6,00 (5,34 – 6,66)	28	6,32 (5,68 – 6,96)
Spätschicht (14 – 22 Uhr)																
Aufwachen	13	4,08 (2,81 – 5,35)	29	4,83 (3,96 – 5,70)	15	4,67 (3,67 – 5,66)	29	5,00 (4,17 – 5,83)	9	4,56 (3,53 – 5,58)	37	4,59 (3,99 – 5,20)	17	4,29 (3,43 – 5,16)	20	4,70 (3,83 – 5,57)
Schichtbeginn	10	3,10 (2,24 – 3,96)	28	3,21 (2,73 – 3,70)	14	3,50 (3,01 – 3,99)	17	3,94 (3,20 – 4,68)	12	3,25 (2,53 – 3,97)	19	3,05 (2,38 – 3,72)	11	3,18 (2,78 – 3,59)	18	2,94 (2,39 – 3,50)
+2h	11	3,27 (2,67 – 3,88)	20	3,00 (2,63 – 3,37)	16	3,13 (2,55 – 3,70)	20	3,15 (2,52 – 3,78)	8	3,25 (2,66 – 3,84)	24	3,21 (2,76 – 3,66)	12	3,00 (2,53 – 3,47)	24	2,96 (2,57 – 3,34)
Mitte der Schicht	18	3,78 (3,15 – 4,41)	31	3,45 (3,13 – 3,78)	20	3,45 (2,96 – 3,94)	22	3,32 (2,76 – 3,87)	10	3,50 (2,73 – 4,27)	23	3,70 (3,00 – 4,39)	14	3,00 (2,22 – 3,78)	26	3,08 (2,59 – 3,56)
+6h	12	3,92 (2,89 – 4,95)	27	4,07 (3,47 – 4,67)	16	3,88 (3,23 – 4,52)	19	4,05 (3,17 – 4,94)	8	3,25 (2,51 – 3,99)	27	3,67 (3,09 – 4,25)	10	3,10 (2,39 – 3,81)	23	3,87 (3,28 – 4,46)
Ende der Schicht	13	4,00 (3,04 – 4,96)	22	5,36 (4,40 – 6,33)	8	4,63 (3,86 – 5,39)	16	4,25 (3,27 – 5,23)	7	4,86 (3,61v6,10)	24	4,96 (4,15 – 5,77)	11	3,82 (2,66 – 4,97)	18	4,61 (3,95 – 5,27)
Vor dem Schlafengehen	13	6,38 (5,11 – 7,66)	31	6,77 (6,09 – 7,46)	15	6,47 (5,69 – 7,25)	31	5,45 (4,65 – 6,25)	9	7,00 (5,85 – 8,15)	38	5,84 (5,10 – 6,59)	19	6,47 (5,75 – 7,20)	20	7,15 (6,31 – 7,99)

<sup>1</sup> Ohne Lighting-Habits Interventionsgruppe, M: Mittelwert, (95%-KI): 95%-Konfidenzintervall, m: Anzahl Angaben, n.b. nicht bestimmbar

**Tabelle A 13 (Fortsetzung): Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der Karolinska Sleepines Skala der Nachtlcht- Interventions- und Vergleichsgruppe nach Feldphasen**

	Baseline				T1				T2				T3			
	Nachtlcht-Intervention		Vergleichsgruppe		Nachtlcht-Intervention		Vergleichsgruppe		Nachtlcht-Intervention		Vergleichsgruppe		Nachtlcht-Intervention		Vergleichsgruppe <sup>1</sup>	
	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)	m	M (95%-KI)
Nachtschicht (22 – 6 Uhr)																
Aufwachen	26	4,73 (4,06 – 5,40)	8	5,63 (4,29 – 6,96)	20	4,90 (4,07 – 5,73)	14	5,00 (4,22 – 5,78)	24	4,38 (3,77 – 4,98)	6	6,33 (5,06 – 7,60)	26	4,08 (3,44 – 4,71)	7	4,43 (2,24 – 6,62)
Schichtbeginn	29	3,28 (2,88 – 3,67)	9	4,11 (2,93 – 5,29)	12	2,83 (2,47 – 3,20)	6	4,00 (2,37 – 5,63)	20	2,90 (2,45 – 3,35)	1	n.b.	19	2,47 (2,00 – 2,94)	4	3,75 (-0,01 – 7,51)
+2h	26	3,04 (2,45 – 3,63)	6	5,17 (3,49 – 6,85)	14	2,93 (2,23 – 3,63)	8	3,38 (2,38 – 4,37)	22	3,59 (3,03 – 4,15)	6	3,50 (2,40 – 4,60)	21	3,14 (2,51 – 3,77)	5	3,00 (2,12 – 3,88)
Mitte der Schicht	26	3,50 (2,89-4,11)	9	5,00 (3,28 – 6,72)	20	3,05 (2,49 – 3,61)	4	3,25 (0,86 – 5,63)	27	3,56 (3,06 – 4,05)	9	3,78 (2,78 – 4,78)	24	3,29 (2,68 – 3,91)	6	4,00 (2,85 – 5,15)
+6h	27	4,70 (3,95 – 5,46)	6	5,17 (3,13 – 7,20)	18	3,94 (3,14 – 4,75)	6	4,33 (3,06 – 5,60)	32	3,91 (3,43 – 4,39)	8	4,00 (3,11 – 4,89)	24	3,50 (2,87 – 4,13)	6	4,33 (3,06 – 5,60)
Ende der Schicht	25	5,48 (4,58 – 6,38)	3	4,67 (0,87 – 8,46)	10	4,30 (3,08 – 5,52)	5	4,20 (2,36 – 6,04)	18	4,50 (3,53 – 5,47)	3	5,00 (2,52 – 7,48)	17	3,59 (2,64 – 4,53)	4	7,00 (5,16 – 8,84)
Vor dem Schlafengehen	34	6,53 (5,93 – 7,13)	10	7,20 (6,32 – 8,08)	23	6,65 (6,05 – 7,26)	17	6,35 (5,52 – 7,18)	27	5,85 (5,25 – 6,44)	8	7,38 (6,61 – 8,14)	29	5,97 (5,30 – 6,64)	7	7,86 (7,22 – 8,50)

<sup>1</sup> Ohne Lighting-Habits Interventionsgruppe, M: Mittelwert, (95%-KI): 95%-Konfidenzintervall, m: Anzahl Angaben, n.b. nicht bestimmbar

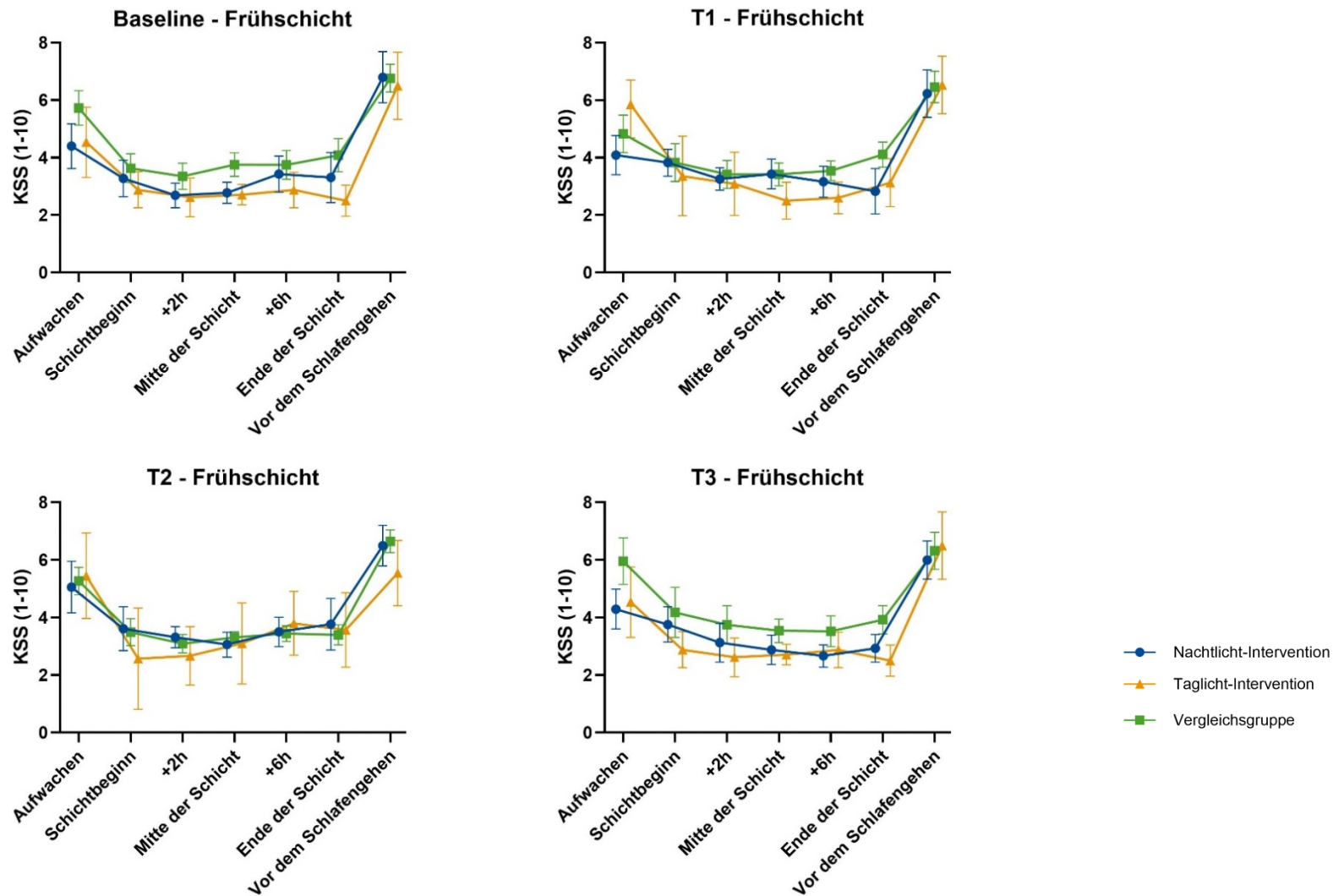
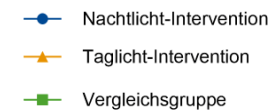
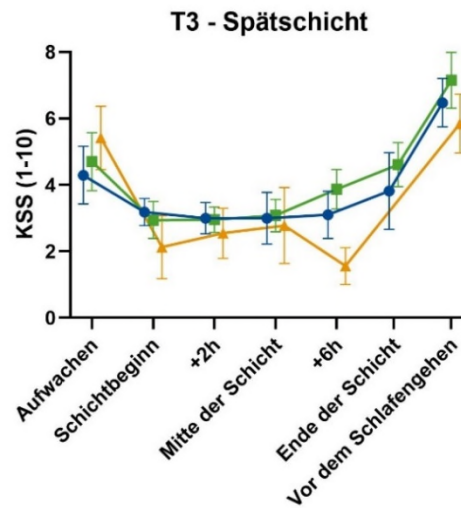
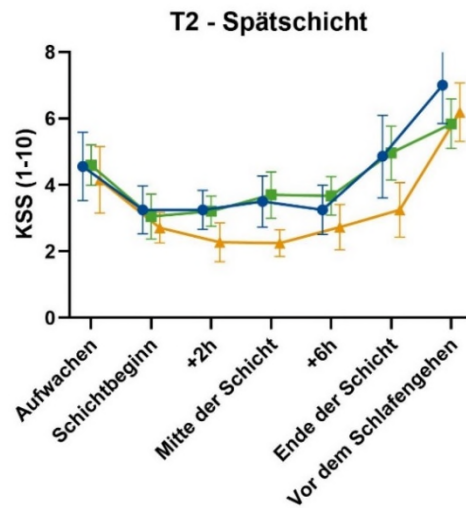
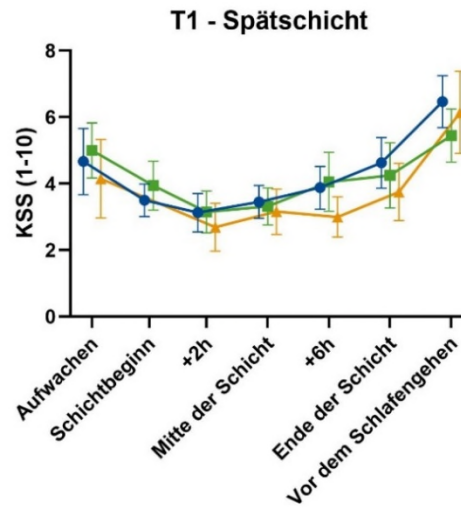
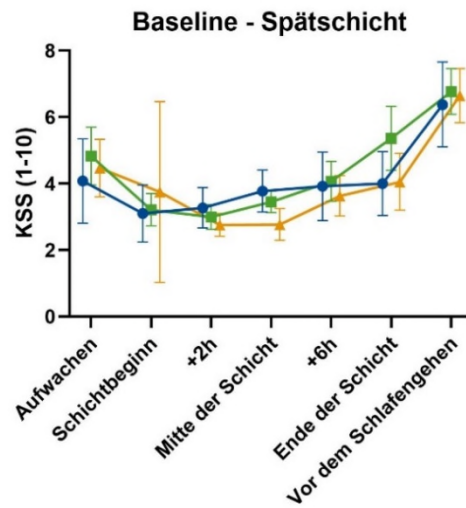
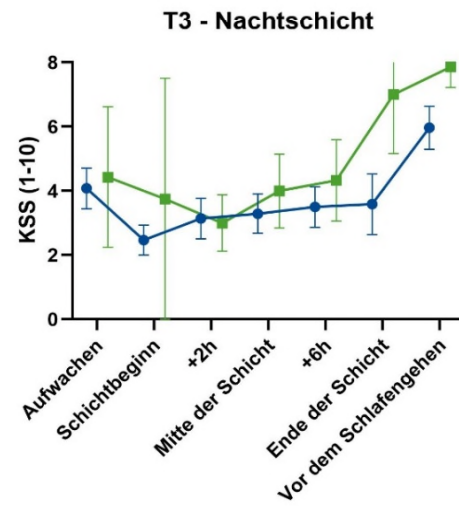
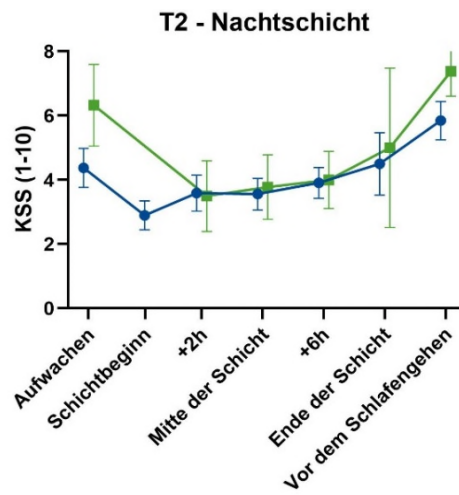
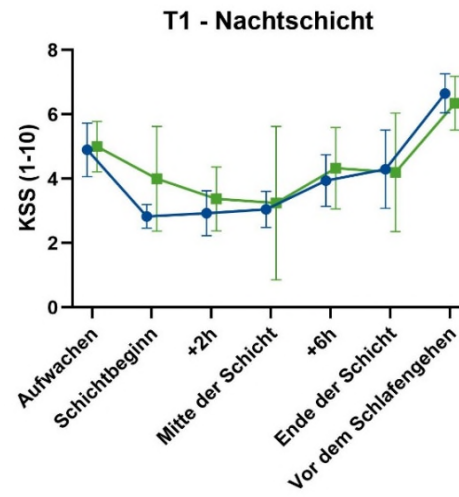
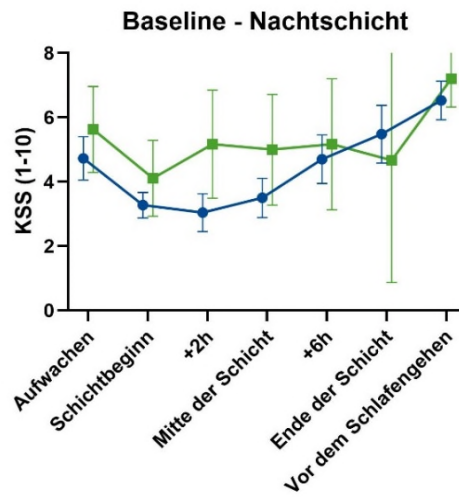


Abbildung A 14. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Schläfrigkeitsangaben in den Frühschichten nach Untersuchungsgruppe und Feldphase



**Abbildung A 15. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Schläfrigkeitsangaben (nach Karolinska Sleepiness Scale) in den Spätschichten nach Untersuchungsgruppe und Feldphase**





—●— Nachtlicht-Intervention  
—■— Vergleichsgruppe

**Abbildung A 16. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Schläfrigkeitsangaben (nach Karolinska Sleepiness Scale) in den Nachtschichten nach Untersuchungsgruppe und Feldphase**

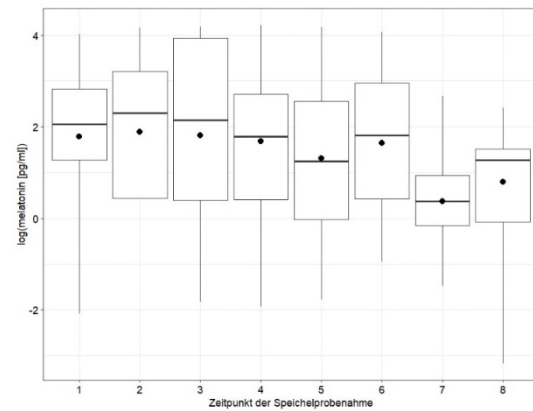
## Ergebnisse der Hormonmessungen

**Tabelle A 14. Beschreibung der Melatonin-Werte (in pg/ml) in der Nachtlicht-Interventionsgruppe nach Feldphase**

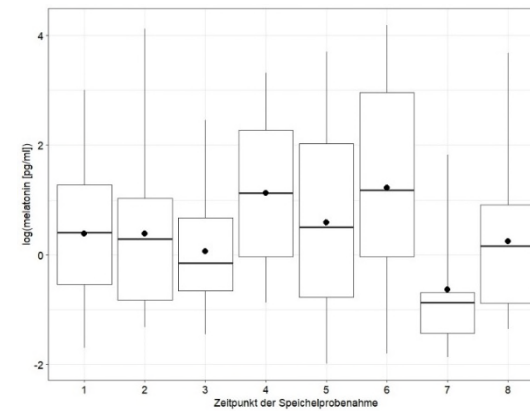
Saliva sample	Baseline		T1		T2		T3	
	(N = 14)		(N = 10)		(N = 11)		(N = 12)	
	m	GM (95%-KI)	m	GM (95%-KI)	m	GM (95%-KI)	m	GM (95%-KI)
Schichtbeginn	26	5,95 (4,86 – 7,28)	20	1,47 (1,24 – 1,75)	19	6,55 (5,58 – 7,71)	22	4,46 (3,99 – 5,00)
+2h	25	6,62 (5,36 – 8,19)	19	1,47 (1,23 – 1,76)	18	5,83 (4,93 – 6,90)	23	3,95 (3,49 – 4,48)
Mitte der Schicht	27	6,09 (4,87 – 7,61)	20	1,07 (0,93 – 1,23)	19	5,71 (4,92 – 6,61)	24	4,30 (3,63 – 5,10)
+6h	26	5,35 (4,37 – 6,55)	19	3,07 (2,6 – 3,63)	17	7,91 (6,72 – 9,31)	24	6,05 (5,14 – 7,12)
Ende der Schicht	25	3,73 (3,00 – 4,63)	18	1,80 (1,41 – 2,31)	16	7,50 (6,37 – 8,83)	24	5,41 (4,49 – 6,52)
Vor dem Schlafengehen	26	5,16 (4,28 – 6,22)	17	3,41 (2,59 – 4,48)	15	8,68 (7,37 – 10,23)	23	2,65 (2,33 – 3,03)
Aufwachen	26	1,45 (1,28 – 1,65)	18	0,53 (0,45 – 0,62)	15	5,67 (4,71 – 6,82)	23	2,07 (1,85 – 2,31)
+30 min	25	2,22 (1,91 – 2,58)	18	1,28 (1,06 – 1,55)	15	5,39 (4,7 – 6,18)	23	3,24 (2,87 – 3,66)

GM: geometrischer Mittelwert; KI: Konfidenzintervall; N: Anzahl Teilnehmender; m: Anzahl Speichelproben

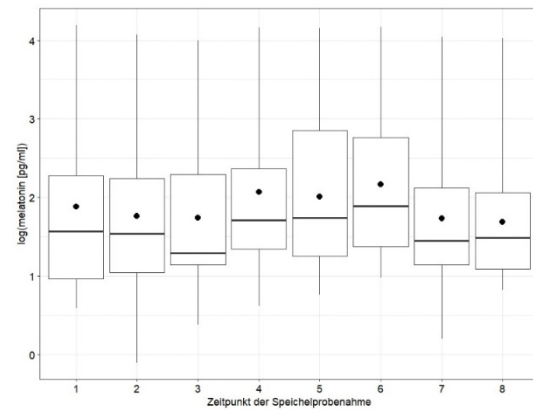
**Baseline - Nachtschicht**



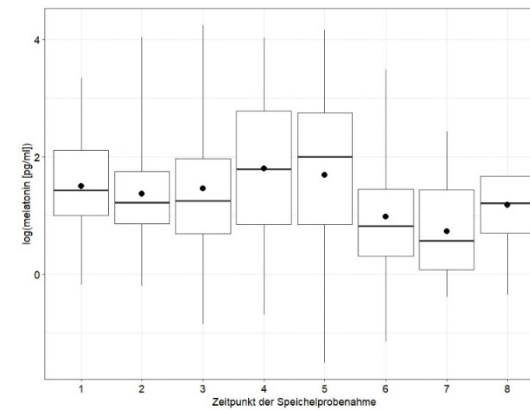
**T1 - Nachtschicht**



**T2 - Nachtschicht**



**T3 - Nachtschicht**



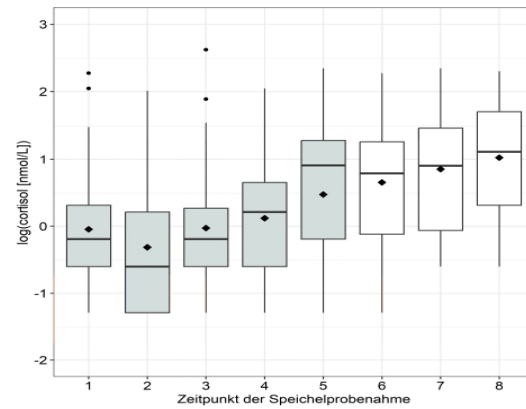
**Abbildung A 17. Boxplots der logarithmierten Melatonin-Werte (in pg/ml) der Nachtlcht-Interventionsgruppe nach Feldphase; die Zeitpunkte der Speichelprobenahme entsprechen 1 = Schichtbeginn, 2 = nach 2 Stunden, 3 = Schichtmitte, 4 = nach 6 Stunden, 5 = Schichtende, 6 = vor dem Schlafen, 7 = nach dem Aufwachen, 8 = ca. 30 Minuten nach dem Aufwachen**

**Tabelle A 15. Beschreibung der Cortisol-Werte (in nmol/L) in der Nachtlcht-Interventionsgruppe nach Feldphase**

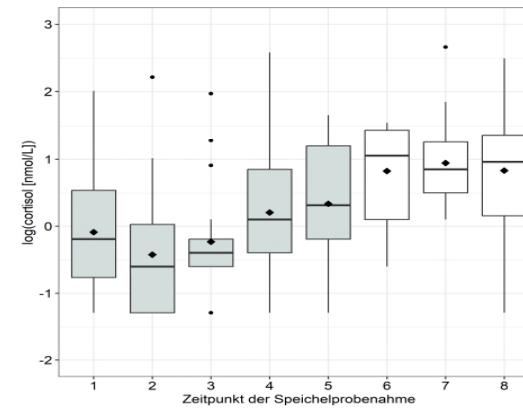
Saliva sample	Baseline		T1		T2		T3	
	N=14		N=10		N=11		N=12	
	m	GM (95%-KI)	m	GM (95%-KI)	m	GM (95%-KI)	m	GM (95%-KI)
Schichtbeginn	25	0,96 (0,64 – 1,44)	20	0,92 (0,59 – 1,43)	19	1,29 (0,87 – 1,91)	20	1,29 (0,75 – 2,21)
+2h	23	0,73 (0,49 – 1,09)	18	0,66 (0,41 – 1,05)	17	0,75 (0,44 – 1,28)	20	1 (0,53 – 1,89)
Mitte der Schicht	26	0,97 (0,66 – 1,43)	18	0,8 (0,52 – 1,22)	19	1,16 (0,7 – 1,91)	22	0,6 (0,36 – 0,99)
+6h	26	1,13 (0,75 – 1,68)	19	1,22 (0,74 – 2,03)	16	1,41 (0,85 – 2,32)	23	0,82 (0,49 – 1,37)
Ende der Schicht	25	1,62 (1 – 2,61)	17	1,41 (0,9 – 2,2)	15	1,26 (0,61 – 2,6)	22	0,9 (0,57 – 1,41)
Vor dem Schlafengehen	26	1,93 (1,32 – 2,84)	16	2,96 (1,53 – 5,76)	15	2,19 (1,19 – 4,04)	23	1,88 (1,27 – 2,79)
Aufwachen	26	2,35 (1,66 – 3,33)	18	2,57 (1,85 – 3,56)	15	1,91 (1,24 – 2,95)	22	2,37 (1,56 – 3,6)
+30 min	25	2,78 (1,94 – 3,98)	18	2,3 (1,36 – 3,88)	15	2,04 (1,23 – 3,39)	22	1,45 (0,84 – 2,5)

GM: geometrischer Mittelwert; KI: Konfidenzintervall; N: Anzahl Teilnehmender; m: Anzahl Speichelproben

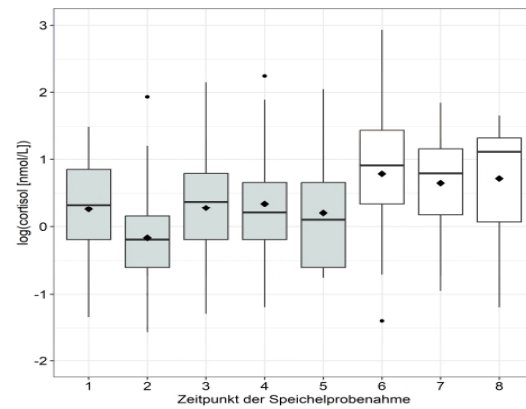
**Baseline - Nachtschicht**



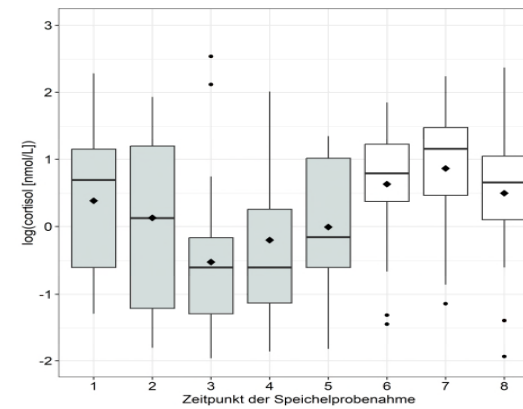
**T1 - Nachtschicht**



**T2 - Nachtschicht**



**T3 - Nachtschicht**



**Abbildung A 18.** Boxplots der logarithmierten Cortisol-Werte (in nmol/L) der Nachtlcht-Interventionsgruppe nach Feldphase; die Zeitpunkte der Speichelprobenahme entsprechen 1 = Schichtbeginn, 2 = nach 2 Stunden, 3 = Schichtmitte, 4 = nach 6 Stunden, 5 = Schichtende, 6 = vor dem Schlafen, 7 = nach dem Aufwachen, 8 = ca. 30 Minuten nach dem Aufwachen

**Tabelle A 16. Beschreibung der Studienpopulation mit Haarproben für die Analyse der Haarcortisol-Konzentration zur Baseline<sup>1</sup>**

	Nachtlicht- Intervention (N = 13)	Taglicht- Intervention (N = 12)	Betriebliche Referenzgruppe (N = 35)	Nachrekrutierte Teilnehmende (N = 20)	Gesamt <sup>2</sup> (N = 80)
Männlich, n (%)	8 (61,5)	8 (66,7)	27 (77,1)	17 (85)	60 (75)
Alter, M (SD)	40,8 (8,4)	36,4 (10,2)	42,0 (13,2)	34,1 (16,1)	39,0 (13,2)
über 40 Jahre, n (%)	6 (46,2)	*	19 (54,3)	7 (35,0)	34 (42,5)
Body Mass Index, M (SD)	26,4 (3,8)	29,5 (6,8)	28,4 (3,8)	27,6 (6,5)	28,1 (5,1)
Body Mass Index, n (%)					
Normalgewicht	6 (46,2)	*	7 (20,0)	8 (40,0)	25 (31,4)
Übergewicht	5 (38,5)	*	17 (48,6)	7 (35,0)	32 (40,0)
Adipositas Grad I	*	*	9 (25,7)	*	18 (22,5)
Adipositas Grad II bis III	*	*	*	*	5 (6,3)
Haarbehandlung, n (%)	5 (38,5)	*	*	*	13 (16,3)
Haare gebleicht/getönt	*	*	*	*	*
Haare gefärbt	*	*	*	*	11 (13,8)
Strähnen	*	*	*	*	5 (6,3)
Kritische Lebensereignisse in den letzten 12 Monaten, n (%)	8 (61,5)	8 (66,7)	6 (17,1)	11 (55,0)	33 (41,3)
Vorgesetzte/r, n (%)	*	8 (66,7)	13 (37,1)	*	24 (30,0)
Krisen-Score <sup>3</sup> , M (SD)	2,1 (1,0)	2,3 (1,0)	2,2 (1,0)	3,2 (1,1)	2,4 (1,1)
Arbeitsplatzbelastung <sup>4</sup> , M (SD)	5,4 (1,5)	6,0 (1,0)	5,4 (1,3)	5,2 (1,2)	5,4 (1,3)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; <sup>1</sup> Baseline: T0 für die Nachtlicht- und Taglicht-Intervention sowie betriebliche Referenzgruppe; T2 für nachrekrutierte Teilnehmende; <sup>2</sup> Ausschluss von n = 1 Person aufgrund von Diabetes mellitus Typ 1; <sup>3</sup> Skala des Krisen-Scores: 1 - 5 (gar nicht - sehr stark); <sup>4</sup> Skala der Arbeitsplatzbelastung: 1 - 10 (gering hoch); M: Mittelwert, SD: Standardabweichung, N, n: Anzahl Teilnehmender



**Tabelle A 17. Geometrische Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Haarcortisol-Konzentration (in pg/mg) nach Interventionsgruppe und Feldphase nach Ausschluss von n = 1 Person aufgrund Diabetes mellitus Typ 1**

Feldphase	Nachtlicht- Intervention (N = 14)		Taglicht- Intervention (N = 13)		Vergleichs- gruppe (N = 33)		Lighting Habits Intervention (N = 26)		Gesamt (N = 86)	
	n	GM (95%-KI)	n	GM (95%-KI)	n	GM (95%-KI)	n	GM (95%-KI)	n	GM (95%-KI)
Baseline T0	13	5,58 (3,54 – 8,79)	10	4,75 (2,15 – 10,5)	n = 28; 5,38 (3,75 – 7,71)				52	5,30 (4,10 – 6,84)
T1	13	3,70 (2,70 – 5,06)	9	3,19 (1,03 – 9,88)	n = 27; 3,21 (2,17 – 4,77)				49	3,33 (2,51 – 4,42)
T2	12	4,93 (2,74 – 8,85)	8	3,54 (1,54 – 8,14)	23	4,15 (3,0 – 5,78)	21	5,37 (3,17 – 9,08)	65	4,58 (3,60 – 5,82)
T3	12	2,82 (1,12 – 7,11)	6	3,70 (1,44 – 9,52)	21	2,56 (1,90 – 3,44)	19	2,58 (1,79 – 3,72)	58	2,72 (2,14 – 3,45)

N, n: Anzahl der Teilnehmenden/der HCC-Messungen, GM: Geometrisches Mittel, 95%-KI: 95%- Konfidenzintervall

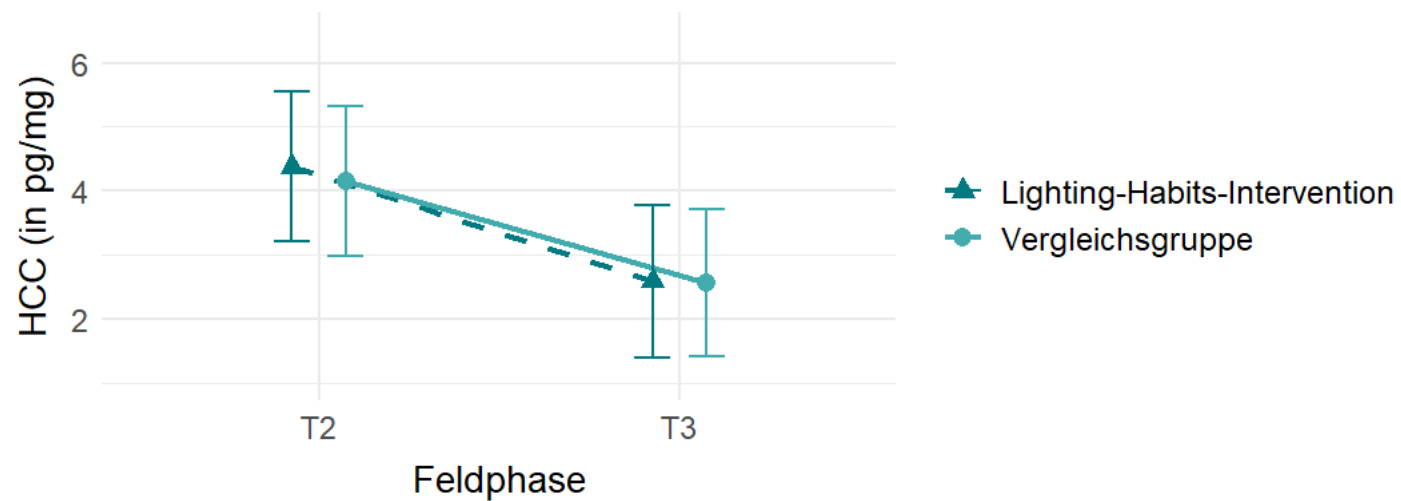


Abbildung A 19. Geometrische Mittelwerte und Standardfehler der Haarcortisol-Konzentration (in pg/mg) nach Untersuchungsgruppe und Feldphase

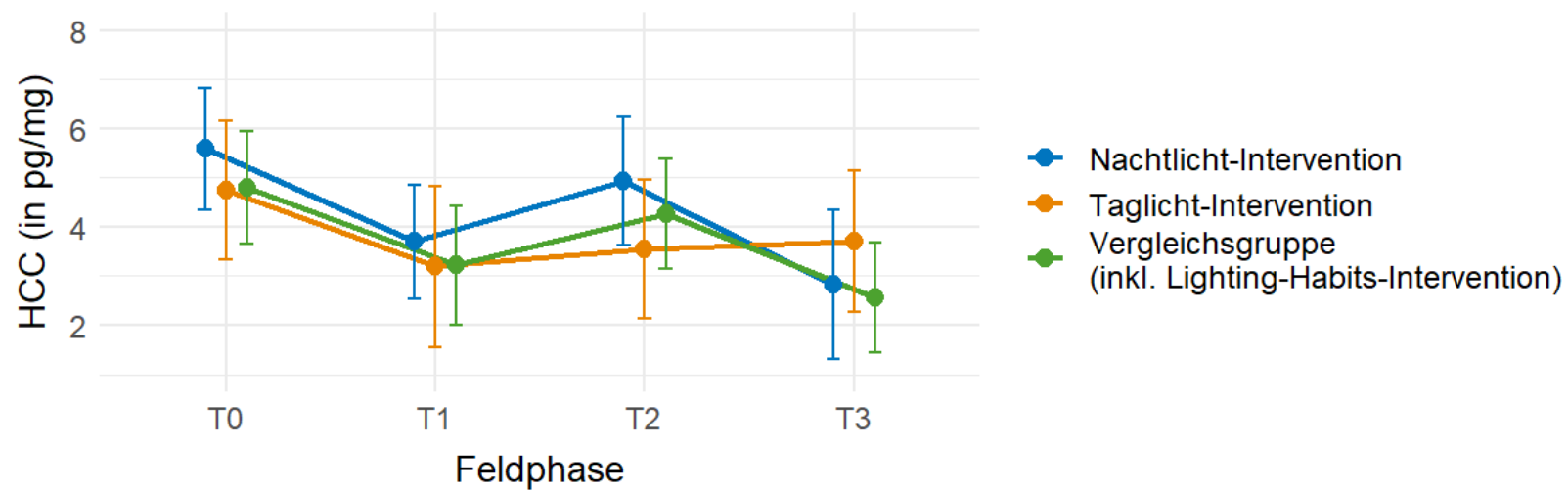
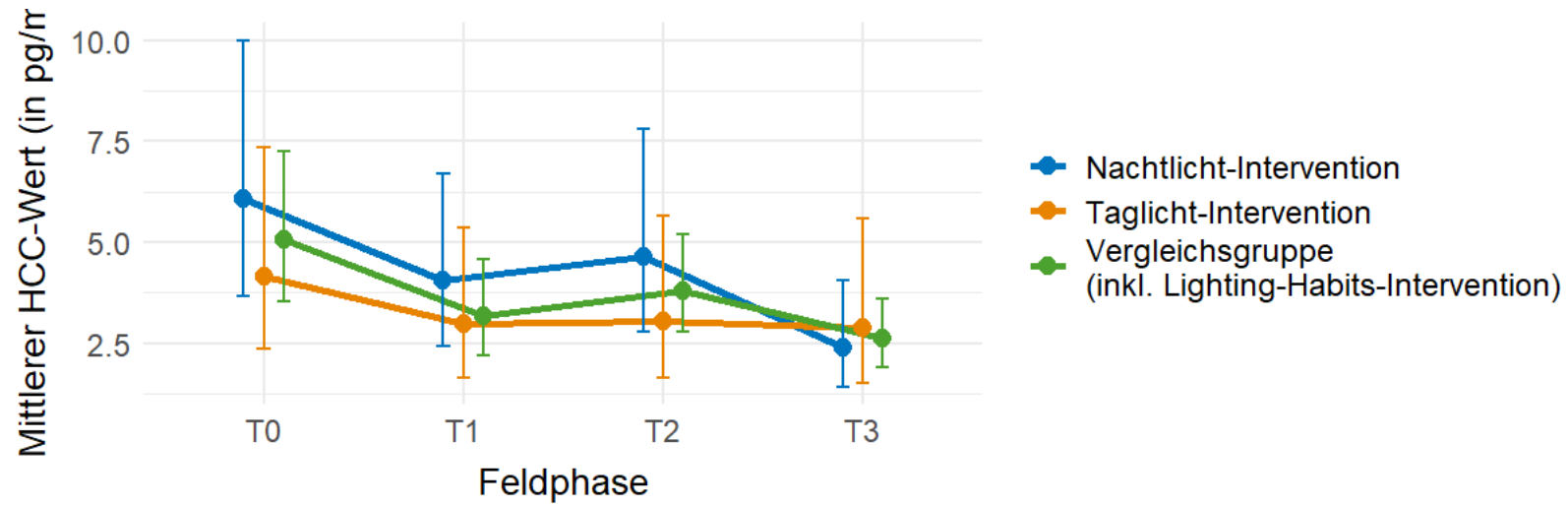


Abbildung A 20. Geometrische Mittelwerte und Standardfehler der Haarcortisol-Konzentration (in pg/mg) nach Untersuchungsgruppe und Feldphase



**Abbildung A 21. Adjustierte Mittelwerte und 95%- Konfidenzintervalle der Haarcortisol-Konzentration (in pg/mg) nach Untersuchungsgruppe und Feldphase**

## Einschätzung der Beleuchtungssituation

**Tabelle A 18. Beschreibung der Studienpopulation mit Angaben zur Einschätzung der Beleuchtung in Hinblick auf Helligkeit und Lichtfarbe zur Baseline**

	Nachtlicht- Intervention (N = 14)	Taglicht- Intervention (N = 13)	Betriebliche Referenzgruppe (N = 39)	Nachrekrutierte Teilnehmende (N = 19)	Gesamt (N = 85)
Geschlecht					
Männlich	9 (64,3%)	9 (69,2%)	30 (76,9%)	17 (89,5%)	65 (76,5%)
Alter (M, SD)	39,9 (8,7)	37,8 (11,2)	42,1 (12,8)	34,7 (16,1)	39,4 (12,9)
unter 40	8 (57,1%)	10 (76,9%)	18 (46,2%)	12 (63,2%)	48 (56,5%)
über 40	6 (42,9%)	*	21 (53,8%)	7 (36,8%)	37 (43,5%)
Überwiegendes Schichtsystem					
Nur Frühschichten	*	*	*	8 (42,1%)	12 (14,1%)
Früh- und Spätschichten	*	12 (92,3%)	18 (46,2%)	9 (47,4%)	39 (45,9%)
Früh-, Spät- und Nachtschichten	14 (100%)	*	8 (20,5%)	*	22 (25,9%)
Anderes Schichtsystem	*	*	9 (23,1%)	*	12 (14,1%)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; M: Mittelwert, SD: Standardabweichung

**Tabelle A 19. Anzahl und Anteil der Angaben zur Hallenbeleuchtung, die in Hinblick auf die Helligkeit als “angenehm” eingeschätzt haben**

Feldphase	Zeitpunkt in der Schicht	Nachtlich- Intervention (N = 14)		Taglich- Intervention (N = 13)		Vergleichs- gruppe (N = 39)		Lighting Habits Intervention (N = 19)		Gesamt (N = 85)	
Frühschicht		n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)
Baseline	zu Beginn	14	13 (93)	12	5 (42)	37	23 (62)	-	-	63	41 (65)
	nach 2 Stunden	14	14 (100)	12	9 (75)	37	28 (76)	-	-	63	51 (81)
	in der Mitte	13	11 (85)	12	10 (80)	37	33 (89)	-	-	62	54 (87)
	nach 6 Stunden	12	11 (92)	12	6 (50)	37	32 (86)	-	-	61	49 (80)
	am Ende	12	10 (83)	12	9 (75)	37	32 (86)	-	-	61	51 (84)
T1	zu Beginn	11	10 (91)	10	8 (80)	32	18 (56)	-	-	53	36 (68)
	nach 2 Stunden	11	10 (91)	10	8 (80)	32	25 (78)	-	-	53	43 (81)
	in der Mitte	11	7 (64)	10	9 (90)	32	27 (84)	-	-	53	43 (81)
	nach 6 Stunden	11	8 (73)	10	8 (80)	32	26 (81)	-	-	53	42 (79)
	am Ende	11	8 (73)	10	8 (80)	32	25 (78)	-	-	53	41 (77)
T2	zu Beginn	11	10 (91)	9	7 (78)	23	15 (65)	19	16 (84)	62	48 (77)
	nach 2 Stunden	11	11 (100)	9	8 (89)	22	19 (86)	19	15 (79)	61	54 (87)
	in der Mitte	11	10 (91)	9	9 (100)	22	17 (77)	19	16 (84)	61	52 (85)
	nach 6 Stunden	11	10 (91)	9	8 (89)	22	15 (68)	19	13 (68)	61	46 (75)
	am Ende	11	10 (91)	9	7 (78)	22	15 (68)	19	14 (74)	61	46 (75)
T3	zu Beginn	10	7 (70)	10	7 (70)	20	15 (75)	19	15 (79)	59	44 (75)
	nach 2 Stunden	9	9 (100)	10	8 (80)	19	16 (84)	19	17 (89)	57	50 (88)
	in der Mitte	10	9 (90)	10	9 (90)	19	18 (95)	19	14 (74)	58	50 (86)
	nach 6 Stunden	10	9 (90)	10	8 (80)	19	13 (68)	19	13 (68)	58	43 (74)
	am Ende	10	9 (90)	10	7 (70)	18	11 (61)	19	11 (58)	57	38 (67)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; N, n: Anzahl der Teilnehmenden

**Tabelle A 19 (Fortsetzung). Anzahl und Anteil der Angaben zur Hallenbeleuchtung, die in Hinblick auf die Helligkeit als “angenehm” eingeschätzt haben**

Feldphase	Zeitpunkt in der Schicht	Nachtlich- Intervention (N = 14)		Taglich- Intervention (N = 13)		Vergleichs- gruppe (N = 39)		Lighting Habits Intervention (N = 19)		Gesamt (N = 85)	
Spätschicht		n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)
Baseline	zu Beginn	12	10 (83)	11	9 (82)	22	21 (95)	-	-	45	40 (89)
	nach 2 Stunden	12	10 (83)	11	8 (73)	22	20 (91)	-	-	45	38 (84)
	in der Mitte	12	10 (83)	11	7 (64)	21	17 (81)	-	-	44	34 (77)
	nach 6 Stunden	12	11 (92)	11	6 (55)	22	13 (59)	-	-	45	30 (67)
	am Ende	12	10 (83)	11	5 (45)	22	13 (59)	-	-	45	28 (62)
T1	zu Beginn	11	9 (82)	8	7 (88)	18	14 (78)	-	-	37	30 (81)
	nach 2 Stunden	11	9 (82)	8	8 (100)	18	14 (78)	-	-	37	31 (84)
	in der Mitte	10	8 (80)	7	6 (86)	18	12 (67)	-	-	35	26 (74)
	nach 6 Stunden	11	9 (82)	8	4 (50)	18	7 (39)	-	-	37	20 (54)
	am Ende	11	9 (82)	8	4 (50)	18	6 (33)	-	-	37	19 (51)
T2	zu Beginn	7	6 (86)	11	10 (91)	12	10 (83)	11	6 (55)	41	32 (78)
	nach 2 Stunden	7	6 (86)	11	9 (82)	11	7 (64)	11	6 (55)	40	28 (70)
	in der Mitte	7	6 (86)	11	9 (82)	11	8 (73)	11	5 (45)	40	28 (70)
	nach 6 Stunden	7	6 (86)	11	5 (45)	11	8 (73)	11	5 (45)	40	24 (60)
	am Ende	7	5 (71)	11	6 (55)	11	8 (73)	10	5 (45)	40	24 (60)
T3	zu Beginn	9	8 (89)	7	7 (100)	14	13 (93)	10	7 (70)	40	35 (88)
	nach 2 Stunden	9	8 (89)	7	7 (100)	14	12 (86)	10	9 (90)	40	36 (90)
	in der Mitte	9	6 (67)	7	6 (86)	14	10 (71)	10	5 (50)	40	27 (68)
	nach 6 Stunden	9	6 (67)	7	5 (71)	14	8 (57)	10	5 (50)	40	24 (60)
	am Ende	9	6 (67)	7	4 (57)	14	7 (50)	10	5 (50)	40	22 (55)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; N, n: Anzahl der Teilnehmenden



**Tabelle A 19 (Fortsetzung). Anzahl und Anteil der Angaben zur Hallenbeleuchtung, die in Hinblick auf die Helligkeit als “angenehm” eingeschätzt haben**

Feldphase	Zeitpunkt in der Schicht	Nachtlich- Intervention (N = 14)		Taglich- Intervention (N = 13)		Vergleichs- gruppe (N = 39)		Lighting Habits Intervention (N = 19)		Gesamt (N = 85)	
Nachtschicht		n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)
Baseline	zu Beginn	13	10 (77)	-	-	5	5 (100)	-	-	18	15 (83)
	nach 2 Stunden	13	9 (69)	-	-	5	4 (80)	-	-	18	13 (72)
	in der Mitte	13	9 (69)	-	-	5	3 (60)	-	-	18	12 (67)
	nach 6 Stunden	13	9 (69)	-	-	5	2 (40)	-	-	18	11 (61)
	am Ende	13	9 (69)	-	-	5	2 (40)	-	-	18	11 (61)
T1	zu Beginn	9	7 (78)	-	-	7	6 (86)	-	-	16	13 (81)
	nach 2 Stunden	9	7 (78)	-	-	7	6 (86)	-	-	16	13 (81)
	in der Mitte	9	3 (33)	-	-	7	6 (86)	-	-	16	9 (56)
	nach 6 Stunden	9	5 (56)	-	-	7	3 (43)	-	-	16	8 (50)
	am Ende	9	4 (44)	-	-	7	2 (33)	-	-	15	6 (40)
T2	zu Beginn	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	16	13 (81)
	nach 2 Stunden	12	11 (92)	-	-	*	*	-	-	16	14 (88)
	in der Mitte	12	11 (92)	-	-	*	*	-	-	16	13 (81)
	nach 6 Stunden	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	16	11 (69)
	am Ende	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	16	11 (69)
T3	zu Beginn	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	15	12 (80)
	nach 2 Stunden	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	15	12 (80)
	in der Mitte	12	9 (75)	-	-	*	*	-	-	15	11 (73)
	nach 6 Stunden	12	11 (92)	-	-	*	*	-	-	15	12 (80)
	am Ende	12	11 (92)	-	-	*	*	-	-	15	11 (73)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; N, n: Anzahl der Teilnehmenden

**Tabelle A 20. Anzahl und Anteil der Angaben zur Hallenbeleuchtung, die in Hinblick auf die Lichtfarbe als „angenehm“ eingeschätzt haben**

Feldphase	Zeitpunkt in der Schicht	Nachtlicht-Intervention N = 14		Taglicht-Intervention N = 13		Vergleichsgruppe N = 39		Lighting-Habits-Intervention N = 19		Gesamt N = 85	
Frühschicht		n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)
Baseline	zu Beginn	14	10 (71)	12	4 (33)	36	24 (67)	-	-	62	38 (61)
	nach 2 Stunden	14	12 (86)	12	9 (75)	36	24 (67)	-	-	62	45 (73)
	in der Mitte	13	11 (85)	12	9 (75)	36	25 (69)	-	-	61	45 (74)
	nach 6 Stunden	12	10 (83)	12	7 (58)	36	26 (72)	-	-	60	43 (72)
	am Ende	12	10 (83)	12	9 (75)	36	27 (75)	-	-	60	46 (77)
T1	zu Beginn	11	9 (82)	10	8 (80)	32	19 (59)	-	-	53	36 (68)
	nach 2 Stunden	11	9 (82)	10	7 (70)	31	21 (68)	-	-	52	37 (71)
	in der Mitte	11	9 (82)	10	8 (80)	31	23 (74)	-	-	52	40 (77)
	nach 6 Stunden	11	9 (82)	10	6 (60)	31	22 (71)	-	-	52	37 (71)
	am Ende	11	9 (82)	10	7 (70)	31	21 (68)	-	-	52	37 (71)
T2	zu Beginn	11	10 (91)	9	7 (78)	22	10 (45)	19	14 (74)	61	41 (67)
	nach 2 Stunden	11	10 (91)	9	7 (77)	21	12 (57)	19	15 (79)	60	44 (73)
	in der Mitte	11	9 (82)	9	8 (89)	21	15 (71)	19	14 (74)	60	46 (77)
	nach 6 Stunden	11	9 (82)	9	7 (78)	21	14 (67)	19	14 (74)	60	44 (73)
	am Ende	11	9 (82)	9	7 (78)	21	14 (67)	19	14 (74)	60	44 (73)
T3	zu Beginn	10	8 (80)	10	8 (80)	20	12 (60)	19	13 (68)	59	41 (69)
	nach 2 Stunden	10	9 (90)	10	7 (70)	19	15 (79)	19	15 (79)	58	46 (79)
	in der Mitte	10	9 (90)	10	9 (90)	19	14 (74)	19	15 (79)	58	47 (81)
	nach 6 Stunden	10	9 (90)	10	9 (90)	18	12 (67)	19	15 (79)	57	45 (79)
	am Ende	10	9 (90)	10	9 (90)	18	13 (68)	19	14 (74)	58	45 (79)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; N, n: Anzahl der Teilnehmenden

**Tabelle A 20 (Fortsetzung). Anzahl und Anteil der Angaben zur Hallenbeleuchtung, die in Hinblick auf die Lichtfarbe als „angenehm“ eingeschätzt haben**

Feldphase	Zeitpunkt in der Schicht	Nachtlicht-Intervention N = 14		Taglicht-Intervention N = 13		Vergleichsgruppe N = 39		Lighting-Habits-Intervention N = 19		Gesamt N = 85	
Spätschicht		n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)
Baseline	zu Beginn	12	7 (58)	11	7 (64)	22	16 (73)	-	-	45	30 (67)
	nach 2 Stunden	12	7 (58)	11	7 (64)	22	15 (68)	-	-	45	29 (64)
	in der Mitte	12	8 (67)	11	6 (55)	22	15 (68)	-	-	44	29 (64)
	nach 6 Stunden	12	10 (83)	11	8 (73)	22	14 (64)	-	-	45	32 (71)
	am Ende	12	9 (75)	11	7 (64)	22	13 (59)	-	-	45	29 (64)
T1	zu Beginn	11	10 (91)	8	5 (63)	18	13 (72)	-	-	37	28 (76)
	nach 2 Stunden	11	10 (91)	8	6 (75)	18	13 (72)	-	-	37	29 (78)
	in der Mitte	10	8 (73)	7	5 (63)	18	12 (67)	-	-	37	25 (68)
	nach 6 Stunden	11	8 (73)	8	3 (38)	18	10 (56)	-	-	37	21 (57)
	am Ende	11	9 (82)	8	3 (38)	18	10 (56)	-	-	37	22 (59)
T2	zu Beginn	7	7 (100)	11	9 (82)	12	7 (58)	11	8 (73)	41	31 (76)
	nach 2 Stunden	7	7 (100)	11	10 (91)	11	7 (64)	11	8 (73)	40	32 (80)
	in der Mitte	7	7 (100)	11	11 (100)	11	7 (64)	11	8 (73)	40	33 (33)
	nach 6 Stunden	7	7 (100)	11	9 (82)	11	6 (55)	11	7 (64)	40	29 (29)
	am Ende	7	6 (86)	11	9 (82)	11	6 (55)	10	6 (60)	39	27 (69)
T3	zu Beginn	9	8 (89)	7	6 (86)	14	7 (50)	10	7 (70)	40	28 (70)
	nach 2 Stunden	9	8 (89)	7	7 (100)	14	7 (50)	10	8 (80)	40	30 (75)
	in der Mitte	9	8 (89)	7	7 (100)	14	10 (71)	10	6 (60)	40	31 (78)
	nach 6 Stunden	9	7 (78)	7	6 (86)	14	8 (57)	10	3 (30)	40	24 (60)
	am Ende	9	7 (77)	7	5 (71)	14	6 (43)	10	3 (30)	40	21 (53)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; N, n: Anzahl der Teilnehmenden

**Tabelle A 20 (Fortsetzung). Anzahl und Anteil der Angaben zur Hallenbeleuchtung, die in Hinblick auf die Lichtfarbe als „angenehm“ eingeschätzt haben**

Feldphase	Zeitpunkt in der Schicht	Nachtlicht-Intervention N = 14		Taglicht-Intervention N = 13		Vergleichsgruppe N = 39		Lighting-Habits-Intervention N = 19		Gesamt N = 85	
Nachtschicht		n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)	n	Anzahl (%)
Baseline	zu Beginn	13	8 (62)	-	-	5	5 (100)	-	-	18	13 (72)
	nach 2 Stunden	13	9 (69)	-	-	5	4 (80)	-	-	18	13 (72)
	in der Mitte	13	8 (62)	-	-	5	3 (60)	-	-	18	11 (61)
	nach 6 Stunden	13	10 (77)	-	-	5	2 (40)	-	-	18	12 (67)
	am Ende	13	9 (69)	-	-	5	2 (40)	-	-	18	11 (61)
T1	zu Beginn	9	5 (56)	-	-	7	4 (57)	-	-	16	9 (56)
	nach 2 Stunden	9	6 (67)	-	-	7	5 (71)	-	-	16	11 (69)
	in der Mitte	9	5 (56)	-	-	7	3 (43)	-	-	16	8 (50)
	nach 6 Stunden	9	5 (56)	-	-	7	2 (29)	-	-	16	7 (44)
	am Ende	9	5 (56)	-	-	7	1 (14)	-	-	15	6 (38)
T2	zu Beginn	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	16	13 (81)
	nach 2 Stunden	12	11 (92)	-	-	*	*	-	-	16	14 (88)
	in der Mitte	12	9 (75)	-	-	*	*	-	-	16	11 (69)
	nach 6 Stunden	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	16	11 (69)
	am Ende	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	16	11 (69)
T3	zu Beginn	12	10 (83)	-	-	*	*	-	-	15	11 (73)
	nach 2 Stunden	11	9 (82)	-	-	*	*	-	-	14	10 (71)
	in der Mitte	12	9 (75)	-	-	*	*	-	-	15	10 (67)
	nach 6 Stunden	12	11 (92)	-	-	*	*	-	-	15	11 (73)
	am Ende	12	11 (92)	-	-	*	*	-	-	15	11 (73)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt; N, n: Anzahl der Teilnehmenden

## Ergebnisse zur Umsetzung der Lighting-Habits-Intervention

*Tabelle A 21. Beschreibung der Studienpopulationen mit Informationen zu Umsetzung der Lighting-Habits-Empfehlungen*

	Befragung zur Lighting-Habits zu Beginn von T3 (N = 23)		Befragung zur Lighting-Habits am Ende von T3 (N = 16)		Empfehlungs- Prompts der Studienhandys (N = 21)		Lighting-Habits- Intervention mit LightWatcher (N = 22)		Vergleichsgruppe ohne LH- Intervention mit LightWatcher (N = 23)	
Männlich, n (%)	21	(91,3)	15	(93,8)	19	(90,5)	20	(90,9)	15	(65,2)
Alter, M (SD) <sup>1</sup>	40,2	(15,1)	40,3	(15,7)	39,7	(15,5)	41,8	(14,6)	42,7	(13,3)
BMI, M (SD) <sup>1</sup>	27,9	(5,3)	27,4	(4,2)	28,1	(4,1)	28,6	(4,4)	28,9	(5,5)
Chronotyp, M (SD, in h:mm) <sup>2</sup>	3:39	(1:13)	3:47	(1:10)	3:38	(1:16)	3:34	(1:14)	4:17	(1:50)

<sup>1</sup> Alter und BMI bei Erstinterview, <sup>2</sup> ermittelt anhand der Aktigraphie, M: Mittelwert, SD: Standardabweichung, N, n: Anzahl der Teilnehmenden, BMI: Body-Mass-Index

**Tabelle A 22. Eigenangaben der Teilnehmenden zu den Lighting-Habits-Empfehlungen zu T3 (Befragungen und Studienhandys)**

Empfehlungen	Instrument / Antworten	Befragung zu Lighting-Habits zu Beginn von T3 (N = 23) n (%)	Befragung zu Feldphase T3 am Ende von T3 (N = 16) n (%)	Empfehlungs- Events (N = 21) n (%)
Mindestens eine Empfehlung ausprobiert	Lighting-Habits-Fragebogen Studienhandys	23 (100)	14 (87,5)	21 (100)
Blaulichtfilternde Brille	Einmal und mehr ausprobiert	13 (56,5)	10 (62,5)	
	Bewertung der Wirksamkeit			
	Neutral, schlecht/eher schlecht*	8 (34,7)	5 (31,3)	
	gut/eher gut	5 (21,7)	5 (31,3)	
	Mobiles (Danke, mache ich)			87 (67,4)
Installation von Blaulichtfiltern auf digitalen Geräten	Mobiles (Nicht notwendig)			42 (32,6)
	Einmal und mehr ausprobiert	14 (63,6) <sup>1</sup>	8 (50,0)	
	Bewertung der Wirksamkeit			
	Schlecht/eher schlecht	-	-	
	gut/eher gut bis neutral*	14 (63,7)	8 (50)	
Verdunklung des Schlafraums oder Schlafmaske	Einmal und mehr ausprobiert	20 (87,0)	13 (81,3)	
	Bewertung der Wirksamkeit			
	Schlecht/eher schlecht	-	-	
	gut/eher gut bis neutral	20 (86,9)	13 (81,3)	
	Mobiles (Danke, mache ich)			28 (82,3)
	Mobiles (Nicht notwendig)			6 (17,6)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt oder mit anderen zusammengelegt, <sup>1</sup> eine fehlende Angabe, <sup>2</sup> sechs fehlende Angaben, <sup>3</sup> fehlende Angaben; Lighting-Habits-Bögen n = 23, Probandinnen und Probanden mit Interventions-Studienhandys n = 21; N, n: Anzahl der Teilnehmenden oder Events

**Tabelle A 22 (Fortsetzung). Eigenangaben der Teilnehmenden zu den Lighting-Habits-Empfehlungen zu T3 (Befragungen und Studienhandys)**

Empfehlungen	Instrument / Antworten	Befragung zu Lighting-Habits zu Beginn von T3 (N = 23) n (%)	Befragung zu Feldphase T3 am Ende von T3 (N = 16) n (%)	Empfehlungs- Events (N = 21) n (%)
<b>Aufenthalt im Freien</b>				
Frühschicht (früh am Tag)	Einmal und mehr ausprobiert	20 (87,0)	11 (68,8)	
	Bewertung der Wirksamkeit gut/eher gut bis neutral*	19 (82,6)	11 (68,8)	
	Mobiles (Danke, mache ich)			42 (86,0)
	Mobiles (Nicht notwendig)			6 (14,0)
Wochenende vor Frühschicht (früh am Tag)	Einmal und mehr ausprobiert	18 (78,3)	11 (68,8)	
	Bewertung der Wirksamkeit Schlecht/eher schlecht gut/eher gut bis neutral*	-	-	
		20 (78,3)	11 (68,8)	
		12 (70,6) <sup>2</sup>	5 (41,7) <sup>3</sup>	
Spätschicht (eher am späteren Tag)	Einmal und mehr ausprobiert			
	Bewertung der Wirksamkeit Schlecht/eher schlecht gut/eher gut	-	-	
		12 (70,6)	5 (41,7)	
	Mobiles (Danke, mache ich)*			7 (78,0)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt oder mit anderen zusammengelegt, <sup>1</sup> eine fehlende Angabe, <sup>2</sup> sechs fehlende Angaben, <sup>3</sup> vier fehlende Angaben; Lighting-Habits-Bögen n = 23, Probandinnen und Probanden mit Interventions-Studienhandys n = 21; N, n: Anzahl der Teilnehmenden oder Events



**Tabelle A 23. Dauer des Aufenthalts unter Tageslicht im Empfehlungszeitraum (in h:mm) mittels LightWatcher<sup>1</sup> nach Schichtart in Lighting-Habits-Gruppe und Vergleichsgruppe in T2 und T3**

Zeit ≥ 1000 lx (in h)	Schichtart	T2				T3			
				Anteil Profile mit geringem Tageslicht <sup>2</sup>	Dauer unter Tageslicht <sup>3</sup>			Anteil Profile mit geringem Tageslicht <sup>2</sup>	Dauer unter Tageslicht <sup>3</sup>
		n	m	m (%)	GM (95%-KI)	n	m	m (%)	GM (95%-KI)
Vergleichsgruppe mit LH-Intervention	Frühschicht	15	26	17 (65,4)	1:17 (0:29 – 3:24)	14	30	23 (76,7)	2:32 (1:07 – 5:45)
	Spätschicht	7	16	11 (68,8)	0:47 (0:16 – 2:22)	*	*	*	*
Vergleichsgruppe ohne LH- Intervention	Frühschicht	11	20	12 (60,0)	0:53 (0:13 – 3:31)	11	15	11 (73,3)	0:29 (0:02 – 6:27)
	Spätschicht	6	12	10 (83,3)	*	7	16	10 (62,5)	0:42 (0:07 – 2:43)

\* Gruppen mit weniger als fünf Personen werden nicht dargestellt oder mit anderen zusammengelegt, <sup>1</sup> Tageslicht abgeleitet aus Beleuchtungsstärke > 1000 lx mit Glättung über je 31 Zeitpunkte (5 Minuten), Betrachtung des Empfehlungszeitraumes zwischen 12:00 und 18:00 Uhr; <sup>2</sup> weniger als 5 Minuten Tageslicht; <sup>3</sup> berechnet für Teilnehmende mit mehr als 5 Minuten Tageslicht; <sup>4</sup> nicht schätzbar aufgrund von zu wenigen Profilen; GM: geometrischer Mittelwert, 95%-KI: 95%-Konfidenzintervall, n: Anzahl Personen, m: Anzahl Lichtprofile

## 8.7 Best Practice: Studienbegleitende lichttechnische Messungen

- Beschreibung der Räumlichkeiten und deren Merkmale sowie Nutzung
  - Angaben zur Nutzungsart allgemein
  - Raumfläche und Raumhöhe, Reflexionseigenschaften von Wänden, Decke, Böden
  - Angaben zur Tageslichtsituation
  - tägliche Nutzungszeit, Schichtzeiten, Schichtsystem
- Beschreibung der Arbeitsplätze (Steh-/Sitzarbeitsplätze, arbeitsplatzbezogene Beleuchtung, typische Tätigkeiten, Besonderheiten (z.B. hohe Sehanforderungen, Farbabmusterung, Schutzausrüstung), Hauptarbeitsbereiche und Blickrichtungen während der Tätigkeiten und Auswahl eines typischen Arbeitsplatzes als Referenzarbeitsplatz
- Angaben zur Nutzergruppe (Alter, Nutzungsverhalten, Besonderheiten)
- Beschreibung der Beleuchtungsanlage (Allgemeinbeleuchtung und arbeitsplatzbezogene Beleuchtung):  
Leuchtentyp, Anordnung und Montagehöhe der Leuchten im Raum, Lichtstrom, Lichtstärkeverteilung (LVK) Abstrahltyp und Spektralverteilungen für ähnlichste Farbtemperatur der Lichtquellen-Komponenten (Lichtfarbe)
- Angaben zur Automation (Steuerung/Regelung) der Beleuchtungsanlage und deren Funktionsumfang:
  - Dimmung vom Lichtstrom: Dimmstufen/stufenlos/Variationsbereich
  - Änderung der Lichtfarbe: Variationsbereich, Stufungen/stufenlos, Kopplung an Lichtstrom oder unabhängige Variation,
  - Tageslichtabhängigkeit
- Beschreibung von eingesetzten Messgeräten (Typ, Bezeichnung, Hersteller, Kalibrierung) und der Messmethodik (Messgrößen, Messgeometrie, Messintervall, Messkonzept)
- Charakterisierung der Beleuchtungsanlage:  
Messung mit definierter Messgeometrie und Messmethodik am Referenzarbeitsplatz unter Ausschluss von Tageslicht bei Variation der Leuchtenparameter bezüglich Lichtstrom, Lichtfarbe und Lichtverteilung, ohne und in Kombination mit der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung, wenn diese individuell zugeschaltet werden kann, bei zeitgleicher Messung an einem Globalmessplatz (definierter Messort im Raum oberhalb der Arbeitsplätze und unterhalb der Allgemeinbeleuchtung, Ausrichtung der vertikalen Messebene in die Raumtiefe)
- Charakterisierung der Arbeitsplätze im Raum:  
Messung mit definierter Messgeometrie und Messmethodik an allen Arbeitsplätzen im Untersuchungsbereich (an einer repräsentativen Auswahl von Arbeitsplätzen bei identischem Aufbau der Arbeitsplätze) unter Tageslichtausschluss bei einer definierten Beleuchtungssituation (Lichtstrom, Lichtfarbe und Lichtverteilung), ohne und in Kombination mit der arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung und Anbindung der mittleren Messwerte  $\pm$  Standardabweichung an die Messergebnisse am Referenzarbeitsplatz (typischer Arbeitsplatz im Arbeitsbereich), zeitgleiche kontinuierliche Messungen am Globalmessplatz zur Überwachung der Beleuchtungsanlage
- versuchsbegleitende kontinuierliche Messungen am Globalmessplatz zur Beschreibung von Beleuchtungsparametern, dem Tageslichteintrag und zur Schätzung der mittleren Messwerte für die Arbeitsplätze, Wartungsinformationen, Nutzerverhalten, Kontrolle geplanter zeitlicher Verläufe
- Die Steuerwerte der Beleuchtungsanlage für Lichtleistung (Lichtstroms  $\Phi$  in %) und Lichtfarbe (CCT in K), lassen sich in einem bestimmten Verhältnis in den Messwerten am Globalmessort abbilden. Daraus können bei begleitenden kontinuierlichen Messungen anhand der Globalmesswerte sowohl die Steuerwerte der Beleuchtungsanlage rekonstruiert als auch die Messwerte an den Arbeitsplätzen geschätzt werden.
- Nutzung von Sensorsignalen der Beleuchtungsautomation im Innen- und Außenbereich als redundante Beschreibung und zur Überwachung der Automation

## Danksagung

Wir möchten unseren herzlichen Dank an alle aussprechen, die zur Durchführung dieser Studie beigetragen haben. Besonderer Dank gilt den Teilnehmerinnen und Teilnehmern, die bereitwillig ihre Zeit und ihre Daten zur Verfügung gestellt haben. Ohne ihre engagierte Mitwirkung wäre diese Forschung nicht möglich gewesen. Wir danken auch dem Betriebsrat, den Projektkoordinatoren und den Ansprechpartnern vor Ort für die konstruktive Zusammenarbeit und Unterstützung während der gesamten Projektdauer.

Ein besonderer Dank geht an unser Team, das uns im Feld und im Datenmanagement unterstützt hat. Wir möchten insbesondere den Einsatz von Claudia Lechtenfeld, Sandra Zilch-Schöneweis, Azadeh Rahimighazykalayeh und Monika Kobek bei der Felddurchführung sowie Christoph Nöllenheim und Anna van den Boom für das Datenmanagement hervorheben. Für die Unterstützung bei der vorbereitenden Planung und Durchführung im Feld, die für uns von großem Wert war, möchten wir außerdem Dr. Claudia Terschüren, Dr. Maria Lehmann, Anna Lehmann, Franziska Labe und Clara Steinberg danken. Für die sehr gute Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Entwicklung der Studienhandys möchten wir uns bei Dr. Anna Arlinghaus und Dr. Sabine Wahl bedanken. Unsere Treuhänderinnen Monika Pauli und Birte Biester waren immer ansprechbar, für ihre wertvolle Unterstützung möchten wir uns ebenfalls herzlich bedanken.