

NICHT-VISUELLE LICHTWIRKUNG IM FAHRZEUGINTERIEUR

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

Dissertation

von

M. Sc. Arvid Niemeyer

Geboren in:	München
Tag der mündlichen Prüfung:	13.02.2023
Hauptreferent:	Prof. Dr. Cornelius Neumann
Korreferent:	Prof. Dr. Wilhelm Stork

I DANKSAGUNG

Ende 2017 begann ich diese Arbeit im Rahmen eines Promotionsprojektes zwischen der Audi AG und dem lichttechnischen Institut des KIT. Damals wusste ich noch nicht, welche spannenden und motivierenden, aber auch zähen Phasen mich im Laufe der Jahre erwarten würden. Auf meinem Weg unterstützten und motivierten mich viele Menschen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr. Cornelius Neumann, meinem Doktorvater, für die Betreuung meiner Arbeit bedanken. Vielen Dank für deine offene, vertrauensvolle und vor allem herzliche Art, welche mir das Arbeiten an der Dissertation immens erleichtert hat. Danke auch für das Anziehen der Zügel und den dadurch entstandenen Motivationsschub zum Endspurt meiner Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr. Wilhelm Stork für die Übernahme des Korreferendariats und die in diesem Zuge erfolgte fachliche Diskussion bedanken.

Besonderer Dank gilt Friedrich-Uwe Tontsch und Michael Weng. Herzlichen Dank für eure Unterstützung, die ideenreichen Gespräche sowie den kontinuierlichen Austausch über die Dauer meiner Arbeit hinweg. Friedrich, ohne unsere geistreichen Kaffeepausen und kreativen Gedankenspiele, bei denen wir überlegt haben, was wir noch alles mit Licht anstellen können, hätte ich längst nicht so viel Spaß am Forschen und Entwickeln gehabt. Danke! Michael, als

DANKSAGUNG

Leidensgenosse haben mich unsere Selbsthilferunden immer sehr beruhigt. Danke auch für deinen fachlichen Input aus der Sicht eines Psychologen.

In diesem Zuge möchte ich mich auch bei Florian Riedmayr und Stephan Berlitz bedanken, welche mir als Vorgesetzte bei der Audi AG die nötigen Freiräume zum Forschen an meinem Projekt ermöglichten. Vielen Dank für Eure Unterstützung und das in mich gesetzte Vertrauen. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen aus der Entwicklung Innenlicht und Vorentwicklung Licht, die mich in ihre Mitte aufgenommen haben und mich stets dazu motiviert haben weiter am Ball zu bleiben. Danken möchte ich auch allen anderen Kollegen und Kolleginnen, die mich bei der Umsetzung der Inhalte dieser Arbeit unterstützt haben.

Christian, Melli und Simon, euer Feedback hat diese Arbeit an der ein oder anderen Stelle mit Sicherheit deutlich verständlicher gemacht. Daher vielen Dank für eure Korrekturen und eure wertvollen Hinweise.

Abschließend möchte ich mich ganz besonders bei meiner Freundin Amelie sowie meinen Eltern Dagmar und Reiner bedanken. Ihr standet mir nicht nur während der Dissertation, sondern auch während meines gesamten vorherigen Studiums zur Seite und habt mir stets Rückhalt gegeben.

II ZUSAMMENFASSUNG

Licht dient Menschen nicht nur dazu ihre Umgebung wahrzunehmen, sondern beeinflusst auch deren Schlaf-Wach-Rhythmus, Wohlbefinden, Konzentrations- und Leistungsfähigkeit. In dieser Arbeit wird daher untersucht, ob sich die nicht-visuelle Lichtwirkung auch im Kontext des Automobils bzw. im Fahrzeuginnenraums hervorruufen lässt. Dies geschieht unter Berücksichtigung automobilspezifischer Einschränkungen. Die zentrale Fragestellung der Arbeit lautet daher: Kann Licht seine aktivierende Wirkung bei einer morgendlichen Fahrt entfalten und wie hängt diese Wirkung vom Raumwinkel der Lichtquelle ab?

Um diese Frage zu beantworten, wurden im Rahmen der Arbeit drei Probandenstudien durchgeführt. Hierbei wurde jeweils die Wirkung dreier Lichtszenarien (*Leuchte aus*: 12 oder 5 lx, 2200 K; *kleine Leuchte*: 200 lx, 6500 K, 0,05 sr; *große Leuchte*: 200 lx, 6500 K, 0,44 sr) auf psychologische, leistungsbezogene und physiologische Parameter von Probanden untersucht. Die Lichtexpositionszeit am Morgen oder Vormittag lag zwischen 35 und 90 Minuten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die subjektive Müdigkeit der Probanden in der ersten Studie signifikant positiv durch helles Licht beeinflusst werden konnte. In den folgenden Studien ließ sich dieser Effekt allerdings nicht replizieren. Leistungsbezogene und physiologische Parameter konnten in keiner der Studien signifikant durch Licht

beeinflusst werden. Abseits der Blendung hatte der Raumwinkel der Lichtquelle keinen Einfluss auf nicht-visuelle Effekte. Bei gleicher Beleuchtungsstärke am Auge wurde die kleine Lichtquelle störender als die große wahrgenommen.

Nutzungsverhalten, Blendung und Bauraum wurden in dieser Arbeit als limitierende Faktoren für Expositionszeit/-dauer, Beleuchtungsstärke und Raumwinkel herangezogen. Gelten diese Einschränkungen auch in Zukunft, so weisen die Ergebnisse darauf hin, dass es nicht zielführend ist eine Lichtquelle zum Auslösen nicht-visueller Effekte ins Fahrzeuginterieur zu integrieren.

III ABSTRACT

Light not only enables humans to perceive their surroundings, but also influences their sleep-wake-rhythm, well-being, concentration and performance. This thesis therefore investigates whether these non-visual effects of light can also be evoked in an automotive context or the vehicle interior. This is done while considering automotive specific restraints. Therefore, the central question of this thesis is: Can light develop its activating effect during a morning drive and how does this effect depend on the solid angle of the light source?

To answer this question, three subject studies were conducted as part of this thesis. In each study, the effect of three light scenarios (*luminaire off*: 12 or 5 lx, 2200 K; *small luminaire*: 200 lx, 6500 K, 0,05 sr; *large luminaire*: 200 lx, 6500 K, 0,44 sr) on psychological, performance related and physiological parameters of the subjects was investigated. Light exposure time in the morning or forenoon ranged from 35 to 90 minutes.

The results of the first study show significantly positive effects on subjects perceived fatigue while exposed to bright light. However, this effect could not be replicated in the subsequent studies. Performance-related and physiological parameters could not be significantly influenced by light in any of the studies. Apart from glare, the solid angle of the light source had no influence on non-visual effects.

ABSTRACT

For the same illuminance at the eye, the small light source was perceived as more disturbing than the large one.

In this work, user behavior, glare and installation space were used as limiting factors for exposure time/duration, illuminance and solid angle. If these limitations continue to apply in the future, the results indicate that it is not practical to integrate a light source into a vehicles interior to trigger non-visual effects.

IV INHALTSVERZEICHNIS

I	Danksagung	I
II	Zusammenfassung	III
III	Abstract	V
IV	Inhaltsverzeichnis	VII
1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel der Arbeit	5
2	Grundlagen nicht-visueller Effekte	7
2.1	Eine dritte Art von Photorezeptor	10
2.2	Beteiligte Hirnregionen	13
2.3	Differenzierung circadianer und unmittelbarer Lichtwirkung	17
2.3.1	Schlaf-Wach-Rhythmus und circadiane Lichtwirkung	17
2.3.2	Unmittelbare Lichtwirkung	20
2.3.3	Operationalisierung nicht-visueller Effekte	22
2.4	Einfluss lichttechnischer & zeitlicher Parameter auf nicht-visuelle Effekte	26
2.4.1	Beleuchtungsstärke	26
2.4.2	Monochromatisches Licht	30
2.4.3	Polychromatisches Licht	34

2.4.4	Räumliche Verortung	36
2.4.5	Expositionsdauer	38
2.4.6	Expositionszeitpunkt	40
2.5	Studien mit Bezug zum Automobil	42
3	Diskussion möglicher Forschungslücken & Anwendungsfälle	47
3.1	Einordnung des wissenschaftlichen Status quo	47
3.1.1	Differenzierung zwischen Tag & Nacht	51
3.1.2	Erfassen lichttechnischer Parameter	54
3.2	Einfluss des Raumwinkels einer Lichtquelle auf nicht-visuelle Effekte	57
3.3	Use Cases für nicht-visuelle Effekte im Automobilbereich	64
4	Probandenstudien	67
4.1	Einfluss des Raumwinkels auf die nicht-visuelle Lichtwirkung	68
4.1.1	Forschungsschwerpunkt	68
4.1.2	Hypothesen	70
4.1.3	Methode	73
4.1.4	Ergebnisse	91
4.1.5	Diskussion	106
4.1.6	Fazit	114
4.2	Wiederholung der Vorgängerstudie mit angepasstem Konzept	116
4.2.1	Forschungsschwerpunkt	116

4.2.2	Hypothesen	117
4.2.3	Methode	119
4.2.4	Ergebnisse	125
4.2.5	Diskussion	129
4.2.6	Fazit	136
4.3	Nicht-visuelle Lichtwirkung in einem Fahr Simulator	137
4.3.1	Forschungsschwerpunkt	137
4.3.2	Hypothesen	139
4.3.3	Methode	142
4.3.4	Ergebnisse	152
4.3.5	Diskussion	160
4.3.6	Fazit	169
5	Zusammenfassung & Ausblick	173
5.1	Zusammenfassung	173
5.2	Ausblick	178
V	Literaturverzeichnis.....	181
VI	Abbildungsverzeichnis.....	214
VII	Tabellenverzeichnis	225
VIII	Anhang.....	231
	Anhang A: Abkürzungen	231
	Anhang B: Ergänzungen zur ersten Probandenstudie.....	233

INHALTSVERZEICHNIS

Anhang C: Ergänzungen zur zweiten Probandenstudie	279
Anhang D: Ergänzungen zur dritten Probandenstudie	283

Kapitel 1

EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Von unterschiedlichsten Automobilherstellern vorgestellte Konzeptfahrzeuge sollen den Kunden von heute einen Ausblick auf die Mobilität von morgen geben. Hierbei werden gezielt aktuelle Megatrends aufgegriffen, um den Kunden näherzubringen, wie diese Strömungen das Design sowie das Nutzungsverhalten zukünftiger Fahrzeuge beeinflussen. Als Beispiel hierfür können Themen wie Elektromobilität, Connectivity oder autonomes Fahren herangezogen werden. Beobachten lässt sich deren Einfluss in Konzeptfahrzeugen wie dem 360c von Volvo (2018), dem Vision AVTR von Mercedes (2020) oder dem Urbansphere Concept von Audi (2022, siehe Abbildung 1.1)

Während Elektromobilität eine nachhaltigere Fortbewegung auf Basis erneuerbarer Energien verspricht und Connectivity eine nahtlose Verbindung zu Smartphone und Co. ermöglicht, soll autonomes Fahren den Passagieren zusätzliche, freier gestaltbare Zeit zu Verfügung stellen. Der Fahrer ist nicht mehr durchgehend mit dem Lenken des Fahrzeugs beschäftigt und kann sich dadurch auch anderen

Tätigkeiten widmen, wie z.B. dem Lesen von Nachrichten, welche den individuellen Bedürfnissen entsprechen. Damit einhergehend verschiebt sich die Aufmerksamkeit der Passagiere von der Fahrzeugaußenwelt, dem Straßenverkehr, verstärkt zum Fahrzeuginnenraum, dem Interieur.



Abbildung 1.1: Blick in den Innenraum des Audi Urbansphere Concept [1]

Durch diese Verschiebung der Aufmerksamkeit wandeln sich auch die Anforderungen an das Fahrzeuginterieur. Es wird zu einem mobilen Arbeits- und Lebensraum transformiert in dessen Zentrum Komfort eine noch wichtigere Rolle als heute einnimmt. Hierbei weicht eine auf den Fahrer ausgerichtete Orientierung des Cockpits einklappbaren Lenkrädern, Sitzen mit Liegefunktion,

hochintegrierten Bedienoberflächen und hochwertigen Materialien, um flexibel auf die individuellen Bedürfnisse der Passagiere reagieren zu können. Dadurch wird bewerkstelligt, dass das Fahrzeug situationsabhängig ein produktives oder entspannendes Ambiente darstellen kann. Neben den zuvor genannten Komponenten gibt es jedoch noch ein weiteres Element, welches die Vision von einem mobilen Arbeits- und Lebensraum im Fahrzeuginterieur vorantreiben kann: **Licht**.

Licht im Interieur erfüllt in den meisten Fahrzeugen eine einfache, aber grundlegende Aufgabe. Bei Dunkelheit ermöglichen künstliche Lichtquellen, wie z.B. Lese-, Fußraum- oder Kofferraumleuchten, den Fahrzeuginsassen die visuelle Wahrnehmung ihrer Umgebung und damit Orientierung im Innenraum. Licht ermöglicht jedoch nicht nur das Sehen als solches, sondern beeinflusst auch weitere physiologische und psychologische Prozesse des menschlichen Körpers. So kann Licht zum Beispiel Einfluss auf die Körpertemperatur, die Herzschlagfrequenz oder die Hirnaktivität nehmen [2–4]. Zudem spielt Licht eine wichtige Rolle bei der Synchronisation der inneren Uhr bzw. des circadianen Rhythmus und kann zudem die kognitive Leistungsfähigkeit beeinflussen [5, 6]. In der englischsprachigen Literatur werden diese lichtinduzierten Effekte häufig als *non-image-forming* oder *non-visual effects of light* bezeichnet (siehe z.B. [7] oder [8]). Frei übersetzt werden diese auf Licht zurückzuführende Effekte im weiteren Verlauf der Arbeit als nicht-visuelle Effekte bezeichnet. In der Vergangenheit befasste sich ein Großteil der Forschung zu nicht-visuellen Effekten mit den chronobiologischen und

neurophysiologischen Grundlagen. Dabei wurden Laborstudien unter streng kontrollierten Rahmenbedingungen durchgeführt (z.B. nur männliche Teilnehmer [2]), um die zum Verständnis nicht-visueller Effekte notwendige Wissensbasis zu schaffen. Inzwischen wird der Einfluss nicht-visueller Effekte aber auch in Feldstudien analysiert, um deren praktischen Nutzen in Alltagsituationen zu untersuchen. Dazu zählen in Büros oder Schulklassen durchgeführte Studien, welche den positiven Einfluss von Licht auf die subjektive Müdigkeit und kognitive Leistungsfähigkeit nachweisen konnten [9, 10]. Als weiteres praktisches Beispiel kann das gezielte hervorrufen nicht-visueller Effekte zur Behandlung von Winterdepression (SAD; engl. *seasonal affective disorder*) herangezogen werden [11].

In Bezug auf das Automobil und dessen Interieur gibt es Lichtelemente deren Sinn und Zweck ebenfalls über das bloße Ermöglichen von Sehen bei Dunkelheit hinausgeht. Gezielt gesetztes Ambientelicht wird als Designelement verwendet, welches nicht nur die subjektive Attraktivität des Fahrzeuginnenraums steigert, sondern den Passagieren auch ein gesteigertes Gefühl von Sicherheit verleiht [12]. Zum Auslösen der zuvor genannten nicht-visuellen Effekte ist Ambientelicht allerdings nicht geeignet. Ambientelemente sind meist bunt und verhältnismäßig dunkel, wohingegen nicht-visuelle Effekte durch bläuliches und helles Licht hervorgerufen werden (siehe z.B. [13] oder [14]). Der Einfluss nicht-visueller Effekte auf personenbezogene Merkmale, wie beispielsweise die Müdigkeit oder kognitive Leistungsfähigkeit, ist für die lichttechnische Gestaltung des Fahrzeuginnenraums allerdings von besonderem Interesse. Durch Anpassung

von Helligkeit und Farbtemperatur bietet Licht die Möglichkeit flexibel auf die individuellen Bedürfnisse der Passagiere zu reagieren, um so beispielsweise mit hellem, kaltweißem Licht ein aktivierendes, produktives Ambiente zu schaffen. Hinsichtlich nicht-visueller Effekte und der Transformation des Automobils von einem reinen Fortbewegungsmittel zu einem mobilen Arbeits- und Lebensraum stellt sich daher die allgemein formulierte Frage:

Können die bisher aus der Wissenschaft bekannten Erkenntnisse zur gezielten Anregung nicht-visueller Effekte auch auf das Automobil übertragen werden?

1.2 ZIEL DER ARBEIT

Die zuvor genannte Fragestellung soll im Rahmen dieser Arbeit analysiert, detailliert und beantwortet werden. Hierzu wird sie in Teilfragen und -probleme unterteilt, welche in den folgenden Kapiteln erörtert werden.

Zu Beginn der Arbeit wird eine Literaturanalyse durchgeführt, welche auf den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen zu nicht-visuellen Effekten beruht. Die Betrachtung erfolgt dabei losgelöst vom Automobil. Hierdurch soll eine themenunabhängige Wissensgrundlage geschaffen werden, welche zum allgemeinen Verständnis nicht-visueller Effekte beitragen soll.

Anschließend soll die zuvor recht allgemein formulierte Fragestellung eingeschränkt sowie der Forschungsschwerpunkt der Arbeit präzisiert werden. Hierzu werden die im Theorieteil beschriebenen Erkenntnisse analysiert, um mögliche Forschungslücken bzw. -defizite in der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion hervorzuheben. Zusätzlich werden potentielle Anwendungsfälle für nicht-visuelle Lichteffekte im Fahrzeuginterieur erarbeitet, um den Untersuchungsschwerpunkt klarer zu definieren. Dies geschieht unter Berücksichtigung diverser Einschränkungen, welche sich durch das Automobil und dessen Nutzungsverhalten ergeben.

Inwiefern sich der im vorherigen Schritt erarbeitete Anwendungsfall von der Theorie in die Praxis übertragen lässt, soll mit Hilfe diverser Probandenstudien untersucht werden. Hierzu werden aufeinander aufbauende Studienkonzepte entwickelt, welche den aktuellen Forschungsstand sowie die zuvor definierten Rahmenbedingungen berücksichtigen. Die dabei erhobenen Daten werden auf Basis anerkannter statistischer Methoden analysiert und bewertet.

Basierend auf den Erkenntnissen, welche während den Probandenstudien gesammelt wurden, soll am Schluss der Arbeit ein Ausblick zu nicht-visuellen Effekten im Automobil und möglichen zukünftigen Forschungsschwerpunkten gegeben werden.

Kapitel 2

GRUNDLAGEN NICHT-VISUELLER EFFEKTE

Licht ermöglicht es Menschen ihre Umgebung zu sehen und mit ihr zu interagieren. Durch die Pupille gelangt Licht ins Innere der Augen und fällt dort auf die Netzhaut, welche die photosensitiven Sinneszellen enthält. Dort werden die auf Stäbchen und Zapfen treffenden Photonen mit Hilfe von Opsinen in elektrische Signale umgewandelt [15], welche zur Weiterverarbeitung über retinale Ganglienzellen an den visuellen Cortex des Gehirns weitergeleitet werden [16, 17].

Lange wurde der Einfluss von Licht auf den Menschen primär im Rahmen der visuellen Wahrnehmung betrachtet. Mit der Entdeckung eines weiteren von den Augen bzw. von der Netzhaut ausgehenden Pfades zu Signalverarbeitung änderte sich diese Sichtweise jedoch. Moore et al. konnten 1972 bei Ratten nachweisen, dass retinale Projektionen von einer kleinen Teilpopulation retinaler Ganglienzellen über den retinohypothalamischen Trakt (RHT) an den suprachiasmatischen Kern (engl: *suprachiasmatic nucleus*; SCN) des Gehirns weitergeleitet werden [18, 19]. Der SCN ist der Schrittmacher des circadianen Rhythmus, wobei die circadiane Rhythmik biologische Prozesse mit einer ca. 24-stündigen Periodenlänge beschreibt [20, 21].

Darunter fallen der Schlaf-Wach-Rhythmus, die Sekretion von Hormonen, die Körpertemperatur oder die kognitive Leistungsbereitschaft [22–24]. Spätere Untersuchungen konnten nachweisen, dass der RHT durch Licht aktiviert wird und Licht somit Einfluss auf die Synchronisation des circadianen Rhythmus nehmen kann [25–27].

Erste Zusammenhänge zwischen Licht und dessen Wirkung auf die circadiane Rhythmik des Menschen wurden 1980 gefunden. So konnten Lewy et al. nachweisen, dass die nächtliche Sekretion des Hormons Melatonin durch Licht unterdrückt wird [28]. Melatonin hängt mit dem Schlaf-Wach-Rhythmus zusammen und hat eine ermüdende Wirkung auf den menschlichen Körper [29], die sich durch veränderte Hirnaktivität [30], niedrigere Körpertemperatur sowie geringere subjektive Wachheit [31, 32] bemerkbar macht. Melatonin wird in der Zirbeldrüse des Gehirns gebildet, wohingegen dessen Ausschüttung über den zuvor erwähnten SCN gesteuert wird [33, 34]. Anschließend konnten weitere nicht-visuelle Effekte aufgedeckt werden. Durch Messungen der Körpertemperatur und des Cortisolspiegels konnten Czeisler et al. (1986) nachweisen, dass helles Licht am Abend die circadiane Phasenlage verschiebt [5]. Nächtliche Lichtexposition machte sich bei Badia et al. (1991) durch geringere subjektive Müdigkeit sowie per Elektroenzephalographie (EEG) gemessene erhöhte Wachheit bemerkbar [2]. Ähnliche Effekte von Licht auf Körpertemperatur und Hirnaktivität konnten Cajochen et al. (1992) oder Boivin et al. (1996) aufzeigen [35, 36]. Die genaue Beziehung zwischen Ursache und Wirkung bzw. Licht und nicht-visueller Effekte blieb aber weiterhin offen und ist seither Gegenstand der Forschung.

Um zu verstehen, wie Licht Menschen abseits der visuellen Wahrnehmung beeinflusst, wird in diesem Kapitel die Wirkungskette betrachtet, welche nicht-visuellen Effekten zugrunde liegt (vgl. Abbildung 2.1). Im ersten Unterkapitel wird das aus den Augen und dem Gehirn bestehende verarbeitende System zur Signalerfassung, -weiterleitung und -verarbeitung beleuchtet. Nachfolgend werden einige Ausgangsgrößen bzw. Ausprägungen nicht-visueller Effekte sowie Methoden zu Messung selbiger beschrieben. Anschließend werden Eingangs- und Ausgangsgrößen verknüpft, indem erläutert wird, wie diverse lichttechnische und zeitliche Parameter die Ausprägung nicht-visuelle Effekte beeinflussen. Studien mit Bezug zum Automobil werden dabei gesondert betrachtet.

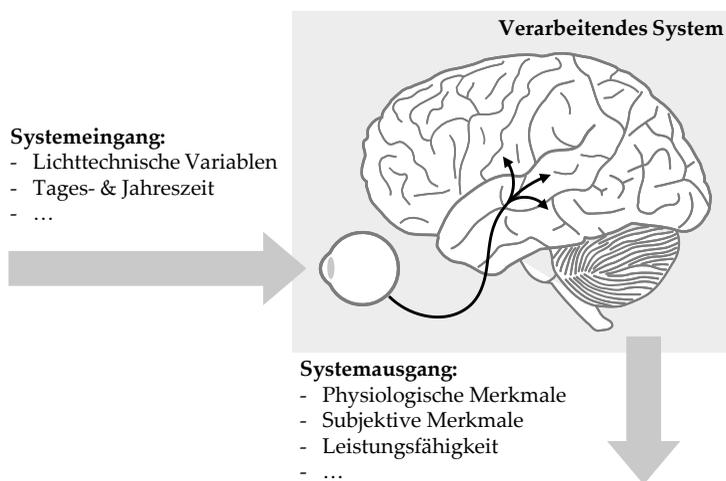


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Wirkungskette nicht-visueller Lichteffekte mit Systemeingang, verarbeitendem System (Auge und Gehirn) sowie Systemausgang

2.1 EINE DRITTE ART VON PHOTOREZEPTOR

In der zuvor beschriebenen Wirkungskette bilden die Augen die Schnittstelle zwischen der Außenwelt und dem menschlichen Körper. Würde das zu Beginn beschrieben, gängige Modell zur visuellen Wahrnehmung auf den von Moore et al. entdeckten, lichtempfindlichen Pfad übertragen werden, so wären Stäbchen und Zapfen die Photorezeptoren, welche die circadiane Rhythmik beeinflussen. Dieser Rückschluss wurde jedoch von Takahashi et al. in Frage gestellt [37]. Unter monochromatischem Licht analysierten sie die spektrale Empfindlichkeit des circadianen Systems von Hamstern. Gemessen wurde diese anhand der lokomotorischen Aktivität, welche ein Merkmal des circadianen Rhythmus ist [38]. Die ermittelte Empfindlichkeitsverteilung zeigt ein Maximum bei ca. 500 nm und ähnelt damit dem Absorptionsspektrum von Rhodopsin, dem lichtempfindlichen Rezeptormolekül von Stäbchen [37]. Aufgrund seiner trägen Reaktion auf hohe Reizschwellen war die Antwort des photosensitiven Systems jedoch für Stäbchen untypisch [37, 39, 40]. Diese Beobachtung ließ vermuten, dass es eine weitere, bisher unbekannte Art von Photorezeptoren gibt, welche an der Synchronisation des circadianen Rhythmus beteiligt ist. Nachfolgende Studien bekräftigten diese Vermutung. Bei blinden Personen konnte beobachtet werden, dass Licht deren circadianen Rhythmus teilweise weiterhin beeinflusst [41, 42]. Ähnliche Effekte zeigten sich bei genmodifizierten Mäusen denen Stäbchen und Zapfen fehlten [43–45]. Bei Säugetieren, denen die Augen jedoch gänzlich fehlten, konnten diese Effekte nicht beobachtet werden [44, 46].

Mit Melanopsin entdeckten Provencio et al. ein bisher unbekanntes Photopigment in der Haut, im Gehirn und in den Augen von Fröschen [47]. Melanopsin konnte auch in retinalen Ganglienzellen von Säugetieren nachgewiesen werden, deren Morphologie und Verteilung große Ähnlichkeit zu den eingangs beschriebenen retinalen Ganglienzellen des RHT aufweisen [48–53]. Diese Beobachtungen sowie die Tatsache, dass bei genmodifizierten Mäusen mit eliminiertes Melanopsinproduktion die phasenverschiebende Wirkung von Licht geringer ausfällt [54, 55], deuten auf die tragende Rolle von Melanopsin und damit melanopsinhaltiger Ganglienzellen in der circadianen Rhythmik hin [56]. Klassische Photorezeptoren scheinen nicht-visuelle Effekte nichtsdestotrotz ebenfalls zu beeinflussen [57–59]. Mit Hilfe isolierter Netzhautproben von Ratten untersuchten Berson et al., ob die den SCN beeinflussenden retinalen Ganglienzellen selbst photosensitiv sind [60]. Hierbei zeigte sich, dass die Zellen durch Licht stark depolarisieren und diese Reaktion selbst dann anhält, wenn der synaptische Einfluss von Stäbchen und Zapfen blockiert wird [60]. Infolgedessen werden diese Ganglienzellen als intrinsisch photosensitive, retinale Ganglienzellen bezeichnet (engl. *intrinsically photosensitive ganglion cells*; ipRGCs) [61].

IpRGCs können auf der gesamten Netzhaut gefunden werden, wobei ihre Dichte in Bereichen um die Fovea centralis höher als in der retinalen Peripherie ausfällt [62, 63]. Beim Menschen fällt die Dichte von ipRGCs im superioren Bereich der Netzhaut geringer aus als nasal, temporal oder inferior [63]. Insgesamt beläuft sich die Anzahl an ipRGCs auf der menschlichen Netzhaut auf ca. 4000 bis 9000 Stück,

sodass ipRGCs ca. 0,4 bis 0,8% der Gesamtpopulation retinaler Ganglienzellen darstellen [63–67]. Ein weiteres Merkmal von ipRGCs ist die Fläche der durch ihre Dendriten aufgespannten Felder, welche im Vergleich zu anderen Ganglienzellen deutlich größer ausfällt [62, 63]. Wird das Reaktionsverhalten von ipRGCs mit dem von Stäbchen und Zapfen verglichen, so gibt es auch hier Unterschiede. Stäbchen und Zapfen hyperpolarisieren als Antwort auf einen Lichtreiz [17], d.h. ihre Membranspannung wird negativer. Dahingegen depolarisieren ipRGCs, sodass ihr Membranpotential positiver wird [48, 60, 61]. Weiterhin reagieren ipRGCs nur träge auf Lichtreize und zeigen eine lang über die Reizdauer hinweg anhaltende Reaktion [60, 61, 68]. Weitere Unterschiede betreffen die spektrale Empfindlichkeit. Bei Stäbchen liegt die maximale spektrale Empfindlichkeit bei ca. 500 nm, während die von Zapfen je nach Typ (S, M oder L-Zapfen) bei ca. 420 nm, ca. 535 nm oder ca. 565 nm liegt [17]. In Abhängigkeit der Untersuchungsmethode zeigen ipRGCs eine maximale spektrale Empfindlichkeit bei ca. 460 - 480 nm [60, 62, 69–71].

Zusammengefasst ergibt sich folgendes Bild: Mit ipRGCs wurde eine dritte Art von Photorezeptoren entdeckt, welche mit Hilfe des Photopigments Melanopsin auf bläuliches Licht reagiert. Die Zellen reagieren nur träge auf Lichtreize und spielen eine Schlüsselrolle bei physiologischen Funktionen (z.B. Regulierung von Melatonin). Im Hinblick auf die eingangs beschriebene Wirkungskette nicht-visueller Effekte stellen ipRGCs eine wichtige Schnittstelle zwischen Umgebung und Körper dar. Über sie kann Licht Einfluss auf die circadiane Rhythmik und andere nicht-visuelle Effekte nehmen.

2.2 BETEILIGTE HIRNREGIONEN

Um die Wirkungskette nicht-visueller Effekte weiterzuverfolgen, werden im folgenden Abschnitt einige Hirnregionen inklusive deren Funktion beschrieben, welche direkt oder indirekt mit ipRGCs verknüpft sind.

Ein Hauptadressat der von ipRGCs ausgehenden Signale ist der SCN im Hypothalamus. Der SCN ist der wichtigste circadiane Schrittmacher von Säugetieren und nimmt eine tragende Rolle bei der Regulierung physiologischer Prozesse und Verhaltensweisen ein, welche den täglichen Rhythmus des Lebens bestimmen [21]. Darunter fallen die Regulierung der Körpertemperatur, die Hormonproduktion oder die Steuerung von Wachsamkeit sowie des Schlaf-Wach-Rhythmus [72–75]. Der SCN selbst besteht aus ca. 20 000 Neuronen, welche zeitgleich Signale abfeuern [76]. Die Rhythmik der an andere Körperregionen weitergegebenen Signale vermittelt dabei die Sonnenzeit [76]. Seiner Aufgabe als Taktgeber kommt der SCN dabei so robust nach, dass er selbst in isolierter Umgebung mit hoher Präzision weiterarbeitet [20]. In einer der ersten Studien zur Periodenlänge der circadianen Rhythmik konnte ohne externe Zeitgeber eine Periodenlänge von ca. 25 Stunden bei Menschen nachgewiesen werden [77]. Später stellte sich heraus, dass die frei laufende Periodenlänge bei ca. 24 Stunden liegt [78]. Zudem konnten unterschiedlich lange Intervalle bei Männern und Frauen beobachtet werden, wobei die circadiane Periodenlänge bei Frauen kürzer ausfällt [79]. Als effektiv arbeitender Zeitgeber passt der SCN seine frei laufende Rhythmik den

Umgebungsumständen an, indem Licht den SCN über ipRGCs und den RHT innerviert, sodass die Periodenlänge jeden Tag aufs Neue synchronisiert wird [80].

In seiner Funktion als Zeitgeber sendet der SCN Signale an Hirnregionen, welche sowohl inner- als auch außerhalb des Hypothalamus liegen [81]. Hierzu zählen der paraventriculäre Kern (PVN) und der dorsomediale Kern im Hypothalamus (DMH) [52]. Mittels einer indirekten Signalkaskade über den PVN beeinflusst der SCN die Rhythmik der Zirbeldrüse (engl. *pineal gland*; PG) und damit die Produktion und Ausschüttungsrate von Melatonin [82, 83]. Der über den Tagesverlauf variierende Melatoninspiegel signalisiert anderen Körperregionen die Tageszeit, welche dementsprechend ihre Aktivität anpassen [84, 85]. Bei Menschen steigt der Melatoninspiegel etwa zwei Stunden vor der üblichen Zubettgehzeit, um nachts auf einem erhöhten Niveau zu bleiben, bevor er ca. 3 Stunden vor dem Aufstehen wieder zu fallen beginnt [86, 87]. Wie zuvor beschrieben beeinflusst Melatonin die Körpertemperatur und signalisiert Schlaf-Wach-Phasen an den Körper. Die vom SCN gesteuerte Ausschüttung von Melatonin signalisiert dabei auch eine saisonale Komponente [88]. Kürzer werdende Tage und eine dadurch nachts länger anhaltende Melatoninausschüttung signalisieren dem Körper beispielsweise den Wintereinbruch [89]. Saisonale durch Melatonin erzeugte Effekte scheinen beim Menschen allerdings eine geringere Wirkung zu spielen, während sie bei anderen Säugetieren z.B. die Fortpflanzung beeinflussen können [89]. In der Wissenschaft ist der Melatoninspiegel als guter Marker der circadianen Rhythmik anerkannt [90, 91].

Eine weitere, primär durch indirekte SCN Signale beeinflusste Hirnregion ist der ventrolaterale präoptische Bereich (VLPO), bei dem die Signalkaskade über den zuvor erwähnten DMH verläuft [92]. Der VLPO beeinflusst die Schlafregulierung sowie den allgemeinen Erregungsgrad des zentralen Nervensystems, welcher sich durch Merkmale wie Wachheit, Wachsamkeit oder Reaktionsbereitschaft charakterisieren lässt [93]. Bei aktivem VLPO wird Schlaf gefördert, indem Aktivierungssysteme des Körpers unterdrückt werden, während bei inaktivem VLPO Aktivierung gefördert wird [94, 95]. Neben indirekten Signalen des SCN erhält der VLPO auch direkte Signale von ipRGCs, was darauf hindeutet, dass Licht eine besondere Rolle bei der Schlafregulation einnimmt [92, 96].

Über den DMH erhält auch der *Locus caeruleus* (LC) indirekte Signale des SCN [97]. Im LC wird Noradrenalin gebildet, welches als Neurotransmitter fungiert und eine aktivierende Wirkung auf den Sympathikus hat. Wird der Sympathikus aktiviert, so steigen Blutdruck und Herzschlagfrequenz, wodurch der Körper in erhöhte Leistungsbereitschaft versetzt wird. Bei Ratten konnte nachgewiesen werden, dass die Aktivität der LC-Neuronen einem circadianen Muster folgt, welches bei gestörter Verbindung zwischen LC und SCN nicht mehr zu beobachten war [98]. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass der LC eine Rolle bei circadianen Schwankungen von *Arousal* spielt [99]. *Arousal* wird später genauer erläutert.

Es gibt noch viele weitere Hirnregionen, welche direkte oder indirekte Signale von ipRGCs erhalten. Eine Auflistung aller potentiell beeinflussten Bereiche würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit

sprengen, weshalb nachfolgend nur ein paar weitere Beispiele aufgeführt werden. Direkte Signale erhalten beispielsweise das *Intergeniculate Leaflet* (IGL), der *Olivary Pretectal Nucleus* (OPN) oder die laterale Habenula (LHb) [52]. Das IGL wird mit der Aufbereitung photopischer und nicht-photopischer Informationen in Verbindung gebracht, welche für die circadiane Rhythmik relevant sind [100]. Dagegen spielt der OPN eine wichtige Rolle beim Pupillenreflex [101]. Die LHb wiederum dient als Schnittstelle, welche sensorische und erfahrungsabhängige Informationen integriert, um motorische und kognitive Prozesse zu regulieren [102]. Die Amygdala, ein Gebiet welches an emotionalen Prozessen beteiligt ist, erhält ebenfalls Projektionen von ipRGCs [52]. Sie könnte somit eine weitere Schraube des Systems nicht-visueller Effekte darstellen, indem sie die Wirkung von Licht auf Wachsamkeit und Stimmung verstärkt [103]. Eine umfangreichere Übersicht der durch ipRGCs beeinflussten Hirnregionen findet sich in [68] oder [7].

Zusammengefasst stehen ipRGCs entweder direkt oder indirekt mit einer Vielzahl von Hirnregionen in Verbindung, welche ein breites Spektrum menschlicher Verhaltensweisen beeinflussen. Hierzu zählen unter anderem die circadiane Rhythmik, Wachsamkeit und Reaktionsbereitschaft sowie *Arousal* oder aber auch Emotionen.

2.3 DIFFERENZIERUNG CIRCADIANER UND UNMITTELBARER LICHTWIRKUNG

Basierend auf ihrer Wirkung können nicht-visuelle Effekte in zwei übergeordnete Kategorien unterteilt werden. Zum einen sind dies Effekte, deren Wirkung sich primär im Rahmen der circadianen Rhythmik beobachten lassen (z.B. circadiane Phasenlage [104, 105]). Zum anderen gibt es unmittelbar während oder kurz nach der Lichtexposition auftretende Effekte, welche sich durch Änderungen physiologischer sowie psychologischer Parameter bemerkbar machen (z.B. subjektive Müdigkeit [2]). Wie sich später zeigen wird, können aber müssen diese Effekte nicht miteinander zusammenhängen.

2.3.1 SCHLAF-WACH-RHYTHMUS UND CIRCADIANE LICHTWIRKUNG

Wie bereits erwähnt zeigen sich beim Menschen tageszeitabhängige Schwankungen verhaltensbezogener und physiologischer Merkmale, welche mit der circadianen Rhythmik zusammenhängen. Darunter fallen die Ausschüttung von Melatonin und Cortisol, die Herzschlagfrequenz oder die Leistungsfähigkeit bei Aufgaben, welche ein hohes Aufmerksamkeitsniveau benötigen [29, 106–109]. Reguliert werden diese Schwankungen mitunter vom SCN, welcher tageszeitabhängige Anforderungen der Umwelt antizipiert und das Verhalten des Körpers entsprechend anpasst [110]. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben beträgt die freilaufende Periodenlänge der inneren Uhr ca. 24 Stunden. Dieser Rhythmus muss jedoch täglich an den natürlichen

Hell-Dunkel-Zyklus angepasst werden, der zwar ebenfalls einer Periodenlänge von ca. 24 Stunden folgt, aber geografischen und jahreszeitabhängigen Schwankungen unterliegt. Dieser Prozess ist unter dem Begriff *Entrainment* bekannt (siehe z.B. [110]). Läuft die innere Uhr nicht parallel zum Rhythmus der Umgebung, so machen sich bei physiologischen und psychologischen Prozessen Abweichungen zum tageszeitabhängigen Sollzustand bemerkbar, wodurch die Anforderungen der Umgebung nicht vollends erfüllt werden [111]. Diese Desynchronisation bezieht sich jedoch nicht nur auf umgebungsbedingte Anforderungen, sondern auch auf körpereigene Prozesse. Da der Körper über eine Vielzahl an Zeitgebern verfügt, die aber übergeordnet vom SCN reguliert werden, lässt sich bei freilaufendem Rhythmus eine Desynchronisation zwischen Körperregionen wie z.B. dem Herz, der Leber und der Niere beobachten [111, 112].

Mit Blick auf den Schlaf-Wach-Rhythmus spielt die circadiane Rhythmik eine wichtige Rolle. Richtig synchronisiert werden tagsüber unter alltäglichen Bedingungen Aktivität und Wachheit gefördert, während nachts der Schlaftrieb eine dominantere Rolle einnimmt [24]. Parallel dazu läuft der Schlafdruck als zweite Komponente, welche Einfluss auf den Schlaf-Wach-Rhythmus nimmt [113]. Der Schlafdruck ist ein homöostatischer, die körperlich bedingte Schläfrigkeit beschreibender Prozess, welcher mit zunehmender Dauer im Wachzustand steigt, um dann mit Schlafbeginn abzufallen [114]. Im regulären Zusammenspiel fördert die circadiane Rhythmik tagsüber Wachsamkeit, welcher der im Laufe des Tages stärker werdende Schlafdrucks entgegenwirkt. Nachts wird dann aufgrund des hohen

Schlafdrucks und des zeitabhängigen circadianen Schlaftriebs Schlaf eingeleitet. Desynchronisation dieses Zusammenspiels und damit einhergehende Störungen des Schlaf-Wach-Rhythmus können zu Beeinträchtigung von Wohlbefinden, Gesundheit und Leistung führen [24]. Als klassische Beispiele hierfür können Jetlag und Schichtarbeit herangezogen werden. Unter Jetlag leidende Personen können Probleme beim Schlafen, erhöhte subjektive Müdigkeit und verminderte kognitive Leistungsfähigkeit wahrnehmen [115]. Schichtarbeit abseits der natürlichen circadianen Rhythmik kann zu einer höheren Anfälligkeit für Unfälle und Verletzungen sowie zu negativen Auswirkungen auf die Gesundheit führen [116]. Zur richtigen Tageszeit verabreicht, kann mit Licht allerdings auch den negativen Effekten der Desynchronisation entgegengewirkt werden, indem die innere Uhr besser an die Anforderungen der Umwelt angepasst wird (z.B. zur Reduzierung von Jetlag [117]).

Die Phase der circadianen Rhythmik wird maßgeblich durch den Zeitpunkt, die Intensität und die spektrale Zusammensetzung eines Lichtreizes beeinflusst (siehe z.B. [118–120]). Dabei nimmt der Zeitpunkt der Lichtexposition eine besondere Rolle ein. Lichtexposition in der frühen Nacht kann zu einer Phasenverzögerung führen, während die circadiane Rhythmik durch Lichtexposition am frühen Morgen beschleunigt wird [118, 119, 121]. Phasenverschiebungen durch künstliches Licht können aber grundsätzlich am ganzen Tag auftreten [122]. Häufig verwendete Marker zur Ermittlung der Wirkung von Licht auf die circadiane Rhythmik und deren Phasenverschiebung sind der Melatoninkonzentration und die Körpertemperatur [5,

123]. Wie Eingangs angedeutet lässt sich der Einfluss von Licht auf diese oder ähnliche Marker häufig über einen längeren Zeitraum beobachten (siehe z.B. [121, 124]).

Beim Schlaf-Wach-Rhythmus müssen neben den zuvor genannten Punkten auch individuelle Merkmale, wie z.B. das Alter und der Chronotyp, berücksichtigt werden. Mit zunehmendem Alter beginnt die Wachphase bei Menschen beispielsweise früher [125]. Der Chronotyp wiederum beschreibt individuelle Präferenzen für Zeiten von Wachsamkeit und Schlaf [126]. So sind beispielsweise Frühaufsteher, im Allgemeinen als „Lerchen“ bekannt, am frühen Morgen aktiver und abends schneller müde. Im Gegensatz dazu sind Spätaufsteher bzw. „Eulen“ abends aktiver, schlafen jedoch morgens länger. Die individuelle Ausprägung des Chronotypen lässt sich mit Hilfe von subjektiven Fragebögen wie dem *Morningness-Eveningness Questionnaire* (MEQ) oder dem *Munich ChronoType Questionnaire* (MCTQ) ermitteln [126, 127]. Die dabei ermittelten Chronotypen spiegeln sich in physiologischen Parametern sowie der kognitiven Leistungsfähigkeit wider, da deren Maxima und Minima im Tagesverlauf je nach Chronotyp variieren [128, 129].

2.3.2 UNMITTELBARE LICHTWIRKUNG

Neben der zuvor beschriebenen, längerfristigen Wirkung von Licht auf die circadiane Rhythmik und den Schlaf-Wach-Rhythmus ruft Licht auch nicht-visuelle Effekte hervor, welche bereits während oder

kurz nach der Lichtexposition in Erscheinung treten. Im Englischen werden diese Effekte häufig als *acute effects of light* oder *acute alerting effects of light* bezeichnet, wenn explizit über die aktivierenden Eigenschaften von Licht gesprochen wird (siehe z.B. [130]). Bemerkbar machen sie sich durch Schwankungen bereits erwähnter Merkmale wie Melatoninspiegel, Herzrate, Körpertemperatur oder Gehirnaktivität (siehe z.B. [131–133]). Andere Effekte machen sich im Rahmen gesteigerter subjektiver Konzentrationsfähigkeit, verbesserter Daueraufmerksamkeit und kognitiver Leistungsfähigkeit bemerkbar (siehe z.B. [124, 134, 135]).

Studien mit Bezug zur unmittelbaren Lichtwirkung berücksichtigen häufig unterschiedlichste kognitive Konstrukte bzw. Konzepte. Ein häufig verwendeter Begriff ist die *Alertness*, welche oft mit Wachsamkeit übersetzt wird und als Gegenpol zur Schläfrigkeit bzw. *sleepiness* gesehen wird. Eine klare Definition gibt es allerdings nicht, da die Bedeutung je nach Sprache und Situation variiert [136]. Eine öfter verwendete Auslegung beschreibt *Alertness* als erhöhte, nach außen gerichtete Aufmerksamkeit [137], welche sich über das Erreichen und Aufrechterhalten eines Zustands hoher Sensibilität für eingehende Reize definiert [138]. Der in Abschnitt 2.2 erwähnte Begriff *Arousal* ist mit *Alertness* verwandt, muss allerdings losgelöst betrachtet werden. *Arousal* bezieht sich auf eine unspezifische Aktivierung, die durch Änderungen im Schlaf- und Wachzustand hervorgerufen wird [139].

Neben *Alertness* untersuchen viele Studien den Einfluss von Licht auf höhere kognitive Funktionen, wie exekutive Funktionen und das Arbeitsgedächtnis (siehe z.B. [140, 141]). Dem zuvor gegangen war die

Entdeckung, dass durch gezielte Lichtexposition die Aktivität von Hirnregionen gesteigert werden kann, welche mit jenen Funktionen in Verbindung gebracht werden [142]. Exekutive Funktionen ermöglichen es geistig mit Ideen zu spielen, sich vor dem Handeln Zeit zum Nachdenken zu nehmen, Versuchungen zu widerstehen und konzentriert zu bleiben [143]. Sie lassen sich in drei Kernfunktionen unterteilen: Inhibition (Reaktionshemmung & Selbstkontrolle), Arbeitsgedächtnis und kognitive Flexibilität (z.B. kreatives Denken) [143]. Aus diesen Kernfunktionen leiten sich wiederum andere höhere Funktionen wie logisches Denken, Problemlösung und Planung ab [144]. Das zuvor genannte Arbeitsgedächtnis dient dazu Informationen kurzfristig zu speichern und zu aktualisieren, um diese bei Bedarf einsetzen zu können (z.B. bei einer kognitiven Aufgabe) [145].

Eine weitere, detailliertere Beschreibung der von Licht beeinflussten kognitiven Konstrukte bzw. Konzepte wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Grundsätzlich zeigt sich aber, dass durch die unmittelbare Lichtwirkung eine Vielzahl an subjektiven, physiologischen und leistungsbezogenen Merkmalen beeinflusst werden kann.

2.3.3 OPERATIONALISIERUNG NICHT-VISUELLER EFFEKTE

Die durch nicht-visuelle Effekte hervorgerufenen Auswirkungen auf psychologische und physiologische Merkmale können auf unterschiedlichste Weise gemessen werden. Jedoch hat es sich im Allgemeinen bewährt auf anerkannte Mittel zur Quantifizierung

subjektiver, physiologischer und verhaltensbezogener Größen zurückzugreifen. Dadurch wird eine gewisse Vergleichbarkeit über verschiedene Studien hinweg ermöglicht. Nachfolgend werden einige der gängigsten Methoden in Kürze erläutert.

Eine unkomplizierte Methode zur Messung von Konzentrationsfähigkeit, Schläfrigkeit oder *Alertness* ist die Datenerhebung mit Hilfe von subjektiven Fragebögen oder Skalen. Bei Studien zur nicht-visuellen Lichtwirkung wird häufig auf standardisierte Selbstbewertungsskalen wie eine visuelle Analogskala (VAS) oder die *Karolinska Sleepiness Scale* (KSS) zurückgegriffen. Die VAS ist eine Linie deren Endpunkte extreme Zustände wie „sehr wach“ oder „sehr müde“ darstellen [146]. Die Bewertung erfolgt, indem die Probanden eine Markierung auf der Linie setzen, deren Abstand zu den Endpunkten den Gemütszustand widerspiegelt. Das dabei abgefragte Empfinden ist je nach Kontext flexibel austauschbar, sodass die VAS vielseitig eingesetzt werden kann. Die KSS wiederum ist eine neunstufige Likert-Skala mit vorgegebenen Antwortmöglichkeiten, bei der die Versuchspersonen die Antwort auswählen muss, welche ihren Schläfrigkeitszustand am besten widerspiegelt [147]. Bei subjektiven Daten ist zu berücksichtigen, dass Begriffe wie Schläfrigkeit, Müdigkeit, Wachsamkeit und Aufmerksamkeit nicht klar definiert sind und somit ein individueller Interpretationsspielraum gegeben ist, welcher in Abhängigkeit der Situation und Sprache variieren kann [136].

Zur Erhebung verhaltensbezogener Daten wird oft auf Leistungstests zurückgegriffen, welche *Alertness*, Vigilanz oder die in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen, höheren kognitiven Funktionen quantifizieren.

Ein häufig eingesetzter Daueraufmerksamkeitstest ist der psychomotorische Vigilanztest (PVT) [148], bei dem Versuchspersonen über einen längeren Zeitraum auf akustische oder visuelle Reize reagieren müssen, welche in variierenden Intervallen präsentiert werden. Mit Hilfe der mittleren Reaktionszeit und Anzahl an *lapses* bzw. langsamen Reaktionen kann anschließend der Aufmerksamkeitszustand der Probanden analysiert werden. Ein weiterer, öfter verwendeter Test ist der *n-back task*, welcher zur Analyse des Arbeitsgedächtnis eingesetzt wird [149]. Während einem *n-back task* hören oder sehen Probanden eine Reihenfolge von Buchstaben oder Zahlen. Parallel dazu müssen sie bewerten, ob das gerade wahrgenommene Schriftzeichen das gleiche wie vor n Positionen wahrgenommene Schriftzeichen ist (n ist meist 1, 2 oder 3). Die Aufgabe benötigt fortdauerndes Wahrnehmen, Aktualisieren und Manipulieren von gemerkten Informationen, sodass sich eine hohe Belastung des Arbeitsgedächtnis einstellt [150]. Tests wie ein *Go-NoGo task* hingegen untersuchen eine andere Komponente exekutiver Funktionen, die Inhibition bzw. die Fähigkeit zur Reaktionsunterdrückung [151–153]. Hierbei müssen Versuchspersonen auf eine Art von Reiz reagieren (z.B. hoher Ton), während sie die Reaktion auf eine andere Art von Reiz unterdrücken müssen (z.B. niedriger Ton).

Neben solchen verhaltensbezogenen Methoden ist die Messung physiologischer Parameter ein weiteres objektives Mittel, um den Schläfrigkeits- oder Aktivierungsgrad einer Person zu messen. Die Messung der Gehirnaktivität mittels EEG ist eine weit verbreitete Methode, um durch Analyse der Frequenzbänder Rückschlüsse auf den

Bewusstseinszustand der beobachteten Person schließen zu können (siehe z.B. [154]). Für präzisere Untersuchungen der Gehirnaktivität kann auch funktionale Magnetresonanztomographie (*functional magnetic resonance imaging*; fMRI) eingesetzt werden, mit deren Hilfe aktivierte Hirnareale visualisiert werden können (siehe z.B. [142]). Zwar können mittels EEG und fMRI präzise Aussagen über den Aktivierungsgrad des Gehirns getroffen werden, für einen Einsatz in Feldstudien sind sie aufgrund ihrer komplexen technischen Anforderungen aber wenig geeignet. Pupillenreflex, Herzratenvariabilität und Körpertemperatur als Ausprägungen der Aktivität des vegetativen Nervensystems sind weitere Parameter, welche in Zusammenhang mit dem Wachheitszustand gebracht werden können und in Abhängigkeit der tageszeitabhängigen Schläfrigkeit variieren [73, 155, 156].

Ein häufig gemessenes physiologisches Merkmal ist der Melatoninspiegel. Die Rolle von Melatonin und dessen Bedeutung in Bezug auf den Schlaf-Wach-Rhythmus wurde bereits zuvor erläutert. In Studien wird die Melatoninkonzentration meist über die Auswertung von in regelmäßigen Abständen genommenen Speichel- oder Blutproben ermittelt. Die Auswertung der Proben erfolgt dabei im Labor mit Hilfe von Radioimmunassays (*radioimmunoassay*; RIA) oder enzymgekoppelten Immunabsorptionsassays (*enzyme-linked immunosorbent assay*; ELISA).

2.4 EINFLUSS LICHTTECHNISCHER & ZEITLICHER PARAMETER AUF NICHT-VISUELLE EFFEKTE

In den vorherigen Abschnitten wurden bereits einige Komponenten der zu Beginn dieses Kapitels in den Raum gestellten Wirkungskette nicht-visueller Effekte beschrieben. Um beim Bild der Wirkungskette zu bleiben, wird in diesem Abschnitt eine direkte Verbindung zwischen diversen Eingangsgröße sowie psychologischen und physiologischen Ausgangsgrößen hergestellt. Die Eingangsgrößen beschränken sich dabei auf die wesentlichen lichttechnischen und zeitlichen Parameter, wie z.B. die Beleuchtungsstärke oder die Lichtexpositionszeit, und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zusätzlich werden die verschiedenen Stellschrauben separat voneinander beschrieben, da sie die nicht-visuelle Lichtwirkung auf unterschiedliche Art und Weise beeinflussen. Basierend auf der besonderen Rolle der circadianen Rhythmik auf tageszeitabhängige Aktivitäts- und Ruhephasen, wird weiterhin ein besonderes Augenmerk auf die Uhrzeit der Datenerhebung gelegt (für detailliertere Informationen siehe [157]). Studien mit Bezug zum Automobil in einem separaten Abschnitt behandelt.

2.4.1 BELEUCHTUNGSSTÄRKE

Ein häufig gemessener Wert bei der Untersuchung der nicht-visuellen Lichtwirkung ist die von der Lichtquelle erzeugte Beleuchtungsstärke. Dabei wird die Beleuchtungsstärke in der Regel am Auge der

Probanden und horizontal in Blickrichtung gemessen. Wenn daher im weiteren Verlauf der Arbeit von Beleuchtungsstärkewerten gesprochen wird, so sind diese im zuvor genannten Kontext zu sehen.

Den Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungsstärken (50 oder 5000 lx) auf Körpertemperatur, Müdigkeit, EEG Aktivität und Leistung untersuchten Badia et al. im Rahmen einer neunstündigen, nächtlichen Lichtexposition [2]. Im Vergleich zu 50 lx konnten sie bei 5000 lx eine höhere Körpertemperatur, geringere Müdigkeit, auf Wachheit hinweisende EEG Aktivität sowie verbesserte Leistung feststellen.

In einer gemeinsamen Studie untersuchten Cajochen et al. sowie Zeitzer et al. die Dosisabhängigkeit unmittelbarer und circadianer nicht-visueller Effekte (3 bis 9000 lx; 6,5 Stunden nächtliche Lichtexposition) [131, 158]. Cajochen et al. konnten dabei eine Abhängigkeit zwischen der Höhe der Beleuchtungsstärke und verschiedenen Ausprägungen unmittelbarer Effekte. Beispielsweise stieg die *Alertness* mit zunehmender Beleuchtungsstärke an, folgte aber einer logistischen Funktion. Dieser Verlauf konnte auch bei anderen Merkmalen beobachtet werden, welche in parameterabhängig bei ca. 300 bis 800 lx die maximale Ausprägung erreichten. Die halbe Wirkung wurde bei ca. 90 bis 180 lx erreicht. Diese Ergebnisse korrelierten mit der von Zeitzer et al. erhobenen Melatoninunterdrückung, welche ihre halbe Wirkung bei ca. 50 bis 130 lx erreichte und bei ca. 200 lx in Sättigung ging. Im Hinblick auf die circadiane Phasenverschiebung zeigte sich, dass diese am Tag nach der Lichtexposition mit steigender Beleuchtungsstärke größer ausfiel.

In einer praxisnahen Studie untersuchten Lowden et al. inwieweit helles Licht die subjektive Müdigkeit und den Melatoninspiegel bei Arbeitern der Nachtschicht beeinflusst [159]. Über mehrere Wochen wurde dabei der Einfluss von 2500 lx hellem oder nicht näher definiertem, normalem Licht während 20-minütigen Pausen dokumentiert, welche überwiegend zwischen 03:00 und 04:00 Uhr genommen wurden. Durch das helle Licht fiel die Müdigkeit in den frühen Morgenstunden signifikant geringer aus. Diese Beobachtung spiegelte sich auch in der nächtlichen Melatoninkonzentration wider. Die Melatoninkonzentration am Tag blieb von der nächtlichen Lichtexposition allerdings unberührt.

Chang et al. konnten nachweisen, dass durch eine nächtliche Lichtexposition (6,5 Stunden bei 1 oder 90 lx) hervorgerufene nicht-visuelle Effekte von der vorherigen Lichthistorie abhängen (3 Tage bei 1 oder 90 lx). So führte die vorherige helle Lichthistorie bei der nächtlichen Lichtexposition zu einer geringeren Melatoninunterdrückung und circadianen Phasenverschiebung als die dunkle Lichthistorie [160]. Ähnliche Beobachtungen konnten bei der mittels VAS ermittelten subjektiven Müdigkeit gemacht werden [161].

In einer tagsüber durchgeführten Laborstudie konnten Phipps-Nelson et al. die aktivierende Wirkung von hellem Licht nachweisen [14]. Nach zwei Nächten unter Schlafentzug wurden Testpersonen ab der Mittagszeit fünf Stunden lang entweder hellem (1000 lx) oder gedimmtem Licht (5 lx) ausgesetzt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Teilnehmer bei hellem Licht wacher waren, was sich in geringerer

subjektiver Müdigkeit, weniger langsamen Augenbewegungen und kürzeren Reaktionszeiten bei einem Vigilanztest widerspiegelte.

Ergänzend hierzu zeigten Vandewalle et al., dass durch helles Licht am Tag nicht nur die subjektive Wachsamkeit, sondern auch die Aktivität diverser Hirnregionen, welche mit Wachsamkeit und Kognition zusammenhängen, erhöht werden kann [162]. 4,5 Stunden nach ihrer Aufstehzeit wurden Probanden ca. 20 Minuten lang entweder hellem Licht (7000 lx) oder Dunkelheit ausgesetzt, während sie einen *Oddball* Test durchführten, ihre subjektive Wachsamkeit bewerteten und ihre Hirnaktivität mittels fMRI gemessen wurde. Dabei zeigte sich, dass der rechte *superior frontal lobe* des Gehirns, welcher eine besondere Rolle bei der Verarbeitung von Informationen im Arbeitsgedächtnis einnimmt [163], durch die Lichtexposition aktiviert wurde. In der Studie konnte jedoch kein Effekt der Beleuchtungsstärke auf die objektive Leistung beobachtet werden.

Auch im Vergleich höherer Beleuchtungsstärken konnten tagsüber durch Licht induzierte nicht-visuelle Effekte nachgewiesen werden. Smolders et al. verglichen die Wirkung einer 60-minütigen Lichtexposition bei 200 oder 1000 lx (jeweils 4000 K) auf die *Alertness* von Testpersonen [135]. Hierbei zeigte sich, dass die Probanden bei 1000 lx wacher als bei 200 lx waren, was sich durch erhöhte Herzratenvariabilität, geringere subjektive Müdigkeit und verbesserte Leistung in einem psychomotorischen Vigilanztest (PVT) bemerkbar machte. In Studien mit ähnlichen Setup konnten nicht-visuelle Effekte in Form von gesteigerter Leistung bei einem

Arbeitsgedächtnistests (*digit span* und *n-back* Test) sowie auf Wachheit hindeutende EEG Aktivität nachgewiesen werden [140, 164, 165].

In einer weiteren Studie untersuchten Smolders et al. die dosisabhängige Beziehung zwischen Licht und Merkmalen der *Alertness* am Tag [166]. Dabei wurden Versuchspersonen nach einer 30-minütigen baseline Phase (100 lx) für 60 Minuten verschiedenen Beleuchtungsstärken ausgesetzt (20 Stufen von 20 bis 2000 lx bei 4000 K). Die Ergebnisse zeigten weder bei der Leistung (PVT, *Go-NoGo* und *2-back task*), noch bei physiologischen Parametern (Herzrate und Hautleitwert) ein Einfluss des Lichtszenarios. In einer ähnlichen Studie zur dosisabhängigen Lichtwirkung konnten Lok et al. ebenfalls keine signifikanten Einflüsse der Lichtexposition auf Ausprägungen der *Alertness* beobachten [167]. Gemeinsam deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass hohe Beleuchtungsstärken am Tag nicht zwingend und zuverlässig zu einer aktivierenden Wirkung führen.

2.4.2 MONOCHROMATISCHES LICHT

Eine weitere lichttechnische Größe, welche die Ausprägung nicht-visueller Effekte beeinflusst, ist die spektrale Zusammensetzung des wahrgenommenen Lichts. In diesem Teilabschnitt wird daher der Einfluss unterschiedlicher Wellenlängen auf die nicht-visuelle Lichtwirkung beschrieben.

Im Vergleich verschiedener Wellenlängen konnte bei nächtlicher oder abendlicher Lichtexposition festgestellt werden, dass

monochromatisches, blaues Licht Melatonin bei Probanden signifikant stärker unterdrückt als andere Wellenlängen [3, 69, 70, 154]. Dabei lag die effektivste Wellenlänge bei ca. 460 nm, während die Lichtexpositionsdauer zwischen 30 Minuten und 6,5 Stunden variierte. Blaues Licht machte sich außerdem durch geringere subjektive Müdigkeit, erhöhte Körpertemperatur und erhöhte Herzratenvariabilität bemerkbar [3, 154]. Weiterhin konnten manche Studien Leistungssteigerungen bei PVTs und auf erhöhte Wachheit hindeutende Hirnströme beobachten [154, 168]. Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass blaues Licht den durch die circadiane Rhythmik und den homöostatischen Schlafdruck aufgebauten Schlaftrieb nachts effektiver als andere Wellenlängen unterdrückt. Die aktivierende Wirkung von Licht konnte teilweise auch bei roten Wellenlängen beobachtet werden [137, 169]. Dies lässt vermuten, dass ipRGCs nicht singulär an nicht-visuellen Effekten beteiligt sind, sondern klassischen Photorezeptoren ebenfalls eine Rolle spielen (vgl. Abschnitt 2.1).

Eine Vielzahl weiterer Studien untersuchte die Wellenlängenabhängigkeit nicht-visueller Effekte am Tag, wenn Melatoninspiegel und Schlafdruck niedrig sind. Im Vergleich zu den am Abend bzw. in der Nacht durchgeführten Studien unterscheiden sich die Ergebnisse hier besonders im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit. Erste Erkenntnisse sammelten z.B. Vandewalle et al. im Rahmen einer Studie, bei der sie die Gehirnaktivität von Probanden analysierten, während diese einer Merkfähigkeitsaufgabe nachkamen [142]. Probanden wurden hierbei fünf Stunden nach ihrer üblichen Aufstehzeit für 18 Minuten

entweder monochromatischem blauem (470 nm) oder grünem (550 nm) Licht ausgesetzt und mussten dabei einen *n-back task* durchführen. Zeitgleich wurde mittels fMRI Scans ihre Hirnaktivität aufgenommen. Im Vergleich zu grünem Licht verstärkte blaues Licht die Reaktion des Gehirns in Bereichen, welche mit dem Arbeitsgedächtnis in Verbindung gebracht werden. Wurde die Leistung während des *n-back task* verglichen, so konnte hier kein Unterschied zwischen grünem und blauem Licht festgestellt werden. Bei der subjektiven Müdigkeit konnte ebenfalls kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Im Rahmen einer ähnlichen Studie analysierten Vandewalle et al. den Einfluss einer 50-sekündigen Lichtexposition (430 nm, 473 nm oder 527 nm) auf die Aktivität des Gehirns [170]. Bei blauem Licht zeigte sich erhöhte Aktivität in Hirnregionen wie dem linken Thalamus, der rechten Amygdala oder einer dem LC ähnelnden Region. Bei Menschen spielt der Thalamus eine wesentliche Rolle bei der Wechselwirkung zwischen *Alertness* und Aufmerksamkeit [171]. Zudem wird er bei Arbeitsgedächtnisaufgaben aktiviert [172]. Die grobe Funktion der Amygdala und des LC wurde bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben. Auf die Leistung bei einem *n-back* Tests oder die mittels KSS erhobene subjektive Müdigkeit hatten die unterschiedlichen Wellenlängen keinen signifikanten Einfluss. In einer weiteren Studie konnten Vandewalle et al. bei blauem Licht eine erhöhte Aktivität der Amygdala beobachten, was darauf hindeutet, dass Licht die Verarbeitung von Emotionen beeinflussen kann [103].

Okamoto und Nakagawa untersuchten die Wirkung monochromatischer Lichtexposition am Tag auf die Hirnaktivität [173]. In einer ersten Studie wurden Probanden 28 Minuten lang Licht ausgesetzt, während sie einen *Oddball* Test durchführten, ihre subjektive Müdigkeit (KSS) bewerteten. Parallel dazu wurden EEG Daten aufgenommen. Im Vergleich zu anderen Wellenlängen konnten bei blauem Licht (470 nm) höhere P300 Amplituden im EEG beobachtet werden. Die Höhe der nach einem Stimulus auftretenden P300 Amplitude spiegelt dabei den Umfang der vom Gehirn für eine Aufgabe zur Verfügung gestellten Aufmerksamkeit wider [174]. Wellenlängenabhängige, signifikante Unterschiede bei der Leistung während des *Oddball* Tests und der subjektiven Müdigkeit zeigten sich nicht. Im Rahmen einer weiteren Studie konnten Okamoto und Nakagawa durch blaues Licht hervorgerufene, erhöhte Aktivität in Bereichen des Gehirns detektieren, welche mit dem Arbeitsgedächtnis in Verbindung gebracht werden [175]. Auswirkungen von blauem Licht auf das Müdigkeitsempfinden der Probanden oder deren Leistung bei einem Merkfähigkeitstest konnten abermals nicht beobachtet werden.

Einen positiven Einfluss durch blaue Lichtexposition auf die Leistung konnten Alkozei et al. beobachten [141]. In ihrer Studie wurden Probanden vormittags für jeweils 30 Minuten unterschiedlichen Wellenlängen ausgesetzt. Während und nach der Lichtexposition bearbeiteten die Testpersonen einen *n-back* Test. Bei blauem Licht (469 nm, 214 lx) konnten dort signifikant schnellere Reaktionszeiten als bei orangenem Licht (578 nm, 214 lx) beobachtet werden. Weiterhin

wurde nach der Lichtexposition ein 90-minütiger fMRI Scan des Gehirns durchgeführt. Hier zeigte sich, dass Hirnareale wie der präfrontale Kortex durch blaues Licht aktiviert wurden. Der präfrontalen Kortex ist an der Kodierung, der Speicherung und dem Abruf von Informationen aus dem Arbeitsgedächtnis beteiligt [150]. Bei der zudem erhobenen subjektiven Müdigkeit konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Szenarien festgestellt werden.

Weitere Studien konnten den positiven Einfluss von Licht auf die Gedächtniskonsolidierung oder Reaktionszeiten feststellen [176, 177]. Einen positiven Einfluss von blauem Licht auf die *Alertness*, welcher sich jedoch nicht auf die subjektive Stimmung übertrug, konnten Revell et al. beobachten [178]. Eine tagsüber durchgeführte Studie konnte die aktivierende Wirkung von rotem Licht (630 nm) anhand erhöhter EEG Aktivität nachweisen [179].

2.4.3 POLYCHROMATISCHES LICHT

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Einfluss monochromatischer Lichtexposition auf nicht-visuelle Effekte weisen darauf hin, dass Melatoninunterdrückung, Aktivierung, etc. primär durch blaues Licht beeinflusst werden. Ergänzend dazu werden nachfolgend einige Untersuchungen beschrieben, welche den Einfluss von polychromatischem Licht bzw. unterschiedlicher Farbtemperaturen auf nicht-visuelle Effekte analysierten.

Zwei in Büros durchgeführte Feldstudien zeigten, dass eine mehrwöchige Lichtexposition bei hoher Farbtemperatur (jeweils 17 000 K) die subjektive Wachsamkeit, die Schlafqualität sowie die wahrgenommene Leistung im Vergleich zu Beleuchtung mit niedriger Farbtemperatur verbessert [13, 180]. Bei einer Feldstudie in einer Schule wurde die Wirkung der Klassenzimmerbeleuchtung auf die kognitive Leistung der Schüler untersucht [181]. Hierbei zeigten die Ergebnisse, dass sich kaltweißes Licht (300 lx bei 5500 K) positiv auf die Leistung der Schüler auswirkt und im Vergleich zur Standardbeleuchtung (300 lx bei 3000 oder 3500 K) zu erhöhter kognitiver Verarbeitungsgeschwindigkeit sowie verbesserter Konzentration führt.

In einer Laborstudie konnten Chellappa et al. nachweisen, dass sich höhere Farbtemperaturen auch bei geringer Beleuchtungsstärke positiv auf nicht-visuelle Effekte auswirken [6]. Nach zweistündiger Lichtexposition am Abend (40 lx bei 2500, 3500 oder 6500 K) und vorheriger Dunkelphase konnten unter 6500 K schnellere Reaktionszeiten (PVT & *Go-NoGo* Test) sowie geringere Melatoninspiegel als bei anderen Farbtemperaturen beobachtet werden.

Te Kulve et al. untersuchten den Einfluss von warmweißem oder kaltweißem Licht am Morgen (55 lx bei 2700 oder 6500 K) [182]. Hier konnten bei der 75-minütigen Lichtexposition mit kaltweißem Licht kürzere Reaktionszeiten sowie erhöhte Körpertemperaturen beobachtet werden. Auf die subjektive Müdigkeit hatte das kaltweiße Licht im Vergleich zum warmweißen Licht jedoch keinen Einfluss. Der positive Einfluss von kaltweißem Licht auf die *Alertness* konnte

jedoch im Rahmen einer anderen Studie nachgewiesen werden (500 lx bei 3500 oder 6500 K am Morgen) [183].

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Wirkung der Farbtemperatur auf nicht-visuelle Effekte wie zu erwarten von ihrem Blauanteil abhängt. Zudem scheinen höhere Farbtemperaturen den Einfluss niedrigerer Beleuchtungsstärken sowohl bei Nacht, als auch bei Tag kompensieren zu können (siehe [6] oder [182]).

2.4.4 RÄUMLICHE VERORTUNG

Ein wenig berücksichtigter Parameter bei der Forschung zu nicht-visuellen Effekten ist die Verortung der Lichtquelle im Sichtfeld der Probanden. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben nimmt die Dichte von ipRGCs auf der Netzhaut von der Fovea Centralis bis zur retinalen Peripherie ab [62]. Zudem sind im superioren Bereich der Netzhaut allgemein weniger ipRGCs zu finden [63]. Diese Erkenntnisse lassen vermuten, dass die Verortung der Lichtquelle im Bezug zur Sichtachse die Ausprägung nicht-visuelle Effekte beeinflusst.

Im Rahmen einer Laborstudie teilten Visser et al. die Netzhaut ihrer Probanden gedanklich in vier Bereiche, welche jeweils einzeln mit weißem Licht bestrahlt wurden (2 Stunden bei 500 lx) [184]. Bei der nachts durchgeführten Studie zeigte sich, dass die Unterdrückung von Melatonin stärker ausfällt, wenn der nasale Bereich statt dem lateralen Bereich der Netzhaut beleuchtet wird. Im Vergleich des superioren zum inferioren Bereich konnte anhand der gemessenen

Melatoninspiegel kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Bei der Untersuchung nasaler und lateraler Retinabeleuchtung kamen Rüger et al. zu ähnlichen Ergebnissen [185]. Bei nasaler Beleuchtung der Retina (100 lx) konnte dort ebenfalls ein signifikant geringerer Melatoninspiegel als bei lateraler Beleuchtung beobachtet werden. Parameter wie Körpertemperatur oder subjektive Müdigkeit zeigten jedoch keine signifikanten Unterschiede.

In der Nacht beleuchteten Lasko et al. das Gesichtsfeld ihrer Probanden zwei Stunden lang entweder im oberen oder unteren Bereich (500 lx) [186]. Ihre Ergebnisse zeigen, dass der Melatoninspiegel signifikant geringer ausfällt, wenn der obere Bereich des Gesichtsfeldes ausgeleuchtet bzw. der untere Bereich der Netzhaut beleuchtet wird [186]. Diese Unterschiede zeigen sich nicht mehr, wenn die Ausleuchtung des mittleren mit der Ausleuchtung des oberen Gesichtsfeldes verglichen wird [187].

Glickman et al. untersuchten wie sich die nächtliche Beleuchtung (90 Minuten) der gesamten, unteren oder oberen Retina auf die Melatoninunterdrückung auswirkt [188]. Verglichen zu einem dunklen Baseline Szenario konnte sowohl bei Ausleuchtung des gesamten (200 lx und 100 lx) als auch des oberen Gesichtsfeldes (200 lx) eine signifikante Melatoninunterdrückung nachgewiesen werden. Die Melatoninunterdrückung bei Ausleuchtung des oberen Gesichtsfeldes fiel allerdings geringer aus. Bei Ausleuchtung des unteren Gesichtsfeldes konnte keine signifikante Änderung beobachtet werden.

Es lässt sich feststellen, dass die Verortung von Lichtquellen im Gesichtsfeld zumindest nachts einen Einfluss auf nicht-visuelle Effekte hat. Bei Tag durchgeführte Studien zu dieser Thematik sind bisher nicht bekannt. Die hier vorgestellten Studien befassten sich fast ausschließlich mit Melatonin, einem unmittelbaren Merkmal nicht-visueller Effekte, welches allerdings primär mit circadianen Effekten in Verbindung gebracht wird. Studien, welche sich mit dem Einfluss der Verortung einer Lichtquelle auf die unmittelbare, aktivierende Lichtwirkung beschäftigt haben, sind bis dato nicht bekannt.

2.4.5 EXPOSITIONSDAUER

In den vorherigen Abschnitten wurden Studien vorgestellt, die den Einfluss unterschiedlicher lichttechnischer Parameter auf nicht-visuelle Effekte untersucht haben. Dabei wurden Lichtexpositionszeit von 50 Sekunden (siehe [170]) bis zu 9 Stunden (siehe [2]) verwendet. Innerhalb der Studien wurden die Lichtexpositionsintervalle allerdings nicht variiert. Der Einfluss unterschiedlich langer Lichtexpositionsintervalle wird daher nachfolgend beschrieben.

Dewan et al. setzten ihre Probanden nachts unterschiedlichen Lichtszenarien aus (1, 2 oder 3 Stunden bei 2000, 4000 oder 8000 lx) [189]. Während des mehrtägigen Experiments wurden die Probanden randomisiert insgesamt drei der neun verschiedenen Lichtszenarien zugeordnet. Bei der mittels Melatoninspiegel ermittelten circadianen Phasenverschiebung konnte beobachtet werden, dass diese durch

längere Lichtexposition signifikant stärker verschoben wird als bei kurzer Lichtexposition. Im Gegensatz dazu konnte im Vergleich hoher und niedriger Beleuchtungsstärken kein signifikanter Unterschied bei der circadianen Phasenverschiebung beobachtet werden. Mit Blick auf Abschnitt 2.4.1 sei erwähnt, dass die hier verwendete „niedrige“ Beleuchtungsstärke von 2000 lx bereits deutlich im Sättigungsbereich der von Zeitzer et al. ermittelten Dosisabhängigkeitskurve des circadianen Systems liegt [158]. Neben der verstärkten circadianen Phasenverschiebung konnte in einer ähnlichen Studie von Chang et al. beobachtet werden, dass auch die subjektive Müdigkeit von der Expositionsdauer abhängt bzw. mit zunehmender Dauer sinkt [190]. Weiterhin zeigte sich, dass die von der Expositionsdauer abhängige Reaktion des circadianen Systems nicht-linear ist und kurze Lichtexpositionszeiten effektiver zur Phasenverschiebung genutzt werden können als lange.

Den Einfluss unterschiedlicher Lichtexpositionszeiten am Morgen auf die circadiane Phase untersuchten Crowley und Eastman [121]. Nach dem Aufstehen wurden Probanden in vier, stündlichen aufeinander folgenden Intervallen entweder 15 oder 30 Minuten lang einem Versuchslicht (5000 lx) ausgesetzt. Die dritte Variante bestand aus einer einmaligen, 30-minütigen Lichtexposition. Hierbei konnte mit Hilfe von Melatonin nachgewiesen werden, dass die lange Lichtexposition (4x 30 Minuten) zu einer stärkeren Phasenverschiebung als die anderen Szenarien führte. Die einmalige Lichtexposition über

30 Minuten erwies sich allerdings als genauso effektiv wie die viermalige Lichtexposition über jeweils 15 Minuten.

2.4.6 EXPOSITIONSZEITPUNKT

Wie in den Abschnitten 2.2 und 2.3 beschrieben variieren physiologische und psychologische Prozesse des Körpers in Abhängigkeit der circadianen Rhythmik, sodass die Tageszeit bei der Analyse von nicht-visuellen Effekten eine besondere Rolle einnimmt. Ähnlich wie die Expositionszeit stand der Expositionszeitpunkt in den vorherigen Abschnitten weniger im Fokus. Nachfolgend werden daher einige Studien beschrieben, welche explizit den Einfluss der Tages- bzw. Expositionszeit auf nicht-visuelle Effekte analysierten.

Leproult et al. verglichen den Einfluss unterschiedlicher Expositionszeitpunkte (05:00 bis 08:00 Uhr oder 13:00 bis 16:00 bei jeweils >2000 lx) mit einem baseline Szenario bei gedimmtem Licht am Morgen (<150 lx) [191]. Bei der Analyse stellte sich heraus, dass durch Lichtexposition am Morgen die Bildung von Melatonin unterdrückt und von Cortisol gefördert wird. Diese Effekte ließen sich bei der Lichtexposition am Nachmittag nicht beobachten. Ähnliche Erkenntnisse konnten auch Rüger et al. sammeln, indem sie Probanden nachts (00:00 bis 04:00 Uhr) oder nachmittags (12:00 bis 16:00 Uhr) entweder gedimmten (<10 lx) oder hellem Licht (5000 lx) aussetzten [192]. Hier konnte nur am Morgen eine signifikante, lichtinduzierte

Unterdrückung von Melatonin beobachtet werden. Die subjektive Müdigkeit sank tageszeitunabhängig.

Den tageszeitabhängigen Einfluss unterschiedlicher Farbtemperaturen auf nicht-visuelle Effekte untersuchten Smolders et al. [193]. In ihrer Studie wurden Versuchspersonen nach einem baseline Szenario (ca. 160 lx mit 4000 K über 30 Minuten) warm- oder kaltweißem Licht ausgesetzt (ca. 130 lx bei 2700 oder 6000 K über 60 Minuten). Dabei wurden subjektive, leistungsbezogene und physiologische Daten erhoben. Ein Teil der Probanden führte die Studie um 9 Uhr durch, während der andere Teil um 13 Uhr startete. Bei 6000 K fiel die subjektive Vitalität der Probanden signifikant höher aus. Zugleich bewerteten die Testpersonen ihre Stimmung während des 6000 K Szenarios schlechter als während des 2700 K Szenarios. Ein tageszeitabhängiger Einfluss auf die erhobenen Daten konnte nicht beobachtet werden.

Huiberts et al. analysierten wie sich verschiedene Beleuchtungsstärken (165 oder 1700 lx), Tages- (09:00 bis 10:30 Uhr oder 15:45 bis 17:15 Uhr) und Jahreszeiten (Herbst/Winter oder Frühling) auf Parameter wie Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis, etc. auswirken [194]. Bei subjektiven Parametern wie Schläfrigkeit und Vitalität zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Jahreszeit und der Beleuchtungsstärke, der jedoch nur morgens auftrat. Im Winter fühlten sich die Versuchsteilnehmer signifikant wacher und vitaler, wenn sie morgens hellem Licht ausgesetzt waren. Gleiches zeigte die verbesserte Leistung bei einem PVT. Entgegen der Erwartungen fielen die

Ergebnisse des Arbeitsgedächtnistests (*backward digit span task*) bei hellem Licht im Winter schlechter aus als im Frühling.

2.5 STUDIEN MIT BEZUG ZUM AUTOMOBIL

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Anwendungsfälle für die nicht-visuelle Lichtwirkung gefunden werden, welche sich auf das Automobil übertragen lassen. Nachfolgend werden daher einige Studien vorgestellt, die diesen Zusammenhang bereits hergestellt haben.

Taillard et al. untersuchten inwiefern sich monochromatisches, blaues Licht (20 lx, 468 nm) im Vergleich zu Koffein und einem Placebo auf das Fahrverhalten bzw. die Spurhaltegüte von Autofahrern auswirkt [195]. Im Rahmen ihrer Studie mussten Probanden nachts eine 400 km lange Strecke zurücklegen. Zur Hälfte wurde eine Pause eingelegt, sodass die Fahrt aus zwei zweistündigen Etappen bestand. Die Fahrt selbst wurde mit Hilfe eines Videosystems aufgenommen, sodass im Anschluss die laterale Abweichung des Fahrzeugs von der Spurmitte sowie ungewollte Überquerungen der Fahrbahnmarkierungen ausgewertet werden konnten. Die Standardabweichung der lateralen Fahrbahnposition ist ein Merkmal der Fahrleistung [196]. Je nach Szenario wurde die Strecke entweder mit blauem Licht, Koffein oder einem verabreichten Placebo zurückgelegt. Das blau leuchtende Licht wurde auf der Instrumententafel positioniert. Koffein und Placebo wurden vor der Fahrt sowie während der Pause eingenommen. Die Ergebnisse von Taillard et al. zeigen, dass blaues Licht einen

ähnlichen Effekt wie Koffein hat und ungewollte Spurüberquerungen im Vergleich zum Placebo reduziert. Ähnliche Ergebnisse zeigt auch die Standardabweichung der lateralen Position des Fahrzeugs. Taillard et al. konnten somit nachweisen, dass blaues Licht als wirksame Gegenmaßnahme zur Reduzierung nächtlicher Müdigkeit am Steuer verwendet werden kann. Kritisch ist jedoch anzumerken, dass sich einige Probanden durch das blaue Licht geblendet fühlten.

In einer nachgestellten Situation analysierten Weisgerber et al., wie sich der durch eine Nachtschicht einhergehende Schlafentzug auf das Fahrverhalten von Versuchspersonen auswirkt und ob helles Licht (5600 lx) den negativen Einflüssen des Schlafentzugs entgegenwirken kann [197]. Hierbei durchliefen die Probanden insgesamt drei Szenarien. Im ersten Szenario durften die Testpersonen nachts normal schlafen und wurden 45 Minuten nach ihrer normalen Aufstehzeit für 45 Minuten hellem Licht ausgesetzt. Anschließend erfolgte eine 44-minütige Fahrt in einem Fahr Simulator. Bei den anderen beiden Szenarien wurde eine Nachtschicht simuliert, welche zur üblichen Zubettgehzeit begann. Hier durften die Probanden nicht schlafen und wurden nach sechs Stunden unter gedimmtem Licht entweder 45 Minuten lang hellem oder weiter gedimmtem Licht ausgesetzt. Anschließend folgte wieder die 44-minütige Fahrt im Simulator. Bei beiden Szenarien unter Schlafentzug nahmen Reaktionszeit (PVT) sowie Müdigkeit (KSS) zu. Zwar unterdrückte das helle Licht hierbei Melatonin, ein lichtabhängiger Einfluss auf Reaktionszeit und Müdigkeit konnte allerdings wenig bis gar nicht beobachtet werden. Unter Schlafentzug beeinflusste das helle Licht die Fahrleistung

positiv, da die Anzahl an ungewollten Überquerungen der Fahrbahnmarkierung und die mittlere Fahrbahnposition reduziert bzw. verbessert wurden. Die Studie deutet folglich darauf hin, dass helles Licht am Ende einer Nachtschicht die allgemeine Fahrleistung bei der anschließenden Heimfahrt verbessern kann.

In einer praxisnahen Studie untersuchten Schüler et al. den Einfluss von blau angereichertem, weißem Licht auf psychologische und physiologische Merkmale von LKW-Fahrern [198]. Die achtwöchige Datenerhebung fand während den Wintermonaten im Norden Finnlands statt und beinhaltete die Simulation der Arbeitswoche von acht LKW-Fahrern. Die Arbeitswoche bestand aus täglichem Fahren (4 Stunden) sowie Arbeiten und Schlafen im LKW. Insgesamt nahmen die LKW-Fahrer an zwei einwöchigen Szenarien teil: Das erste Szenario beinhaltete mit blauem Licht angereicherte, weiße Leuchten, welche im Dachhimmel des LKWs angebracht wurden. Neben zwei Lichtduschen vor und nach der Fahrt (jeweils 105 Minuten), wurde das Licht auch während der Fahrt (10:00 bis 14:00 Uhr) eingeschaltet. Beim Fahren wurde die Intensität der Lichtquellen allerdings variiert, um Blendung zu vermeiden. Beim zweiten Szenario wurden ein Duft- und ein UV-Strahlungs-Dummy anstatt dem blau angereicherten, weißen Licht verwendet. Die Auswertung von Fragebögen und Interviews deutet darauf hin, dass das bläuliche Licht in Bezug auf subjektive Parameter wie Fitness, Wohlbefinden und Konzentration positiv aufgenommen wurde. Störende Effekte durch das Licht konnten nicht wahrgenommen werden. Die mittels EEG aufgenommene Alpha-Spindelrate deutet zudem darauf hin, dass die Fahrer beim

Fahren deutlich aufmerksamer waren. Zusammengefasst liefert die Studie von Schüler et al. erste Hinweise darauf, dass bläuliches, weißes Licht tagsüber das Wohlbefinden und die Aufmerksamkeit von LKW-Fahrern positiv beeinflussen kann. Aufgrund des kleinen Probandenkollektivs und der fehlenden inferenzstatistischen Analyse kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei den Beobachtungen um Zufallseffekte handelt.

Nach der Studie mit LKW-Fahrern integrierten Schüler et al. ein ähnliches System in PKWs und analysierten den Einfluss von bläulichem, weißem Licht auch dort [199]. 40 Versuchspersonen wurden hierbei in den Wintermonaten bei der Fahrt zur oder von der Arbeit (07:00 bis 09:00 Uhr oder 16:00 bis 18:00 Uhr) jeweils einmal entweder bläulichem, weißem Licht (bis zu 2000 lx) oder einem Duft-Dummy ausgesetzt. Um Blendung zu vermeiden passte sich die Intensität des Lichts auch hier in Abhängigkeit der Helligkeit der Fahrzeugumgebung an. Im Rahmen von Akzeptanzfragebögen bewerteten die Versuchspersonen das Licht als angenehm und aktivierend. Die aktivierende Wirkung konnte zudem teilweise mit Hilfe der per EEG gemessenen Alpha-Spindelraten bestätigt werden. Morgens fielen die Spindelraten unter der Lichtbedingung signifikant geringer aus als bei der Bedingung ohne Licht. Diese Beobachtung konnte nachmittags nicht bestätigt werden. Insgesamt deutet die Studie von Schüler et al. erneut auf den positiven Einfluss von bläulichem, weißem Licht auf das Wohlbefinden und die Aufmerksamkeit beim Fahren hin, auch wenn sich dieser primär morgens einzustellen scheint.

Kapitel 3

DISKUSSION MÖGLICHER FOR- SCHUNGSLÜCKEN & ANWENDUNGS- FÄLLE

In diesem Kapitel wird der zuvor beschriebene Stand der Wissenschaft genauer beleuchtet, um zu erörtern, an welchen Stellen wissenschaftlicher Konsens zur nicht-visuellen Lichtwirkung besteht und wo sich Ergebnisse nur schwer verallgemeinern lassen. Dadurch sollen Forschungslücken aufgedeckt werden, deren Einfluss wiederum im Anschluss diskutiert wird. Die gesammelten Erkenntnisse werden dann mit dem Automobil in Verbindung gebracht, um mögliche Anwendungsfälle für nicht-visuelle Effekte im Fahrzeuginterieur zu erarbeiten. Die diskutierten Forschungslücken und Szenarien dienen wiederum als Basis für die in dieser Arbeit durchgeführten Studien.

3.1 EINORDNUNG DES WISSENSCHAFTLICHEN STATUS QUO

Im vorherigen Kapitel wurde die nicht-visuelle Wirkung von Licht im Rahmen einer Wirkungskette betrachtet, um die Rolle der

einzelnen Faktoren besser zu veranschaulichen. Hinsichtlich der Anatomie des Auges und der Neurophysiologie wurde herausgearbeitet, dass ipRGCs eine tragende Rolle bei nicht-visuellen Effekten spielen (vgl. Abschnitte 2.1 & 2.2). Sie stehen entweder direkt oder indirekt mit einer Vielzahl an Hirnregionen in Verbindung, welche die circadiane Rhythmik und andere aktivierende Prozesse des Körpers regulieren (vgl. Abschnitt 2.2).

Die zentrale Rolle von ipRGCs bestätigte sich auch im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss verschiedener lichttechnischer Parameter auf die nicht-visuelle Lichtwirkung. Wie in den Abschnitten zu mono- und polychromatischem Licht beschrieben wurde (vgl. Abschnitte 2.4.2 & 2.4.3), können nicht-visuelle Effekte am zuverlässigsten ausgelöst werden, wenn das Spektrum der Lichtquelle sich an der spektralen Empfindlichkeit von ipRGCs orientiert. Die Lichtquelle sollte daher blau sein oder einen hohen Blauanteil aufweisen, wenn weißes Licht verwendet wird. Unter Berücksichtigung zweier weiterer Beobachtungen lassen sich daraus erste Schlussfolgerungen für die Spezifikation einer Lichtquelle ableiten, welche gezielt nicht-visuelle Effekte hervorrufen soll. Sowohl die neuroanatomischen Erkenntnisse, als auch die Studien zum Einfluss des Spektrums deuten darauf hin, dass auch die klassischen Photorezeptoren an nicht-visuellen Effekten beteiligt sind (vgl. Abschnitte 2.1, 2.4.2 & 2.4.3). Ihre spektrale Empfindlichkeit ist folglich bei der Analyse der nicht-visuellen Lichtwirkung zu berücksichtigen. Die zweite Beobachtung bezieht sich auf das Licht, welchem Menschen tagtäglich ausgesetzt sind. Zum einen ist hier das natürliche Sonnenlicht, dessen

Farbtemperatur sich im Laufe des Tages von warmweiß zu kaltweiß und wieder zu warmweiß ändert. Zum anderen geben künstliche Lichtquellen in öffentlichen Gebäuden, Schulen, Büros oder zuhause in der Regel ebenfalls weißes Licht ab. Dies lässt schlussfolgern, dass eine Lichtquelle zum Auslösen nicht-visueller Effekte, welche die spektrale Empfindlichkeit aller Photorezeptoren berücksichtigt und sich natürlich in den Alltag einbettet, mit kaltweißem Licht gestaltet werden sollte.

Hinsichtlich der Beleuchtungsstärke hat sich in Abschnitt 2.4.1 gezeigt, dass vor allem hohe Beleuchtungsstärken mit bis zu 9000 lx dazu geeignet sind, um sowohl circadiane, als auch unmittelbare nicht-visuelle Effekte hervorzurufen. Hierbei sind jedoch nachts Sättigungseffekte bei deutlich geringeren Beleuchtungsstärkewerten zu berücksichtigen (z.B. ca. 200 lx für Melatonin; siehe [158]). Mit Blick auf den praktischen Einsatz und der Binsenweisheit „viel hilft viel“ folgend, könnte daraus abgeleitet werden, dass eine Lichtquelle zum Auslösen nicht-visueller Effekte möglichst hell gestaltet werden muss. Unter Berücksichtigung des visuellen Komforts ist dies allerdings nicht zielführend. Wie die Feldstudien mit automotivem Kontext gezeigt haben, sollte sich eine Lichtquelle zum Auslösen nicht-visueller Effekte möglichst nahtlos in die Umgebung einfügen und Blendung vermeiden (vgl. Abschnitt 2.5). Eingeschränkter visueller Komfort würde vermutlich zu seltenerem Gebrauch der Leuchte führen und könnte im Fahrzeug durch Blendung schwerwiegendere Probleme hervorrufen. Im Falle einer Fahraufgabe führt physiologische Blendung zu verminderter Wahrnehmung der Umgebung und stellt

somit sowohl für den Fahrer, als auch für andere Verkehrsteilnehmer ein Sicherheitsrisiko dar. Für praktische Anwendungsfälle lässt sich daraus ableiten, dass eine Leuchte für nicht-visuelle Effekte zwar so hell wie möglich, unter Berücksichtigung von visuellem Komfort und Blendung aber nur so hell wie nötig gestaltet werden darf. Da die Blendwirkung einer Lichtquelle von ihrer Umgebungsleuchtdichte abhängt (für mehr Informationen siehe [200]), können umgebungs- bzw. tageszeitabhängige Variationen der maximalen Beleuchtungsstärke sinnvoll sein, um die maximale Wirkung nicht-visuelle Effekte zu erreichen (siehe Studien von Schüler et al. [198, 199]).

Aus den anatomischen Untersuchungen zur Verteilung von ipRGCs auf der Netzhaut geht hervor, dass die Dichte von ipRGCs im oberen Bereich der Netzhaut abnimmt (vgl. Abschnitt 2.1). Diese Erkenntnis führt zur Schlussfolgerung, dass eine im oberen Bereich des Sichtfeldes positionierte Lichtquelle besser dazu geeignet ist, um nicht-visuelle Effekte hervorzurufen. Die Ergebnisse der Probandenstudien aus Abschnitt 2.4.4 bestätigen diese Vermutung zur räumlichen Verortung. Im Rahmen einer alltäglichen Beobachtung, welche evolutionäre Aspekte berücksichtigt und künstliche Lichtquellen vernachlässigt, scheint diese Erkenntnis als logisch, da der tagsüber helle Himmel den oberen Bereich des Sichtfeldes abdeckt.

Die zuvor beschriebenen Aspekte decken primär lichttechnische Erkenntnisse ab, bei denen wissenschaftlicher Konsens besteht. Wie im Vergleich der in Abschnitt 2.4 vorgestellten Untersuchungen zu sehen ist, lassen sich nicht-visuelle Effekte jedoch nicht zuverlässig von Studie zu Studie hervorrufen (z.B. PVT Leistung in [134] oder [135]).

Dadurch ist zu hinterfragen, inwiefern sich das gewonnene Wissen auf neue Untersuchungskonzepte übertragen lässt. Mögliche Gründe für diese Beobachtung liefern die grundverschiedenen Studiendesigns (unterschiedliche Expositionszeiten, Beleuchtungsstärken, etc.) und der Umgang mit lichttechnischen Parametern. Ein wesentlicher Aspekt des ersten Faktors ist die Tageszeit der Studiendurchführung (Tag oder Nacht), welcher potentielle Anwendungsfälle aufgrund der natürlichen circadianen Rhythmik besonders beeinflusst. Der zweite Faktor bezieht sich darauf, dass lichttechnische Parameter nur unvollständig berichtet werden, wodurch sich die lichttechnische Situation einer Studie nicht reproduzieren lässt. Die Rolle beider Faktoren wird nachfolgend diskutiert.

3.1.1 DIFFERENZIERUNG ZWISCHEN TAG & NACHT

In den Abschnitten 2.4 und 2.5 wurden die dort vorgestellten Untersuchungen bewusst in nachts und tagsüber durchgeführte Studien unterteilt. Hierbei zeigte sich, dass sich lichtinduzierte nicht-visuelle Effekte abends, nachts, morgens oder tagsüber hervorrufen lassen. Die Beobachtung umfasst dabei sowohl subjektive als auch objektive Parameter. Nichtsdestotrotz scheinen sich nicht-visuelle Effekte nachts zuverlässiger durch Licht hervorrufen zu lassen als am Tag.

Lok et al. formulierten daher die Frage, ob sich nachts gewonnene Erkenntnisse auf Situationen am Tag übertragen lassen [201]. In einer Literaturanalyse verglichen sie diverse Studien, um zu untersuchen,

wie sich polychromatisches, weißes Licht tagsüber auf unterschiedliche Merkmale nicht-visueller Effekte auswirkte. Hierbei wurde der Fokus auf *Alertness* gelegt, wobei sowohl subjektive, leistungsbezogene als auch physiologische Indikatoren berücksichtigt wurden. Insgesamt wurden 19 Studien verglichen. Von 18 Studien, welche die subjektive Müdigkeit abfragten, konnten 14 Studien signifikante Effekte durch helle Lichtexposition nachweisen. Daten zu leistungsbezogenen Merkmalen wurden in 17 Studien erhoben. Darunter waren zehn Studien mit Tests zur Daueraufmerksamkeit (PVT) und zwölf Studien mit Tests höherer kognitiver Funktionen (z.B. *n-back task*). Fünf von zehn Studien konnten eine signifikante Verbesserung der Daueraufmerksamkeit durch helles Licht beobachten, während die Ergebnisse bei den höheren kognitiven Funktionen gemischer ausfielen. Hier konnten drei Studien signifikante Verbesserungen, vier Studien keine signifikanten Verbesserungen, eine Studie gemischte Ergebnisse und vier Studien negative Effekte beobachten. Bei elf Studien, welche physiologische Parameter untersuchten, wurden ebenfalls gemischte Ergebnisse beobachtet. Hier fand etwa die Hälfte der Studien signifikante positive Effekte, während einzelne Studien negative oder gemischte Einflüsse von hellem Licht auf physiologische Parameter beobachteten.

Lok et al. kommen zu dem Schluss, dass sich *Alertness* verstärkende Lichteffekte am Tag hauptsächlich in der subjektiven *Alertness* bemerkbar machen, während objektive Parameter weniger stark beeinflusst werden [201]. Dies könnte daran liegen, dass der menschliche Melatoninspiegel aufgrund der circadianen Rhythmik tagsüber

geringer ausfällt als nachts, wodurch die *Alertness* tagsüber auf einem höheren Grundniveau liegt (vgl. [29, 73, 202]), weshalb sich lichtinduzierte Effekte objektiv nicht oder weniger bemerkbar machen. Auf der anderen Seite sind die Versuchspersonen der Lichtintervention gegenüber nicht blind, sodass sich bei der subjektiven Bewertung ein positiver Placeboeffekt einstellen kann [201].

Den direkten Vergleich lichtinduzierter nicht-visueller Effekte am Tag und in der Nacht ermöglicht eine von Souman et al. durchgeführte Literaturanalyse [130]. Hierbei wurden 68 Studien verglichen, welche die aktivierende Wirkung von Licht auf die subjektive und verhaltensbezogene *Alertness* untersuchten. 38 von 68 Studien wiederum analysierten den Einfluss unterschiedlicher Intensitäten von weißem Licht auf die *Alertness*. Nachfolgend werden nur diese betrachtet, da sich weißes Licht wie zuvor erwähnt natürlicher in den Alltag einfügt. Weiterhin muss ergänzt werden, dass Souman et al. die Analyse der verhaltensbezogener *Alertness* auf Reaktionszeiten bei PVTs beschränkten. Im direkten Vergleich zeigten sich bei 11 von 20 abends bzw. nachts durchgeführten Versuchsdurchläufen positive, signifikante Effekte auf die subjektive *Alertness*. Morgens bzw. nachmittags konnte bei 17 von 25 Versuchsdurchläufen ein signifikanter, positiver Einfluss beobachtet werden. Dahingegen wurde bei keinem von fünf abends/nachts durchgeführten Versuchsdurchläufen ein signifikanter Einfluss auf die Reaktionszeit festgestellt. Morgens/nachmittags zeigten hingegen zwei von zehn Versuchsdurchläufen einen positiven, signifikanten Effekt von Licht auf die Reaktionszeit.

Die Analyse von Souman et al. zeigt, dass die Wirkung von Licht auf die *Alertness* sowohl nachts, als auch tagsüber nicht zuverlässig reproduzierbar ist [130]. Souman et al. führen dies auf die schwer vergleichbaren Studiendesigns zurück. Teilweise wurden dort *baseline* Szenarien mit über 100 lx verwendeten, sodass aktivierende Lichteffekte nicht mehr sichtbar werden konnten, da das *baseline* Szenario bereits zu hell bzw. zu aktivierend war.

Die hier beschriebenen Literaturanalysen zeigen, dass sich auf *Alertness* bezogene, lichtinduzierte nicht-visuelle Effekte unabhängig von der Tageszeit nur inkonsistent hervorrufen lassen. Die Vermutung, dass sich verhaltensbezogene Merkmale abends bzw. nachts effektiver durch Licht beeinflussen lassen als morgens bzw. nachmittags, lässt sich nicht bestätigen. Wie sich dies bei physiologischen Parametern verhält, geht aus den Analysen nicht hervor. Für den weiteren Verlauf der Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich subjektive Parameter tageszeitunabhängig effektiver durch Licht beeinflussen lassen als leistungsbezogene Merkmale.

3.1.2 ERFASSEN LICHTTECHNISCHER PARAMETER

Souman et al. haben bereits angemerkt, dass die unterschiedlichen Studienkonzepte das Vergleichen der Versuchsergebnisse untereinander erschweren [130]. Ein weiterer Punkt ist der Umfang in dem die verwendeten lichttechnischen Parameter dargestellt werden. Älteren Publikationen geben teilweise nur die Beleuchtungsstärken

wieder (z.B. Studie von Lewy et al. (1980) [28]), wohingegen andere Eigenschaften der Lichtquelle nicht beschrieben wurden. In Anbetracht der damaligen Erkenntnisse und verfügbaren Messmittel ist dies zwar nachvollziehbar, im Nachhinein erschweren die reduzierten Informationen allerdings das richtige Einordnen der Ergebnisse oder gar die Reproduktion einer Beleuchtungssituation.

Diese Problematik erkannten bereits Lucas et al. im Hinblick auf die spektrale Zusammensetzung einer Lichtquellen [203]. Grundsätzlich halten sie es für sinnvoll eine Lichtsituation mit nur einer eindimensionalen Größe, wie z.B. Lux, beschreiben zu können. In diesem Fall enthält die Beleuchtungsstärke bzw. deren Einheit Lux allerdings keinerlei Information über die Spektrale Zusammensetzung der Lichtquelle. Bezüglich der nicht-visuellen Lichtwirkung kommt ergänzend hinzu, dass die klassischen photometrischen Größen auf der Hellempfindlichkeitskurve des Auges zur visuellen Wahrnehmung basieren. Die spektrale Empfindlichkeit von ipRGCs bzw. des circadianen Systems wird hier nicht berücksichtigt. Infolgedessen machen Lucas et al. folgende Vorschläge: Zum einen sollen verwendeten Lichtquellen spektral vermessen werden, sodass deren Spektralverteilung in Veröffentlichungen integriert werden kann. Zum anderen sollen mit Hilfe der Spektralverteilung der Leuchte und den bekannten Empfindlichkeitsfunktionen der einzelnen Photorezeptorenarten photopigmentspezifische Bestrahlungsstärken dokumentiert werden. Zur Berechnung der einzelnen Bestrahlungsstärken wurde eine standardisierte Toolbox über die CIE zur Verfügung gestellt [204].

Mit den Empfehlungen von Lucas et al. kann zwar der Einfluss von Licht auf individuellen Photorezeptorarten beurteilt werden, eine Rekonstruktion des Lichtszenarios ist damit aber nicht möglich, da keine Informationen über zeitliche und räumliche Aspekte vorliegen. Spitschan et al. greifen dieses Defizit auf und schlagen eine Richtlinie zum Beschreiben des Lichtszenarios vor [205]. Diese beinhalten das spektrale Vermessen der Lichtquelle und des Umgebungslichts, das Veröffentlichen der Spektren sowie das Darstellen der photopigmentspezifischen Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärken. Um die photopigmentspezifische Beleuchtungsstärke einer Lichtquelle zugänglich zu machen, kann diese durch die Beleuchtungsstärke eines D65 Normlichts ausgedrückt werden, welches zur gleichen photopigmentspezifischen Stimulation führt (siehe [204]). Diese photopigmentspezifische, D65 Normlicht äquivalente Beleuchtungsstärke wird auch *α -opic equivalent daylight (D65) illuminance (α -opic EDI)* genannt [204]. Weiterhin empfehlen Spitschan et al. die zeitlichen sowie detaillierten räumlichen Gegebenheiten zu beschreiben. Zu guter Letzt soll das Messequipment genannt werden.

Werden die hier beschriebenen Handlungsempfehlungen von Lucas et al. sowie Spitschan et al. bei zukünftigen Publikationen berücksichtigt, so können die Ergebnisse verschiedener Studien einfacher miteinander verglichen werden. Hinsichtlich der praktischen Umsetzung kann zudem besser abgeschätzt werden, ob sich die lichttechnischen, zeitlichen und räumlichen Gegebenheiten aus der Forschung sinnvoll in einen anwendungsnahen Usecase übersetzen lassen.

3.2 EINFLUSS DES RAUMWINKELS EINER LICHTQUELLE AUF NICHT-VISUELLE EFFEKTE

Die Empfehlung von Spitschan et al., zukünftig auch die räumlichen Gegebenheiten des Lichtszenarios bei der Analyse der nicht-visuellen Lichtwirkung zu berücksichtigen, schließt einen Parameter ein, welcher in der Vergangenheit vernachlässigt wurde. Dieser Parameter ergänzt die räumliche Verortung der Lichtquelle (vgl. Abschnitt 2.4.4) und ist vor allem für praktische Anwendungen im Automobil von großer Relevanz: Der Raumwinkel bzw. die wahrgenommene Größe einer Lichtquelle.

Viele der bisher zu lichtinduzierten Effekten durchgeführten Studien berichten die Beleuchtungsstärke am Auge bzw. an der Hornhaut der Probanden. Die für lichtinduzierte nicht-visuelle Effekte relevanten Photorezeptoren, allen voran ipRGCs, sitzen jedoch nicht auf der Hornhaut, sondern auf der Netzhaut. Zwar ist das Messen der Beleuchtungsstärke am Auge die unkomplizierteste Methode, allerdings kann die Beleuchtungssituation auf der Netzhaut ohne Kenntnis des Raumwinkels der Lichtquelle nicht abgeschätzt werden. So kann eine kleine, helle Lichtquelle dieselbe Beleuchtungsstärke wie eine große, gedimmte Lichtquelle an der Hornhaut erzeugen, wohingegen die Beleuchtungssituation auf der Netzhaut eine völlig andere wäre (vgl. [206]). Abbildung 3.1 visualisiert dieses Szenario und zeigt stark vereinfacht, wie zwei unterschiedliche Lichtquellen auf der Netzhaut des Auges abgebildet werden. Der Einfachheit halber

wurden die erzeugten Abbildungen auf einer planaren Bildebene dargestellt, welche in Realität gekrümmt ist. Zusätzlich zeigt die Abbildung die typischerweise verwendete Position zur Messung der Beleuchtungsstärke am Auge.

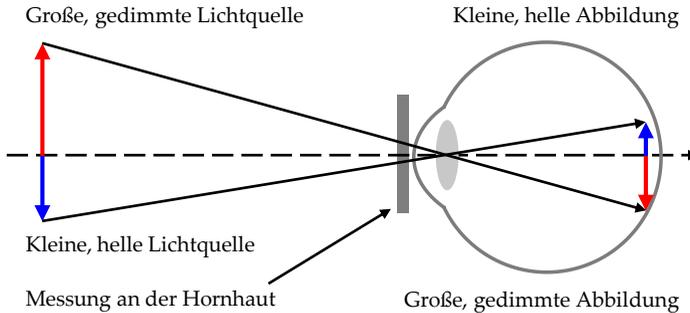


Abbildung 3.1: Schematische Abbildung zweier Lichtquellen auf der Netzhaut. Zusätzlich ist die typischerweise verwendete Position zur Messung der Beleuchtungsstärke am Auge dargestellt.

Da ipRGCs wie in Abschnitt 2.1 beschrieben über die gesamte Netzhaut verteilt sind, bedeutet dies für das zuvor skizzierte Szenario, dass die Anzahl der von Licht getroffenen Zellen von der Bildgröße bzw. vom Raumwinkel der Lichtquelle abhängt. Hierbei stellt sich die Frage, wie von erregten ipRGCs ausgehende Signale im Gehirn weiterverarbeitet werden, um nicht-visuelle Effekte hervorzurufen. Brainard et al. konnten beobachten, dass die durch Licht hervorgerufene Melatoninunterdrückung ca. halb so stark ausfällt, wenn nur eines anstatt beide Augen beleuchtet wird [207]. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass die nicht-visuelle Lichtwirkung mit der

beleuchteten Fläche skaliert. Unterstützt wird diese These durch eine Studie von McIntyre et al., bei der die Melatoninunterdrückung von der Beleuchtungsstärke am Auge abhing (200, 400 oder 600 lx) [208]. Dabei wurde die Beleuchtungsstärke am Auge über die Entfernung der Lichtquelle zum Auge reguliert, sodass deren Leuchtdichte in jedem Szenario konstant blieb. In Abhängigkeit des Szenarios und unter Berücksichtigung von Slineys Formel zur Berechnung der retinalen Beleuchtungsstärke [209], wurden dabei unterschiedlich große Bilder mit konstanter Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut erzeugt.

Novotny et al. untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Raumwinkel auf die Melatoninunterdrückung, indem sie sechs Probanden nachts 60 Minuten lang zwei oberhalb der Sichtachse positioniert Lichtquellen aussetzen [210]. Beide Leuchten erzeugten ca. 90 lx am Auge, unterschieden sich jedoch durch ihre Größe (25 cm² oder 15 000 cm²) und Leuchtdichte. Die Ergebnisse zeigen einen Trend, welcher darauf hindeutet, dass die große Lichtquelle Melatonin effektiver unterdrücken konnte als die kleine. Mitunter wegen des kleinen Probandenkollektivs konnte aber keine Signifikanz nachgewiesen werden.

Simulation retinaler Beleuchtungsstärke

Um den Einfluss des Raumwinkel einer Lichtquelle auf die retinale Beleuchtungsstärke hervorzuheben, wird nachfolgend auf eine Simulation vorweggegriffen, welche gemeinsam mit den Ergebnissen der

zweiten Probandenstudie dieser Arbeit veröffentlicht wurde (vgl. Kapitel 4.2 und [211]). Ziel der Simulation war zu visualisieren, dass zwei unterschiedliche Lichtquellen, welche die gleiche Beleuchtungsstärke am Auge erzeugen zu völlig anderen Werten auf der Netzhaut führen. Zur Simulation wurde die Software SPEOS verwendet.

Abbildung 3.2 zeigt das verwendete Simulationssetup, welches sich an der in Abschnitt 4.1.3.2 hergeleiteten geometrischen Anordnung orientiert. Zu sehen sind zwei unterschiedlich große Leuchtflächen, die im oberen Bereich des Gesichtsfeldes eines Auges positioniert sind. Die rot umrandete Fläche spannt einen Raumwinkel von $0,44$ sr auf und ist mit ihrer Flächennormale auf das Auge ausgerichtet. Die blau umrandete Fläche spannt einen Raumwinkel von $0,05$ sr auf und ist mittig an der unteren Kante der großen Leuchtfläche positioniert. Verglichen mit der später tatsächlich verwendeten Anordnung (vgl. Kapitel 4) ist die kleine Leuchtfläche um 90° gedreht. Bezüglich der Kernaussage der nachfolgenden Simulation spielt dies jedoch keine Rolle. Der Lichtstrom beider Leuchtflächen wurde so eingestellt, dass sie beide eine Beleuchtungsstärke von 200 lx auf der Sensorfläche erzeugen, welche vor dem Auge positioniert wurde. Daraus resultiert ein Lichtstrom von 450 lm für die kleine Leuchte, während der Lichtstrom der großen Leuchte 365 lm beträgt. Die Sensorfläche vor dem Auge wurde so ausgerichtet, dass ihr Normalenvektor parallel zur optischen Achse des Auges verläuft. Die optische Achse des Auges ist horizontal ausgerichtet.

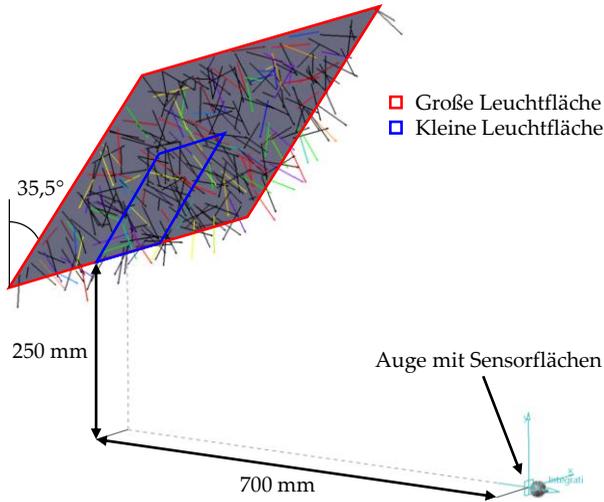


Abbildung 3.2: SPEOS Setup zur Simulation der retinalen Beleuchtungsstärke (übersetzt und ergänzt aus [211])

Das Modell des menschlichen Auges, welches für die Simulation verwendet wurde, basiert auf den optischen Parametern, die von Atchinson und Thibos diskutiert werden (vgl. [212]). Der Pupillendurchmesser wurde auf Basis der Formel von Watson & Yellott berechnet (siehe [213]). Die Formel geht davon aus, dass Änderungen des Pupillendurchmessers stärker von der Beleuchtungsstärke als vom Raumwinkel abhängen [213]. Hier ist zu ergänzen, dass die Formel den Einfluss von ipRGCs vernachlässigt, welche den Pupillendurchmesser ebenfalls beeinflussen [214]. Für die Simulation wird dennoch davon ausgegangen, dass das Modell von Watson und Yellott ein guter Ausgangspunkt ist, um den Durchmesser der Pupille zu

berechnen. Entsprechend wurde der Pupillendurchmesser für beide Szenarien auf 2,67 mm festgelegt. Zur Auswertung der retinalen Beleuchtungsstärke wurde eine gekrümmte Sensorfläche auf der Netzhaut des Augenmodells angebracht. Die Ergebnisse der simulierten Beleuchtungsstärken sind in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen. Dabei stellt Abbildung 3.3 die Resultate der kleinen Leuchtfläche dar, während die Ergebnisse der großen Leuchtfläche in Abbildung 3.4 visualisiert werden.

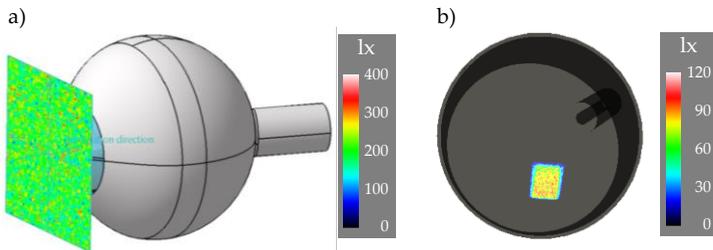


Abbildung 3.3: Simulierte Beleuchtungsstärken des kleinen Lichtszenarios (0,05 sr; 365 lm): **a)** Beleuchtungsstärke an der Pupille, **b)** Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut

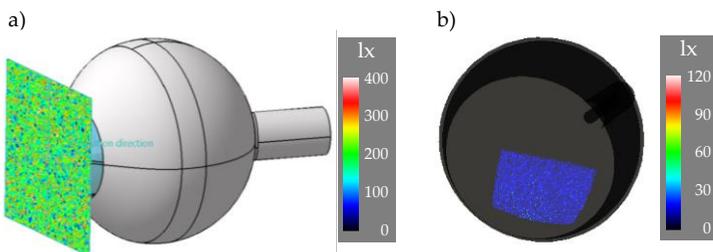


Abbildung 3.4: Simulierte Beleuchtungsstärken des großen Lichtszenarios (0,44 sr; 450 lm): **a)** Beleuchtungsstärke an der Pupille, **b)** Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut

Im direkten Vergleich der Simulationen fällt auf, dass in beiden Szenarien eine Beleuchtungsstärke von ca. 200 lx am Auge erreicht wird. Dahingegen zeigt die retinale Beleuchtungsstärke ein anderes Bild. Wie zu erwarten erzeugt die kleine Leuchtfläche ein deutliches kleineres Bild auf der Netzhaut als die große Leuchtfläche. Zudem fällt die mittlere retinale Beleuchtungsstärke beim kleinen Szenario mit 81 lx wesentlich höher aus als mit 13 lx beim großen Szenario. Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge nimmt die retinale Beleuchtungsstärke also mit zunehmendem Raumwinkel bzw. zunehmender retinaler Bildgröße ab.

Diese Beobachtung weist auf eine Forschungslücke hin, welche in bisherigen Studien nicht berücksichtigt worden ist, da ipRGCs wie zuvor erwähnt nicht auf der Hornhaut, sondern auf der Netzhaut des Auges zu finden sind. Zusätzlich spielt der Raumwinkel bei der potentiellen Integration einer auf nicht-visuelle Effekte ausgelegten Leuchte ins Fahrzeuginterieur eine wichtige Rolle. Der Raumwinkel einer Leuchte skaliert über ihre Fläche sowie ihren Abstand zum Beobachter. Die Fläche wiederum schlägt sich im Bauraum nieder, welchen die Leuchte benötigt. Bauraum zur Komponentenintegration ist im Fahrzeuginterieur allerdings knapp bemessen. Deshalb stellt sich die Frage, ob Leuchten mit großem Raumwinkel zum Auslösen nicht-visueller Effekte nötig sind, oder ob hierzu auch kleine Raumwinkel ausreichen. Der Schwerpunkt der nachfolgenden Untersuchungen wird daher auf den Einfluss des Raumwinkels auf lichtinduzierte nicht-visuelle Effekte gelegt.

3.3 USE CASES FÜR NICHT-VISUELLE EFFEKTE IM AUTOMOBILBEREICH

In diesem Teilabschnitt werden potentielle Anwendungsfälle für lichtinduzierte nicht-visuelle Effekte im Fahrzeuginterieur herausgearbeitet. Die in Abschnitt 2.4 beschriebenen Studien dienen dabei als Orientierung, wobei zu beachten ist, dass sie primär im Labor und unter streng kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurden (nur Männer, Teilnehmer unter Schlafentzug, etc.). Diese Arbeit soll jedoch einen Anwendungsfall untersuchen, dessen Rahmenbedingungen sich an alltäglichen Situationen orientieren, sodass er einer größeren Anzahl an Nutzern zugänglich ist. Infolgedessen ist unklar, inwiefern sich viele der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Erkenntnisse auf ein alltäglicheres Versuchsszenario übertragen lassen. Nichtsdestotrotz konnten Feldstudien den positiven Einfluss nicht-visueller Lichteffekte auf die kognitive Leistung von Schülern [10, 181], die subjektive Müdigkeit von Büroangestellten [9] oder den Komfort von Passagieren bei Langstreckenflügen [215] feststellen.

Schule, Büro und Langstreckenflug haben gemeinsam, dass die Lichtexposition je nach Bedarf über mehrere Stunden andauern kann. Im Vergleich dazu wird ein PKW in Deutschland im Mittel lediglich 46 Minuten pro Tag gefahren [216]. Ein Großteil der dabei getätigten Fahrleistung (in km) entfällt auf das Pendeln zur Arbeit (28%), Fahrten während der Freizeit (24%) und dienstliche Wege (21%) [216]. Hier ist zu berücksichtigen, dass in Deutschland durchschnittlich 34 Minuten (Männer) bzw. 19 Minuten (Frauen) zum Pendeln zur und

von der Arbeit benötigt werden (vor der Corona-Pandemie) [217]. Daraus lässt sich schließen, dass beim Pendeln häufig mittlere bis lange Strecken zurückgelegt werden, welche z.B. durch den Berufsverkehr in die Länge gezogen werden. Streckenmäßig lange Freizeitfahrten (z.B. Ausflüge oder Urlaub, aber keine Erledigungen) und berufliche Wege scheinen dagegen seltener vorzukommen, sodass sie einzeln zwar mehr, im Schnitt aber weniger Zeit in Anspruch nehmen. Mit Blick auf Dauer und Frequenz können Parallelen zu Langstreckenflügen gesehen werden, welche ebenfalls zu seltener auftretenden Ereignissen zählen [218]. Das Pendeln zur und von der Arbeit stellt demnach ein häufig auftretendes Ereignis bzw. Zeitfenster dar, welches dazu genutzt werden kann, um lichtinduzierte nicht-visuelle Effekte hervorzurufen.

Autofahren selbst ist je nach Verkehrs- und Straßenlage eine monotone Aufgabe, bei der sich verschlechtertes Fahrverhalten bemerkbar macht [219]. Dieses wiederum deutet auf erhöhte Müdigkeit sowie geringere Vigilanz hin [219]. Ähnliche Ermüdungseffekte sind bei teilautonomen Fahrten zu beobachten, bei denen der Fahrer das Verkehrsgeschehen observiert und die Kontrolle über das Fahrzeug nur bei Bedarf übernimmt [220, 221]. In diesen Situationen kann Licht möglicherweise gezielt dazu eingesetzt werden, um der erhöhten Müdigkeit entgegenzuwirken. Weiterhin ist es denkbar je nach Tageszeit (morgens oder nachmittags bzw. abends) den negativen Einflüssen des individuellen Chronotypen entgegenzuwirken. Spätaufsteher könnten vor oder während der morgendlichen Fahrt durch blau angereichertes Licht aktiviert werden, während Frühaufsteher

abends wach und aktiv gehalten werden. Mit Blick auf autonomes Fahren und die Vision vom mobilen Arbeits- und Lebensraum kann dieser Anwendungsfall erweitert werden. Kaltweißes Licht könnte gezielt dazu verwendet werden, um die *Alertness* und höhere kognitive Funktionen der Insassen zu stabilisieren bzw. zu erhöhen. Abends könnte der Blauanteil des Lichtspektrums reduziert werden, um den Passagieren bei entspannten Tätigkeiten weiterhin die Orientierung im Innenraum zu ermöglichen und die circadiane Rhythmik dabei möglichst wenig zu beeinflussen. Die potentiellen Anwendungsfälle für autonomes Fahren lassen sich entsprechend auf chauffierte Fahrten übertragen. Abbildung 3.5 zeigt, wie ein *Alertness* steigerndes Szenario in einem autonomen Fahrzeug aussehen könnte.

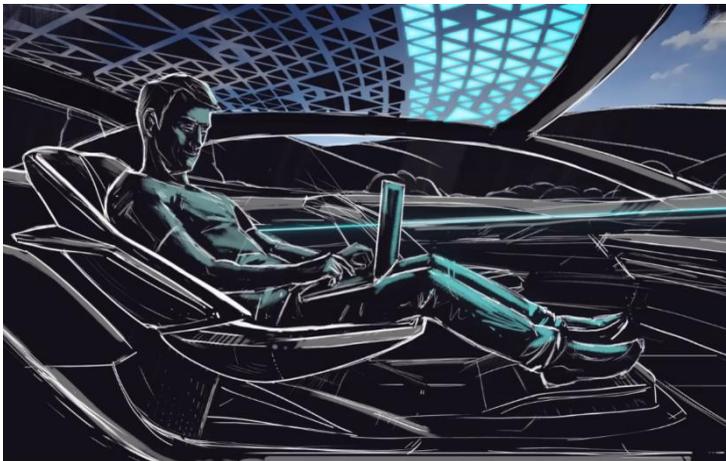


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung einer autonomen Fahrt in der Zukunft. Das bläuliche Licht trägt durch seine aktivierende Wirkung zu einem produktiven Ambiente bei.

Kapitel 4

PROBANDENSTUDIEN

Im vorherigen Kapitel wurde aufgezeigt, dass der Einfluss des Raumwinkels eine mögliche Forschungslücke in der wissenschaftlichen Diskussion zur nicht-visuellen Lichtwirkung darstellt. Weiterhin wurde das Pendeln zur und von der Arbeit als potentieller Anwendungsfall für nicht-visuelle Effekte im Automobil herausgearbeitet. Um den Einfluss des Raumwinkels und die Eignung des Pendelns als Anwendungsfall zu analysieren, bilden beide Punkte die Eckpfeiler dreier im Rahmen dieser Arbeit durchgeführter Studien, deren Methodik und Resultate nachfolgend vorgestellt werden.

Bei jeder Studie wird eingangs auf die zentrale Fragestellung bzw. den jeweiligen Forschungsschwerpunkt eingegangen. Davon abhängig werden Hypothesen formuliert, welche mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Methodik untersucht werden. Abschließend folgen eine Datenanalyse und Ergebnisdiskussion.

Teile der ersten, in Abschnitt 4.1 vorgestellten Studie wurden in [222] veröffentlicht. Die Datenerhebung der zweiten, in Abschnitt 4.2 beschriebenen Studie fand im Rahmen einer Bachelorarbeit statt (siehe [223]). Die Studienergebnisse wurden inklusive der in Kapitel 3.2 gezeigten Simulationen in [211] publiziert.

4.1 EINFLUSS DES RAUMWINKELS AUF DIE NICHT-VISUELLE LICHTWIRKUNG

4.1.1 FORSCHUNGSSCHWERPUNKT

Der Einfluss unterschiedlicher lichttechnischer und zeitlicher Parameter auf nicht-visuelle Effekte wurde bereits in den Abschnitten 2.4 und 2.5 beschrieben. Aus den Abschnitten 3.1.2 und 3.2 geht jedoch hervor, dass viele Studien die Rolle des Raumwinkels vernachlässigt haben. Dabei ist diese Fragestellung nicht nur in Bezug auf das nachträgliche Replizieren einer Lichtsituation relevant. Die Simulationen aus Abschnitt 3.2 haben gezeigt, dass zwei unterschiedlich große und helle Lichtquellen die gleiche Beleuchtungsstärke am Auge einer Person erzeugen können, während sich die retinalen Abbildungen völlig voneinander unterscheiden. Wie in Abschnitt 3.2 diskutiert, kann sich dies auf die Ausprägung der nicht-visuellen Lichtwirkung auswirken. Die erste zentrale Fragestellung lautet daher, ob und wie der Raumwinkel zweier unterschiedlicher Lichtquellen, welche die gleiche Beleuchtungsstärke am Auge einer Person erzeugen, das Ausmaß nicht-visueller Effekte beeinflusst.

Die Eigenschaften der zur Untersuchung dieser Frage verwendeten Lichtquellen orientieren sich dabei an verschiedenen Parametern. Zum einen müssen bauraumseitige Einschränkungen im Fahrzeuginnenraum berücksichtigt werden. Dadurch soll abgeschätzt werden können, ob es ausreicht im Fahrzeug vorhandene Lichtquellen zu

modifizieren, um nicht-visuelle Effekte auszulösen, oder ob hierzu neu gestaltete Leuchten nötig sind. Zum anderen werden lichttechnische Parameter herangezogen, welche sich bereits in der Vergangenheit als effektiv erwiesen haben, um nicht-visuelle Effekte hervorzurufen (vgl. Abschnitt 2.4). Hierbei muss jedoch der visuelle Komfort berücksichtigt werden, um Blendung zu vermeiden. Um die grundlegende Lichtwirkung analysieren zu können, wird ergänzend untersucht, wie sich helles Licht im Vergleich zu einer dunklen Lichtsituation auf nicht-visuellen Effekte auswirkt.

Nun zum Anwendungsfall bzw. zum Kontext, in dem die Probandenstudie durchgeführt wird. In Abschnitt 3.3 wurde dargestellt, dass das Automobil primär zum Pendeln zur und von der Arbeit genutzt wird. Weiterhin wurde aufgezeigt, dass sich Monotonie beim selbstständigen oder teilautonomen Fahren negativ auf Müdigkeit und Vigilanz auswirkt. Dieser durch eine monotone Aufgabe verursachten Müdigkeit könnte mit Licht entgegengewirkt werden. Weiterhin könnte Licht im Kontext einer vollautonomen oder chauffierten Fahrt dazu genutzt werden, um Phasen der Produktivität zu unterstützen. Die zweite zentrale Fragestellung lautet daher, ob Licht im Kontext des Pendelns bzw. einer monotonen Aufgabe dazu genutzt werden kann, um die subjektive und objektive *Alertness* sowie höhere kognitive Funktionen von Fahrzeuginsassen positiv zu beeinflussen.

Um die phasenverschiebende Lichtwirkung gering zu halten, wird die Frage im Rahmen eines morgens bzw. vormittags stattfindenden Szenarios untersucht (niedriger Melatoninspiegel, vgl. Abschnitt

2.3.1). Im Vergleich zu vielen Untersuchungen aus Kapitel 2.4, wird die hier vorgestellte Studie unter weniger strengen kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Dadurch soll der Ergebnistransfer in die Praxis unkomplizierter gestaltet werden, auch wenn das Auffinden potentieller nicht-visueller Effekte aufgrund zusätzlicher, unkontrollierter Einflussfaktoren erschwert wird.

4.1.2 HYPOTHESEN

Aus den zuvor formulierten Fragestellungen inklusive Ergänzungen lassen sich zwei unabhängige Variablen (UV) und drei abhängige Variablen (AV) ableiten. Darauf aufbauend werden wiederum die zu überprüfenden Hypothesen aufgestellt. Die unabhängigen Variablen sind das Lichtszenario und der Messzeitpunkt, wobei beim Lichtszenario sowohl zwischen Licht/kein Licht, als auch zwischen großer/kleiner Raumwinkel unterschieden wird. Die abhängigen Variablen sind die subjektive und verhaltensbezogene *Alertness*, sowie verhaltensbezogene Merkmale höherer kognitiver Funktionen.

Im Hinblick auf die zeitliche Komponente wird erwartet, dass die Ausprägungen der AV nach einer monotonen Nebenaufgabe negativer ausfällt als davor. Bei kurz aufeinander folgenden Messzeitpunkten nach der monotonen Nebenaufgabe wird allerdings keine schwankende Ausprägung der AV erwartet. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, kann sich Licht positiv auf subjektive und verhaltensbezogene Merkmale der *Alertness* auswirken. Im Vergleich zu einem

Szenario ohne helles Licht wird daher davon ausgegangen, dass die Ausprägung der AVs bei Szenarien mit hellem Licht positiver ausfällt. Ob im Vergleich der Szenarien mit hellem Licht Unterschiede zu beobachten sind, welche sich auf verschiedene Raumwinkel zurückführen lassen, ist aufgrund der bisherigen Studienlage unklar. Davon ausgehend, dass die zuvor genannten Begriffe „positiver“ bzw. „negativer“ mit wacher, aufmerksamer und leistungsfähiger bzw. mit den entsprechenden Gegenteilen in Verbindung gebracht werden, lassen sich die nachfolgenden Alternativhypothesen formulieren.

- H_{1.1}: Die Ausprägung der AV fällt direkt nach einer monotonen Nebenaufgabe negativer aus als davor.
- H_{1.2}: Nach einer monotonen Nebenaufgabe variiert die Ausprägung der AV über kurz aufeinander folgende Messzeitpunkte.
- H_{1.3}: Die Ausprägung der AV fällt mit hellem Licht positiver aus als ohne helles Licht.
- H_{1.4}: Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert die Ausprägung der AV in Abhängigkeit des Raumwinkels einer Lichtquelle.

Wie an den Hypothesen zu erkennen ist, wurde je Faktor (Messzeitpunkt und Lichtszenario) eine gerichtete und eine ungerichtete Hypothese aufgestellt. Aus diesen lassen sich wiederum Hypothesen zu Interaktionseffekten formulieren, welche besonders im Hinblick auf eine zeitlich verzögerte Lichtwirkung interessant sind.

- H_{1.5}: Die Ausprägung der AV fällt direkt nach einer monotonen Nebenaufgabe negativer aus als davor. Dabei fällt sie mit hellem Licht weniger negativ aus als ohne.
- H_{1.6}: Die Ausprägung der AV fällt direkt nach einer monotonen Nebenaufgabe negativer aus als davor. Bei hellem Licht und gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert die AV dabei in Abhängigkeit des Raumwinkels der Lichtquelle.
- H_{1.7}: Nach einer monotonen Nebenaufgabe variiert die Ausprägung der AV über kurz aufeinander folgende Messzeitpunkte. Dabei fällt sie mit hellem Licht weniger negativ aus als ohne.
- H_{1.8}: Nach einer monotonen Nebenaufgabe variiert die Ausprägung der AV über kurz aufeinander folgende Messzeitpunkte. Bei hellem Licht und gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert die AV dabei in Abhängigkeit des Raumwinkels der Lichtquelle.

Bei allen zuvor genannten Hypothesen lässt sich die Bezeichnung AV durch das entsprechende Merkmal nicht-visueller Effekte austauschen. Wie bereits erwähnt sind dies die subjektive und verhaltensbezogene *Alertness* sowie verhaltensbezogene Merkmale höherer kognitiver Funktionen. Im Hinblick auf den visuellen Komfort bzw. die Blendung wird eine weitere Hypothese formuliert:

- H_{1.9}: Bei konstanter Beleuchtungsstärke am Auge sinkt die Blendwirkung mit zunehmendem Raumwinkel einer Lichtquelle.

4.1.3 METHODE

4.1.3.1 STUDIENDESIGN & STICHPROBE

Um den Einfluss unterschiedlicher Lichtszenarien auf das einzelne Individuum zu analysieren, wurde ein *within-subject* Design für diese Studie gewählt. Insgesamt durchlief jede Versuchsperson drei Lichtszenarien:

Das erste Szenario ist von einem Pendler inspiriert, der während der Dämmerung und ohne zusätzliches, helles Licht zur Arbeit fährt bzw. gefahren wird. Um dennoch ein gewisses Maß an Orientierung zu ermöglichen, wurde gedimmtes Hintergrundlicht mit einer Farbtemperatur von 2200 K zur Verfügung gestellt, welches eine in Blickrichtung gemessene Beleuchtungsstärke von 12 lx am Auge der Probanden erzeugte. Das Szenario wurde dazu verwendet, um ein Ausgangsniveau zu ermitteln, welches als Referenz für die anderen beiden Szenarien diente. Da die zum Auslösen nicht-visueller Effekte angedachten Leuchten in diesem Szenario ausgeschaltet waren, wird es nachfolgend **Leuchte aus** genannt.

Neben dem Hintergrundlicht wurden zusätzliche Leuchten während dem zweiten und dritten Szenario eingeschaltet. Konkret handelte es sich um unterschiedlich große und schräg oberhalb der Probandenköpfe verortete Lichtquellen. Im zweiten Szenario wurde eine kleine Leuchte verwendet, deren wahrgenommene Größe von einer Make-Up Leuchte inspiriert ist, welche im Fond eines Audi A8 verbaut

wird. Aus Sicht der Versuchspersonen wurde die Leuchte unter einem Raumwinkel von $0,05$ sr wahrgenommen. Das zweite Szenario wird im weiteren Verlauf der Arbeit als **kleine Leuchte** bezeichnet. Die Größe der beim dritten Szenario verwendeten Leuchte orientiert sich an den bauraumseitigen Einschränkungen im Dachhimmel eines Audi A8, sodass sie aus Sicht der Versuchspersonen einen Raumwinkel von $0,44$ sr einnahm. Daher wird das dritte Szenario nachfolgend **große Leuchte** genannt. Im zweiten und dritten Szenario wurden die Lichtquellen jeweils so eingestellt, dass sie bei einer Farbtemperatur von 6500 K eine Beleuchtungsstärke von 200 lx am Auge der Probanden erzeugten. Basierend auf einer von Weng et al. durchgeführten Vorstudie, bei der der Einfluss einer modifizierten Audi A8 Schminkspiegelleuchte auf nicht-visuelle Effekte untersucht wurde, wurde die Beleuchtungsstärke auf 200 lx limitiert (vgl. [224]). Hierdurch sollte Blendung vermieden werden. Eine detaillierte Beschreibung der Leuchten und der Versuchsumgebung folgt in Abschnitt 4.1.3.2.

Die Dauer eines Versuchsdurchlaufs betrug 85 Minuten, wovon 35 Minuten auf das entsprechende Lichtszenario entfielen. Begonnen wurden die einzelnen Versuchsdurchläufe entweder um $08:30$ oder um $10:30$ Uhr. Um den Einfluss unterschiedlicher Startzeiten auf nicht-visuelle Effekte zu eliminieren, mussten sich die Versuchspersonen zu Beginn der Studie auf einen Slot festlegen. Zudem wurde darauf geachtet, dass mindestens ein Tag Pause zwischen den einzelnen Durchläufen lag. Damit die Reihenfolge der Lichtszenarien nicht die Ergebnisse beeinflusste, wurden *counterbalancing* Maßnahmen bei Festlegung der Präsentationsreihenfolge für einzelne Probanden

verwendet. Einige der Teilnehmer hatten eine Affinität zur Lichttechnik im Allgemeinen, jedoch keinerlei Erfahrung mit nicht-visueller Lichtwirkung. Die Probanden waren freiwillig teilnehmende Mitarbeiter der Audi AG.

Mit Blick auf den individuellen Chronotypen mussten interessierte Teilnehmer vor Studienbeginn die deutsche Version des *Morningness-Eveningness-Questionnaire* ausfüllen [225]. Hierdurch sollte das Probandenkollektiv homogenisiert werden, indem Chronotypen mit der Ausprägung „extremer Morgentyp“ oder „extremer Abendtyp“ von der Studienteilnahme ausgeschlossen wurden (vgl. Abschnitt 2.3.; Lerchen & Eulen). Insgesamt nahmen 32 Testpersonen (23 männlich, 9 weiblich) an der Probandenstudie teil. Ihr Durchschnittsalter betrug $32,3 \pm 7,7$ (*SD*) Jahre.

Das Studiendesign und die damit zusammenhängende Mitarbeiterbefragung wurden vom Betriebsrat der Audi AG genehmigt. Die Durchführung der Studie erfolgte im Februar und März 2019.

4.1.3.2 VERSUCHSUMGEBUNG

Durch geringe Einschränkungen bei der Probandenauswahl und die Tageszeit der Studiendurchführung wurden zwei Anforderungen an ein alltägliches Versuchsdesign erfüllt. Um jedoch aus lichttechnischer Sicht besser kontrollierbare Versuchsbedingungen zu gewährleisten, wurde die Studie nicht in einem Fahrzeug, sondern in einem Labor mit nachgestellten Büroarbeitsplätzen durchgeführt. Die

dadurch entstandene Versuchsumgebung, kann mit einer abstrahierten chauffierten oder autonomen Fahrt verglichen werden.

Zur Realisierung der Versuchsumgebung wurden drei voneinander abgeschirmte Kabinen aufgebaut, welche jeweils einen Büroarbeitsplatz inklusive einem schräg überkopf montierten Lichtpanel beinhalteten. Die Position des Lichtpanels orientierte sich an den zuvor erwähnten Gegebenheiten im Fond eines Audi A8. Dazu später mehr. Die Kabinen selbst bestanden aus einem ca. $2,5 \times 2,5 \times 2,0$ m (B \times T \times H) großen Holzgerüst, welches von innen mit schwarzem Molton Stoff ausgekleidet wurde. Dadurch wurde das Eindringen von äußerem Licht ins Innere der Kabinen vermieden. Abbildung 4.1 zeigt den Büroarbeitsplatz, welcher mit einem Schreibtisch, einem Laptop mit Bildschirm und sonstiger Bedienperipherie, einem höhenverstellbaren Bürostuhl, einer auf dem Tisch positionierten Nachttischlampe sowie dem schräg überkopf montierten Lichtpanel ausgestattet wurde. Mit Hilfe der Nachttischlampe wurde das Hintergrundlicht erzeugt, welches ständig eingeschaltet blieb. Das überkopf montierte Lichtpanel wurde zur Visualisierung der Szenarien *kleine Leuchte* und *große Leuchte* verwendet. Im Szenario *Licht aus* blieb das Lichtpanel ausgeschaltet.

Die Lichtpanels selbst wurden speziell zur Durchführung der Studie konzipiert und gefertigt. Als Lichtquelle fungierten 840 LEDs, welche in 140 Gruppen auf vier, auf einem flächigen Kühlkörper montierte Platinen aufgeteilt wurden. Die LED Gruppen wurden in Form einer 10×14 Matrix verteilt, wobei der Pitch zwischen den Gruppen jeweils 40 mm betrug. Jede LED Gruppe bestand aus 6 LEDs der Firma

Osram (2x Synios KB DMLN31.13 in Blau, 2x Synios KY DMLQ31.FY in Gelb, 1x Duris GD PSLR31.13 in Blau und 1x Duris GT PSLR 31.13 in Grün). Als Steuerprotokoll wurde DMX verwendet. Jeder Farbkanal bzw. jeder LED-Typ konnte individuell angesteuert werden.



Abbildung 4.1: Versuchsumgebung mit Büroarbeitsplatz und überkopf Lichtpanel, welches das Szenario *große Leuchte* zeigt (aus [222])

Eingefasst in einem schwarzen Gehäuse wurde eine weiße, transluzente und 3 mm dicke Kunststoffscheibe (Plexiglas GS WH02 GT) vor der LED-Matrix positioniert. Die Scheibe diente zur Farbdurchmischung und Homogenisierung des Erscheinungsbilds der Leuchtfläche. Ihr Abstand zu den LEDs war flexibel einstellbar. Zusätzlich verfügte das Gehäuse über eine Aufnahme für

unterschiedliche Maskierungen. Je nach verwendeter Maskierung wurden unterschiedliche Raumwinkel mit ein und derselben Lichtquelle realisiert. Für das kleine Szenario wurde eine Maske mit einer 145 mm breiten und 190 mm hohen Lichtaustrittsfläche verwendet, während die Austrittsfläche für das große Szenario 560 mm breit und 400 mm hoch war. Die Lichtaustrittsfläche für die kleine Leuchte wurde an der unteren Kante der Maske positioniert (siehe Abbildung 4.2). Aus Sicht der Probanden und unter Berücksichtigung der in Abbildung 4.3 dargestellten geometrischen Bedingungen erschien die kleine Leuchtfläche unter einem Raumwinkel von 0,05 sr, während die große Leuchtfläche einen Raumwinkel von 0,44 sr einnahm.

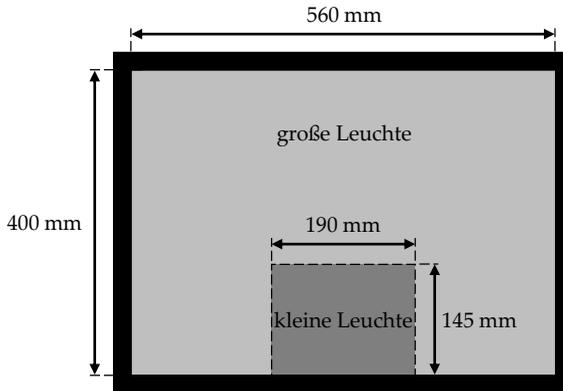


Abbildung 4.2: Maße der für die Szenarien klein und groß verwendeten Leuchtfläche inklusive Positionierung der kleinen Leuchtfläche

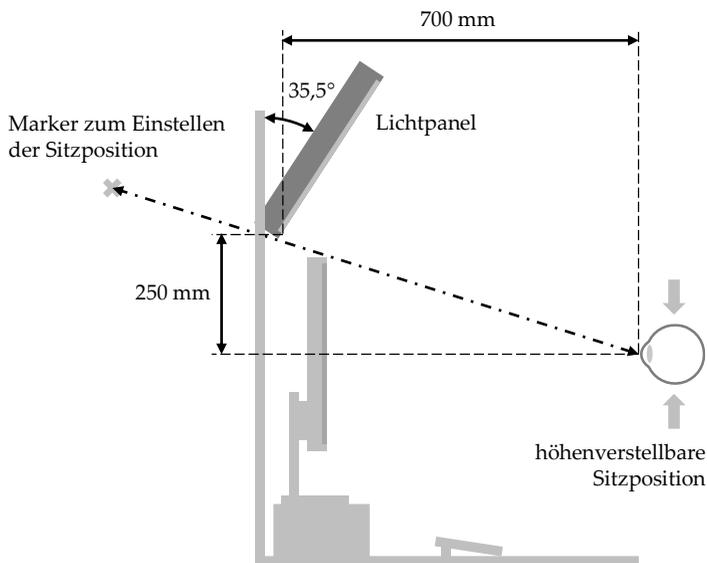


Abbildung 4.3: Schematische Visualisierung der Sitzposition, in welcher die Probanden vor der Versuchsleuchte saßen

Die Positionierung des Lichtpanels und insbesondere der kleinen Leuchtfläche orientierte sich an einer modifizierten Audi A8 Make-Up Leuchte, welche durch ein großflächigeres Licht ergänzt wurde (vgl. [224]). Bei dieser Leuchte wurde das nach fahrzeugvorne fallende Licht durch einen Spiegel zurückgeworfen und auf den Passagier im Fond umgelenkt (siehe Abbildung 4.4). Durch Reflexion war die Leuchtfläche ebenfalls im Spiegel zu sehen, sodass die wahrgenommene Leuchtfläche vergrößert wurde. Der dabei wahrgenommene Raumwinkel wurde als Referenz für das Szenario *kleine Leuchte* verwendet.



Abbildung 4.4: Modifizierte Audi A8 Make-Up Leuchte mit ausgeklapptem Spiegel zur Maximierung der wahrgenommenen Leuchtfläche (aus [224])

Um über verschiedene Testpersonen und Versuchsdurchläufe hinweg möglichst konstante Kopfpositionen gewährleisten zu können, mussten die Probanden vor dem Start eines jeden Szenarios ihre Sitzposition einstellen. Dazu wurden sie gebeten sich mittig zum Bildschirm bzw. Lichtpanel hinzusetzen und mit dem Stuhl so weit nach vorne zu rutschen, bis ihr Bauch die Tischkante berührte. Dadurch wurde eine horizontale Entfernung von ca. 700 mm zum Tisch eingenommen. Anschließend mussten sie die Höhe ihres Stuhls so justieren, dass sie eine an der Rückwand der Kabine angebrachte Markierung gerade so an der Unterkante des Lichtpanels sehen konnten (siehe Abbildung 4.3). Richtig eingestellt ergab sich ein vertikaler

Abstand von 250 mm zur Unterkante des Lichtpanels. Der auf dem Tisch positionierte Bildschirm wurde so eingestellt, dass die Probanden bei richtiger Sitzposition und horizontaler Blickrichtung ins Zentrum des Bildschirms blickten.

Wie bereits erwähnt wurden die Lichtpanels in den Szenarien *kleine Leuchte* und *große Leuchte* auf jeweils 200 lx am Auge eingestellt, während die Farbtemperatur 6500 K betrug. Die Spektren der Versuchsluchten wurden mit einem Gigahertz-Optik BTS25-EF Spektrometer vermessen. Tabelle 4.1 zeigt die gemessenen Beleuchtungsstärken, Farbtemperaturen, photopigmentspezifischen Bestrahlungsstärken sowie die Beleuchtungsstärken eines D65 Normlichts, welches nötig wäre, um ipRGCs genauso stark wie die Studienleuchten zu stimulieren (*melanopic-EDI*; vgl. Abschnitt 3.1.2). Abbildung 4.5 visualisiert die gemessenen Spektren.

Tabelle 4.1: Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur, photopigmentspezifische Bestrahlungsstärke & m-EDI der verwendeten Lichtquellen (nach [226])

Größe	Einheit	Lichtquelle		
		Nachttischlampe	kleine Leuchte	große Leuchte
Beleuchtungsstärke	lx	11,77	198,38	200,54
Farbtemperatur	K	2162	6528	6442
<i>S-cone-opic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	1,27	170,29	164,86
<i>M-cone-opic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	12,50	278,25	281,81
<i>L-cone-opic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	19,68	318,59	321,11
<i>Rhodopic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	6,65	254,77	256,01
<i>Melanopic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	4,55	222,33	221,72
<i>Melanopic-EDI</i>	lx	3,43	167,64	167,18

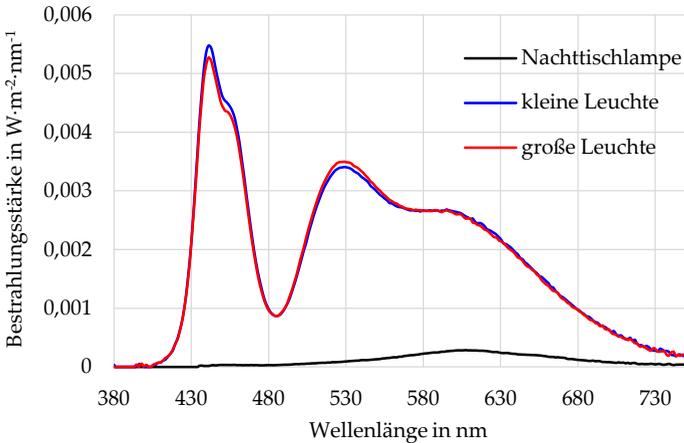


Abbildung 4.5: Spektraldiagramm der Studienleuchten (Nachtischlampe, kleine Leuchte, große Leuchte)

4.1.3.3 MESSGRÖßEN

Zum Analysieren der nicht-visuellen Lichtwirkung auf die Probanden, wurden im Rahmen dieser Studie sowohl subjektive, als auch objektive, verhaltensbezogene Daten erhoben. Hierzu wurden Fragebögen und Tests verwendet, welche in der Vergangenheit bereits bei anderen Studien zum Einsatz kamen (vgl. Kapitel 2.3.3 & 2.4).

Subjektive Daten wurden mit Hilfe von Fragebögen in Papierform erhoben, welche unterschiedliche Schwerpunkte abdeckten. Neben Fragen zur *Alertness* und Schläfrigkeit wurden auch Fragen zum allgemeinen Wohlbefinden, sowie zur wahrgenommenen Lichtqualität gestellt. Am Ende der Versuchsdurchläufe musste außerdem ein Fragebogen zur nicht-visuellen Lichtwirkung beantwortet werden.

Die Bewertung der subjektiven Müdigkeit erfolgte mittels KSS (neunstufige Skala; „1 - extrem wach“ bis „9 - extrem müde“) und VAS, welche bereits in Abschnitt 2.3.3 genannt wurden. Eine zweite VAS wurde eingesetzt, um den Entspannungsgrad der Versuchspersonen abzufragen. Die verwendeten VAS hatten eine Länge von 16 cm (0 cm = sehr schläfrig/entspannt, 16 cm = sehr wach/angespannt).

Das subjektive Wohlbefinden wurde über den mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragenbogen (MDBF) ermittelt [227]. Beim MDBF handelt es sich um einen aus zwölf (kurze Version) oder 24 Items (lange Version) bestehenden Fragebogen zur Messung der aktuellen psychischen Befindlichkeit. Über Items wie z.B. „zufrieden“, „ruhelos“ oder „munter“ wird zum einen gute/schlechte Stimmung (GS), Ruhe/Unruhe (RU), aber auch Wachheit/Müdigkeit (WM) abgefragt. Bei jedem Item haben die Probanden die Möglichkeit ihren aktuellen Gemütszustand mit Hilfe einer fünfstufigen Skala von „1 - überhaupt nicht“ bis „5 - sehr“ zu bewerten. Die Daten werden dabei so transkribiert, dass ein hoher Wert eine positive Stimmungslage beschreibt. Im Rahmen dieser Studie wurden je vier Items der Kategorien gute/schlechte Stimmung und Ruhe/Unruhe verwendet, während alle Items der Kategorie Wachheit/Müdigkeit abgefragt wurden. Insgesamt mussten die Versuchspersonen also 16 Items bewerten. Je nach Kategorie variierte die erreichbare Punktzahl zwischen 4 und 20 bzw. 8 und 40.

In der dritten Kategorie wurde mit Hilfe von siebenstufigen Likert Skalen die wahrgenommene Lichtqualität im jeweiligen Szenario abgefragt. Likert Skalen sind graduelle Antwortskalen, mit deren Hilfe die Einstellung von Testpersonen zu einem bestimmten Merkmal

analysiert wird. Typischerweise besitzen Likert Skalen eine neutrale oder weder noch Antwortoption. Im Rahmen dieser Studie wurde so die Helligkeit, die Farbtemperatur, die Größe und Position der Leuchte im Sichtfeld, aber auch die allgemeine Wirkung des Lichts (angenehm/unangenehm, gemütlich/ungemütlich oder aktivierend/ermüdend) bewertet. In diesem Fragenteil mussten die Probanden außerdem ihr Blendempfinden mit Hilfe einer inversen De Boer Skala bewerten (siehe z.B. [228]). Die Antwortmöglichkeiten reichten von „1 - gerade bemerkbar“ bis „9 - unerträglich“.

Zu guter Letzt kam ein Abschlussfragebogen zum Einsatz, welcher am Ende eines jeden Szenarios ausgefüllt werden musste. Der Abschlussfragebogen beinhaltete Fragen zur nicht-visuellen Lichtwirkung, wie z.B. „Hatten Sie das Gefühl durch die Beleuchtung wacher geworden zu sein?“ oder „Hätten Sie eine höhere Helligkeit für einen größeren leistungssteigernden Effekt akzeptiert?“. Als Antwortmöglichkeiten standen den Versuchspersonen „ja“, „ein bisschen“ oder „nein“ zur Verfügung. Zudem wurde den Testpersonen im Abschlussfragebogen die Möglichkeit gegeben eine allgemeine Anmerkung zum Licht oder der Studie abzugeben.

Zur Erhebung objektiver Daten wurde die Open Source Software *Psychology Experiment Building Language* (PEBL) von Mueller und Piper zur Hilfe gezogen (siehe [229]), indem zwei ihrer modifizierbaren Tests verwendet wurden. Beim ersten Test handelte es sich um einen PVT (vgl. Abschnitt 2.3.3), welcher zur Analyse der Daueraufmerksamkeit herangezogen wird. Der zweite Test war ein *forward digit span task* (FDST), ein Merkfähigkeitstest, welcher unter anderem von

Huiberts et al. verwendet wurde (vgl. [140]). Mit Hilfe des FDST sollte eine Aussage über die Kapazität des Arbeits- & Kurzzeitgedächtnisses der Probanden getroffen werden.

Zur Quantifizierung der Daueraufmerksamkeit müssen Testpersonen beim PVT auf einen in unregelmäßigen Abständen wiederkehrenden Reiz reagieren, während dabei ihre Reaktionsgeschwindigkeit gemessen wird. Im Fall dieser Studie wurde ein optischer Reiz in Form eines roten Kreises verwendet. Aufgabe der Probanden war es so schnell wie möglich die Leertaste ihrer Tastatur zu drücken, sobald der rote Kreis im Zentrum des schwarzen Bildschirms erschien. Nach erfolgtem Tastendruck verschwand der Kreis. Anschließend wurde die Reaktionszeit kurz angezeigt sowie für 400 ms ein kleines, weißes Kreuz zur erneuten Blickfokussierung eingeblendet, bevor der nächste rote Punkt erschien. Das Intervall zwischen dem Erscheinen zweier Punkte wurde zufällig zwischen zwei und zehn Sekunden variiert. Die Gesamtdauer des PVT betrug fünf Minuten. Üblicherweise dauern PVTs zehn Minuten, wobei fünf Minuten ausreichend sind, um valide Ergebnisse zu erhalten [230].

Beim Merkfähigkeitstest bzw. FDST wurden den Versuchspersonen nacheinander einzelne Ziffern einer zufällig generierten Zahlenreihe gezeigt, die sie sich merken mussten. Die zwischen null und neun liegenden Ziffern, welche ein Mal pro Zahlenfolge verwendet wurden, wurden in Weiß im Zentrum des schwarzen Bildschirms präsentiert. Aufgabe der Probanden war es die Zahlenfolge in der richtigen Reihenfolge per Tastatureingabe wiederzugeben. Dabei konnten sie nicht gemerkte Ziffern überspringen und falsche Eingaben

korrigieren. Bei richtiger Eingabe wurde der Schwierigkeitsgrad der Merkfähigkeitsaufgabe erhöht, indem die zu merkende Folge um eine Ziffer länger wurde. Bei falscher Eingabe erhielten die Probanden eine zweite Chance zur richtigen Eingabe, bei der sie sich eine neue, zufällig generierte Zahlenfolge des aktuellen Schwierigkeitsgrades merken mussten. Nach zwei falschen Eingaben wurde der Test abgebrochen. Der Test begann mit einer aus drei Ziffern bestehenden Zahlenfolge. Die maximale Länge der Zahlenfolge lag bei neun Ziffern. Die Länge wurde hier auf neun Ziffern begrenzt, da ein durchschnittlicher Mensch nur 7 ± 2 Informationseinheiten im Kurzzeitgedächtnis halten kann [231]. Die einzelnen Ziffern wurden jeweils 1500 ms präsentiert. Die Pause zwischen der Präsentation zweier Ziffern betrug 500 ms.

Wie beim PVT und FDST beschrieben, wurden die verwendeten Schriftzeichen und Symbole (weiß oder rot) auf einem schwarzen Bildschirm präsentiert. Aus Probandensicht erzeugte der Bildschirm eine Beleuchtungsstärke von 0,02 lx. Aufgrund dessen wird der Einfluss des Bildschirms in der weiteren Betrachtung vernachlässigt. Die in dieser Studie verwendeten Fragebögen (inkl. Informationsblatt) sind in Anhang B.1 zu finden.

4.1.3.4 ABLAUF

Da drei voneinander abgetrennte Versuchsumgebungen zur Verfügung standen, konnten bis zu drei Probanden den Versuch parallel

zueinander durchführen. Am Vortag der Versuchsdurchführung wurden die Probanden gebeten ihre übliche Zubettgehzeit beizubehalten. Ebenfalls wurden sie gebeten am Vor- sowie Versuchstag den Koffeinkonsum auf ihrem üblichen Niveau zu halten. Weitere Einschränkungen gab es nicht. Am Tag der Versuchsdurchführung trafen die Testpersonen zur vereinbarten Uhrzeit im Labor ein (08:30 oder 10:30 Uhr). Nach einer Begrüßung durften sie in der ihnen zugewiesenen Kabine Platz nehmen und mussten ihre Sitzposition einstellen (siehe Abschnitt 4.2.3.2). Anschließend begann der Versuch, dessen Ablauf in Abbildung 4.6 dargestellt wird.

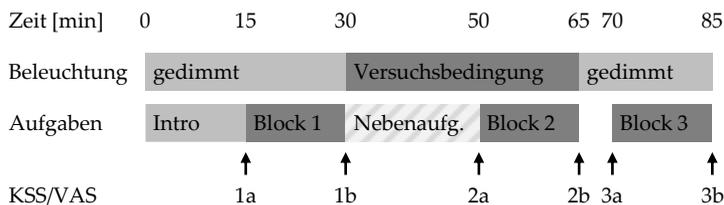


Abbildung 4.6: Versuchsablauf mit drei Testblöcken und einer monotonen Nebenaufgabe. Das gedimmte Hintergrundlicht ist zu Beginn und am Ende des Versuchs eingeschaltet. Dazwischen variiert die Beleuchtung je nach Versuchsbedingung (*Leuchte aus, kleine Leuchte* oder *große Leuchte*).

Zu Versuchsbeginn wurde 30 Minuten lang das gedimmte Hintergrundlicht (warmweiße Nachttischleuchte) eingeschaltet. Hiervon wurden die ersten 15 Minuten für einen Intro-Block genutzt. Während der ersten Versuchsdurchführung füllten die Probanden dabei eine Einverständniserklärung aus, beantworteten demographische Fragen und erstellten ihren Probandencode, welcher zur

Anonymisierung der Daten diene. Zudem durften sich die Probanden mit den Fragebögen (KSS, VAS & MDBF) vertraut machen und stark gekürzte Versionen der späteren Leistungstests (PVT & FDST) durchführen. Die restliche Zeit des Intro-Blocks wurde zur Adaptation der Augen an die neuen Lichtverhältnisse genutzt.

Im Anschluss folgte der erste vollständige Testblock (Block 1 in Abbildung 4.6) mit einer Dauer von 15 Minuten. Dieser begann mit KSS und VAS (1a in Abbildung 4.6). Anschließend mussten PVT und FDST am Bildschirm bearbeitet werden. Nach Beendigung der Leistungstests wurde der MDBF zum ersten Mal ausgefüllt, bevor zum Abschluss von Block 1 erneut KSS und VAS (1b in Abbildung 4.6) beantwortet werden mussten. Danach warteten die Probanden auf weitere Instruktionen der Versuchsleitung.

Nach 30 Minuten begann das eigentliche Versuchsszenario und je nach Lichtintervention wurde das in den Kabinen positionierte Lichtpanel von außen eingeschaltet (Szenarien *kleine Leuchte* und *große Leuchte*). Beim Szenario *Leuchte aus* blieb das Lichtpanel ausgeschaltet. Hier wurden die Probanden außerdem gebeten mit der monotonen Nebenaufgabe zu starten. Dabei mussten die Probanden 20 Minuten lang eine Naturdokumentation auf ihrem Bildschirm anschauen. Diese wurde gezielt ohne Ton gezeigt, um eine möglichst monoton zu sein. Von Termin zu Termin durfte die Dokumentation weitergeschaut werden. Mögliche Einflüsse der Dokumentation auf die Studienergebnisse wurden nicht erwartet. Falls bestimmte Passagen allerdings doch eine Wirkung gehabt haben sollte, wurde ihr Einfluss durch *counterbalancing* der Lichtinterventionen eliminiert.

Nach 20-minütiger Lichtexposition wurden die Testpersonen gebeten die Naturdokumentation zu beenden und mit dem zweiten Testblock zu beginnen. Dieser verlief analog zum ersten Testblock, wurde jedoch durch einen Fragebogen zur Lichtqualität ergänzt, welcher nach dem MDBF und vor KSS/VAS 2b ausgefüllt werden musste. Am Schluss des Blocks bzw. nach 35 Minuten Lichtexposition wurde das Lichtpanel ausgeschaltet, falls es in Betrieb war.

Nach dem zweiten Testblock folgte eine fünfminütige Pause bei gedimmbtem Hintergrundlicht, bevor mit dem dritten Testblock begonnen wurde. Auch dieser verlief ähnlich zum ersten Block, wurde allerdings durch einen Abschlussfragebogen ergänzt, welcher nach dem MDBF und vor KSS/VAS 3b ausgefüllt werden musste. Sobald alle Probanden den Versuch beendet hatten, durften sie die Versuchskabine und das Labor verlassen.

4.1.3.5 STATISTISCHE ANALYSE

Während die Daten des PVT und FDST nach Studienabschluss bereits in digitaler Form vorlagen, mussten die mittels Fragebögen erhobenen Daten per Hand digitalisiert werden. Nach vollständiger Digitalisierung erfolgte die Aufbereitung und Auswertung der erhobenen Daten mit Hilfe der Programmiersprache R (Version 3.6.3) [232] und der RStudio Entwicklungsumgebung (Version 1.3.1093) [233]. Das Studiendesign entsprach einem zweifaktoriellen Versuchsdesign mit Messwiederholung, sodass ein lineares gemischtes Modell zur

inferenzstatistischen Analyse verwendet wurde. Die Vorgehensweise orientiert sich an der von Field et al. vorgeschlagenen Methodik für zweifaktorielle Designs mit Messwiederholung [234].

Zu Beginn wurden die Daten dabei deskriptiv ausgewertet und visualisiert. Basierend auf den zuvor formulierten Hypothesen wurden anschließend orthogonale und nicht-orthogonale Kontraste zur inferenzstatistischen Analyse aufgestellt (siehe Tabellen 4.2 & 4.3).

Tabelle 4.2: Orthogonale Kontraste für den Faktor Lichtszenario

Lichtszenario	Kontrast 1	Kontrast 2
Leuchte aus	-2	0
kleine Leuchte	1	-1
große Leuchte	1	1

Tabelle 4.3: Nicht-orthogonale Kontraste für den Faktor Messzeitpunkt

Messzeitpunkt	Kontrast 1	Kontrast 2
Block 1	1	0
Block 2	0	0
Block 3	0	1

Anstatt mit einer klassischen Varianzanalyse (engl. *analysis of variance*; ANOVA) erfolgte die Überprüfung der aufgestellten Hypothesen mit Hilfe eines linearen gemischten Modells (engl. *linear mixed model*; LMM). Dieses reagiert u.a. robuster auf fehlende Datenpunkte als eine ANOVA [234]. Dabei flossen das Lichtszenario, der Messzeitpunkt sowie die Interaktion der beiden Faktoren als Prädiktorvariablen in das Modell ein, um deren Einfluss auf die Ausgangsvariable (z.B. KSS) zu analysieren. Weiterhin wurde der individuelle Einfluss

eines jeden Probanden auf den licht- und zeitabhängigen Wert der Ausgangsvariable im Modell berücksichtigt. Die Signifikanzanalyse erfolgte unter Berücksichtigung der zuvor aufgestellten Kontraste. Das Signifikanzniveau lag bei $\alpha = 5\%$. Im Falle signifikanter Haupt- oder Interaktionseffekte, wurde zudem Pearson's r berechnet, um die Effektgröße der signifikanten Effekte einordnen zu können.

4.1.4 ERGEBNISSE

In diesem Teilabschnitt werden die Ergebnisse der Datenanalyse präsentiert. Insgesamt konnten 32 vollständige Datensätze ausgewertet werden. KSS, VAS, MDBF, PVT und FDST wurden sowohl deskriptiv, als auch inferenzstatistisch ausgewertet. Die ergänzenden Fragebögen wurden deskriptiv analysiert. Ihre Ergebnisse werden aufgrund ihres verhältnismäßig geringen Informationsgehalts nur gekürzt wiedergegeben. Die rudimentär gehaltenen Analysen der entspannt/unentspannt VAS, sowie der MDBF Kategorien gute/schlechte Stimmung und Ruhe/Unruhe, sind in Anhang B.2 zu finden, da der Fokus dieser Studie primär auf dem Einfluss von Licht auf *Alertness* und kognitiver Leistungsfähigkeit lag.

4.1.4.1 KAROLINSKA SLEEPINESS SCALE (KSS)

Wie in Abschnitt 4.1.3.4 beschrieben, wurde die KSS jeweils am Anfang und am Ende eines Messblocks verwendet, um den Einfluss der

Leistungstests auf die subjektive *Alertness* besser einschätzen zu können. Da hier keine relevanten Unterschiede beobachtet werden konnten (siehe Anhang B.2.1), wurden die Werte für die weitere Auswertung gemittelt, sodass pro Messblock nur noch ein KSS Wert vorlag. Hierdurch wird zum einen die statistische Analyse vereinfacht und zum anderen ein leichteres Vergleichen der Lichtwirkung mit anderen Tests (z.B. PVT) ermöglicht. Gleiches trifft auf die VAS Ergebnisse zu (siehe Anhänge B.2.2 & B.2.3).

Den zeitlichen und lichtabhängigen Verlauf der gemittelten KSS Mittelwerte inklusive 95% Konfidenzintervall zeigt Abbildung 4.7. Als kurze Erinnerung: Die Auswahlmöglichkeiten lagen zwischen „1 - extrem wach“ und „9 - extrem müde“. Ergänzende KSS Ergebnisse (Boxplots sowie tabellarische Darstellung von Mittelwerten inklusive Standardabweichung) sind in Anhang B.2.4 zu finden.

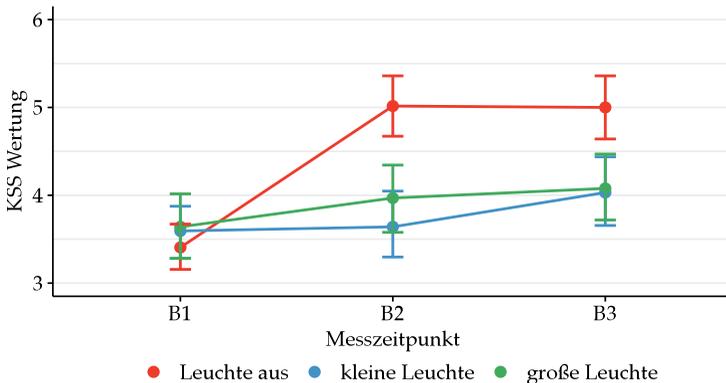


Abbildung 4.7: Mittlere KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto geringer fällt die Wertung aus.

Die inferenzstatistische Analyse zeigte, dass sowohl der Messzeitpunkt, $\chi^2(2) = 25,62, p < 0,001$, als auch das Lichtszenario einen signifikanten Einfluss auf die KSS Wertung hatten, $\chi^2(2) = 24,05, p < 0,001$. Die Interaktion zwischen Messzeitpunkt und Lichtszenario war ebenfalls signifikant, $\chi^2(4) = 24,58, p < 0,001$. Im direkten Vergleich benachbarter Messzeitpunkte konnte im ersten Block ($M = 3,55, SD = 1,29$) mit Hilfe der Kontrastanalyse eine signifikant geringere Müdigkeit als im zweiten Block ($M = 4,21, SD = 1,57$) beobachtet werden, $b = -0,66, t(62) = -4,24, p < 0,001, r = 0,47$. Zwischen dem zweiten und dritten Block ($M = 4,37, SD = 1,62$) gab es keine signifikanten Unterschiede, $b = 0,16, t(62) = 1,03, p = 0,31$. Bei den Lichtbedingungen zeigte sich, dass die subjektive Müdigkeit signifikant geringer ausfiel, wenn eines der beiden hellen Lichter eingeschaltet war (Licht an: $M = 3,83, SD = 1,48$; Licht aus: $M = 4,47, SD = 1,56$), $b = -0,40, t(186) = -5,66, p < 0,001, r = 0,38$. Der Raumwinkel der Lichtpanels hatte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die subjektive Müdigkeit, $b = 0,16, t(62) = 1,33, p = 0,19$. Mit Blick auf die Interaktionseffekte zeigte sich, dass die Müdigkeit der Probanden von Block 1 zu Block 2 signifikant anstieg, wenn das helle Licht nicht eingeschaltet war, $b = 0,47, t(186) = 4,70, p < 0,001, r = 0,33$. Bezogen auf die Extremwerte der KSS stieg die Müdigkeit der Probanden zwischen den Messblöcken um ca. 20% von $M = 3,41, SD = 1,09$ auf $M = 5,02, SD = 1,42$, wenn das helle Licht ausgeschaltet blieb. Bei hellem Licht stieg das Müdigkeitsniveau lediglich um ca. 2% bzw. von $M = 3,62, SD = 1,38$ auf $M = 3,80, SD = 1,49$. Weitere signifikante Interaktionen zwischen dem Messzeitpunkt und dem Lichtszenario bzw. dem Raumwinkel konnten nicht beobachtet werden.

4.1.4.2 VISUELLE ANALOGSKALA

Nachfolgend werden die Ergebnisse der pro Block gemittelten schläfrig/wach VAS präsentiert. Die nicht gemittelten Werte sind in Anhang B.2.2 zu finden. Die entspannt/unentspannt VAS Ergebnisse sind in den Anhängen B.2.3 und B.2.6 dargestellt.

Den zeitlichen und lichtabhängigen Verlauf der gemittelten VAS Mittelwerte inklusive 95% Konfidenzintervall zeigt Abbildung 4.8. Wie in Abschnitt 4.1.3.3 dargestellt, konnten bei der schläfrig/wach VAS Werte zwischen 0 cm = sehr schläfrig und 16cm = sehr wach angekreuzt werden. Ergänzende Ergebnisse sind analog zur KSS in Anhang B.2.5 zu finden.

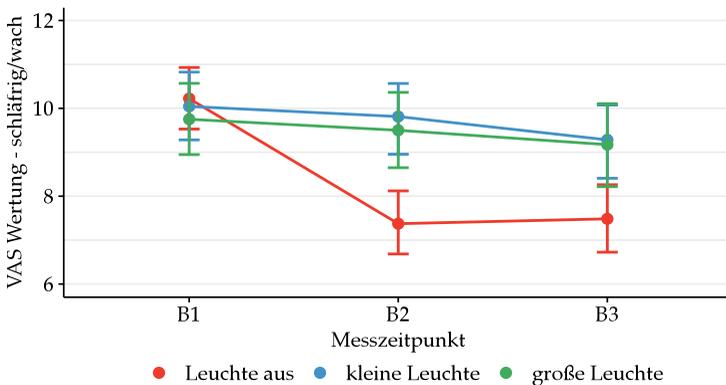


Abbildung 4.8: Mittlere schläfrig/wach VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

Die inferenzstatistische Untersuchung mittels LMM zeigte, dass sowohl der Faktor Messzeitpunkt, $\chi^2(2) = 18,78$, $p < 0,001$, als auch der Faktor Lichtszenario einen signifikanten Einfluss auf die schläfrig/wach VAS Wertung hatten, $\chi^2(2) = 20,20$, $p < 0,001$. Die Interaktion zwischen Messzeitpunkt und Lichtszenario war ebenfalls signifikant, $\chi^2(4) = 17,63$, $p = 0,002$. Mit Hilfe der hypothesengeleiteten Kontraste konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den VAS Wertungen des ersten ($M = 10,01$, $SD = 3,20$) und des zweiten Blocks ($M = 8,90$, $SD = 3,51$) festgestellt werden, $b = 1,11$, $t(62) = 3,62$, $p < 0,001$, $r = 0,42$. Zwischen dem zweiten und dritten Block konnte dieser signifikante Unterschied nicht beobachtet werden, $b = -0,25$, $t(62) = -0,81$, $p = 0,42$. Im Vergleich der Lichtszenarien konnte ein signifikant höheres Wachheitsniveau mit eingeschaltetem Licht ($M = 9,59$, $SD = 3,45$) als mit ausgeschaltetem Licht ($M = 8,36$, $SD = 3,35$) beobachtet werden, $b = 0,76$, $t(186) = 4,96$, $p < 0,001$, $r = 0,34$. Beim Vergleichen der Interaktionseffekte mit Hilfe der zuvor gesetzten Kontraste, konnte nachgewiesen werden, dass sich die Probanden nach der monotonen Nebenaufgabe signifikant müder als davor fühlten, wenn das helle Licht nicht eingeschaltet wurde, $b = -0,87$, $t(186) = -4,00$, $p < 0,001$, $r = 0,28$. Bezogen auf die gesamte Bandbreite der VAS fiel die Wachheit der Probanden um ca. 18% von $M = 10,22$, $SD = 2,95$ auf $M = 7,37$, $SD = 3,07$, wenn das helle Licht zwischen den ersten beiden Messblöcken ausgeschaltet blieb. Wurde eines der hellen Lichter eingeschaltet, so fiel die Wachheit um ca. 2% von $M = 9,90$, $SD = 3,32$ auf $M = 9,66$, $SD = 3,47$. Weitere signifikante Interaktionseffekte konnten nicht beobachtet werden.

4.1.4.3 MEHRDIMENSIONALER BEFINDLICHKEITSFRAGEBOGEN

In diesem Teilabschnitt werden die Ergebnisse der Unterkategorie „Wachheit/Müdigkeit“ des mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogens (MDBF) präsentiert. Die anderen beiden Kategorien, „gute/schlechte Stimmung“ und „Ruhe/Unruhe“, werden hier nicht diskutiert. Ihre Ergebnisse sind jedoch in Anhang B.2 zu finden.

Abbildung 4.9 visualisiert den zeitlichen und lichtabhängigen Verlauf der „Wachheit/Müdigkeit“ Ergebnisse des MDBF in Form von Mittelwerten inklusive 95% Konfidenzintervall. Eine minimale Wertung von acht Punkten signalisiert extreme Müdigkeit, während extreme Wachheit durch einen Maximalwert von 40 Punkten dargestellt wird. Ergänzende Ergebnisse sind in Anhang B.2.9 zu finden.

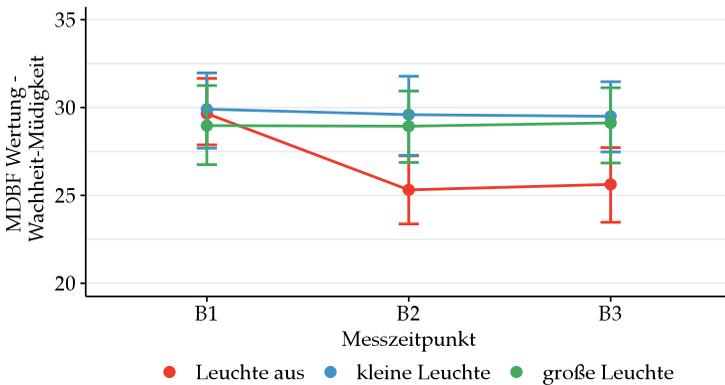


Abbildung 4.9: Mittlere MDBF Wertungen (Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

Bei der inferenzstatistischen Analyse hat sich gezeigt, dass der Hauptfaktor Messzeitpunkt einen signifikanten Einfluss auf die MDBF Punktzahl hatte, $\chi^2(2) = 8,45$, $p = 0,01$. Ebenso konnte ein signifikanter Einfluss des Faktors Lichtszenario, $\chi^2(2) = 25,90$, $p < 0,001$, sowie der Interaktion zwischen Messzeitpunkt und Lichtszenario nachgewiesen werden, $\chi^2(4) = 16,05$, $p = 0,003$. Mit Hilfe der Kontrastanalyse konnte ein signifikant höheres Wachheitsniveau während des ersten Messblocks ($M = 29,51$, $SD = 6,17$) als im zweiten Messblock ($M = 27,95$, $SD = 6,30$) aufgezeigt werden, $b = 1,56$, $t(62) = 2,83$, $p = 0,006$, $r = 0,34$. Zwischen dem zweiten und dritten Messblock wies der Wachheitsgrad keinen signifikanten Unterschied auf, $b = 0,14$, $t(62) = 0,24$, $p = 0,81$. Bei den Lichtszenarien zeigten die hypothesengeleiteten Kontraste ein signifikant höheres Wachheitsniveau bei hellem Licht ($M = 29,34$, $SD = 6,20$) als bei gedimmtem Licht ($M = 26,86$, $S = 6,09$), $b = 1,31$, $t(186) = 4,77$, $p < 0,001$, $r = 0,33$. Signifikante Unterschiede zwischen den Raumwinkeln gab es jedoch nicht, $b = -0,33$, $t(186) = -0,69$, $p = 0,49$. Verglichen mit der MDBF Wertung vor der monotonen Nebenaufgabe, zeigte die Kontrastanalyse, dass die subjektive Wachheit nach der monotonen Nebenaufgabe signifikant geringer ausfiel, wenn keine der hellen Lichtquellen eingeschaltet war, $b = -1,39$, $t(186) = -3,58$, $p = 0,005$, $r = 0,25$. Mit hellem Licht blieb die Wertung zwischen Block 1 ($M = 29,44$, $SD = 6,50$) und Block 2 ($M = 29,27$, $SD = 6,14$) relativ konstant, wohingegen sie ohne Licht von $M = 29,66$, $SD = 5,57$ auf $M = 25,31$, $SD = 5,82$ abfiel. Bezogen auf die erreichbaren Punkte entspricht dies einem ca. 14% niedrigerem Wachheitsniveau. Weitere signifikante Interaktionseffekte konnten nicht aufgezeigt werden.

4.1.4.4 PSYCHOMOTORISCHER VIGILANZTEST (PVT)

Zur Auswertung des PVT wurden die aufgenommenen Messpunkte inklusive ihrer Reaktionszeit klassifiziert und gefiltert. Vor Erscheinen des Zielreizes getätigte Tastendrucke und damit negative Reaktionszeiten flossen ebenso wie *Lapses* nicht in die Analyse der Daten mit ein. Als *Lapse* wurden Reaktionen bezeichnet, bei denen die Reaktionszeit mehr als 500 ms betrug (analog [230] oder [235]). Die gültigen, durchschnittlichen Reaktionszeiten inklusive Standardabweichung sind in Abbildung 4.10 zu sehen. Die Reaktionszeiten sind dabei in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario dargestellt. Anhang B.2.10 enthält ergänzende Ergebnisse.

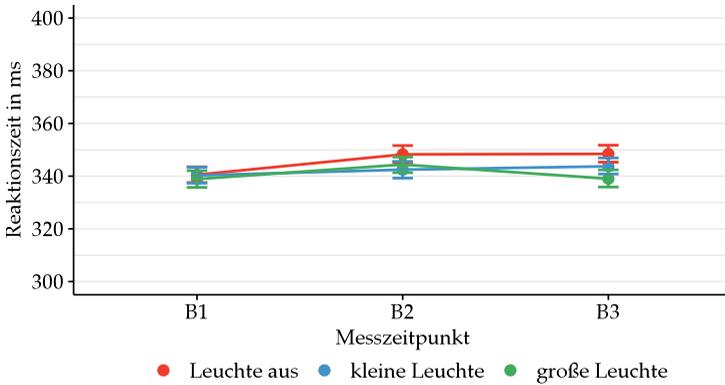


Abbildung 4.10: Mittelwerte der PVT Reaktionszeiten in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.

Mit Hilfe eines LMM wurden die Reaktionszeiten auf signifikante Unterschiede untersucht. Hierbei konnte kein signifikanter Einfluss der Hauptfaktoren Messzeitpunkt, $\chi^2(2) = 5,58, p = 0,06$, und Lichtszenario nachgewiesen werden, $\chi^2(2) = 4,85, p = 0,09$. Die Interaktion der beiden Faktoren war ebenfalls nicht signifikant, $\chi^2(4) = 1,82, p = 0,77$. Da die Faktoren Messzeitpunkt und Lichtszenario mit $p = 0,06$ und $p = 0,09$ Trends zu Signifikanz aufwiesen, wurde eine Kontrastanalyse durchgeführt. Im direkten Vergleich mit dem zweiten Messblock ($M = 345,01$ ms, $SD = 52,39$ ms), konnten beim ersten Messblock signifikant kürzere Reaktionszeiten nachgewiesen werden ($M = 339,90$ ms, $SD = 51,69$ ms), $b = -5,46, t(62) = -2,24, p = 0,03, r = 0,27$. Weitere signifikante Unterschiede zeigten sich nicht.

4.1.4.5 FORWARD DIGIT SPAN TASK (FDST)

Um die Merkfähigkeit zu testen, wurde ein FDST eingesetzt, welcher sich auf unterschiedliche Art und Weise auswerten lässt. Wie in Abschnitt 4.1.3.3 beschrieben, mussten sich Probanden beim FDST Zahlenreihen unterschiedlicher Länge merken. Bei der einfachsten Stufe mussten sich die Versuchspersonen drei Ziffern einprägen, wohingegen es bei der schwierigsten Stufe neun Ziffern waren. Pro Schwierigkeitsgrad hatten die Probanden zwei Versuche. Die Leistung während des FDST kann daher zum einen über die längste, richtig wiedergegebene Zahlenreihenfolge beurteilt werden. Zum anderen kann die Leistung mit Hilfe der Anzahl an richtig wiedergegebenen Versuchen analysiert werden. Hier wird die längste, richtig

wiedergegebene Zahlenreihe zur Analyse herangezogen. Ergänzend sind die Ergebnisse der anderen Auswertemethode jedoch in Anhang B.2.11 zu finden.

Abbildung 4.11 zeigt den Mittelwertverlauf der längsten, richtig wiedergegebenen Zahlenfolge (inkl. 95% Konfidenzintervall) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Ergänzende Ergebnisse sind in Anhang B.2.12 enthalten.

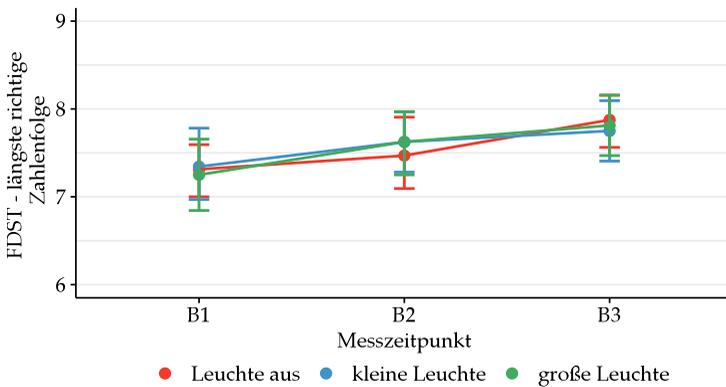


Abbildung 4.11: Mittelwerte der längsten, richtig wiedergegebenen FDST Zahlenfolgen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.

Die Analyse der Ergebnisse mittel LMM erwies, dass der Hauptfaktor Messzeitpunkt die Merkfähigkeit der Probanden signifikant beeinflusste, $\chi^2(2) = 14,52$, $p < 0,001$. Der Einfluss des Hauptfaktors Lichtszenario war nicht signifikant, $\chi^2(2) = 0,03$, $p = 0,98$. Gleiches gilt für die Interaktion aus Messzeitpunkt und Lichtszenario, $\chi^2(4) = 1,08$, $p = 0,90$. Mit Hilfe der anschließenden Kontrastanalyse konnte

beobachtet werden, dass die Merkfähigkeit beim ersten Messzeitpunkt signifikant geringer ausfiel als beim zweiten Messzeitpunkt, $b = -0,27$, $t(62) = -2,03$, $p = 0,05$, $r = 0,25$. Verglichen mit dem zweiten Messzeitpunkt, konnte während dem dritten Messzeitpunkt ein Trend zu verbesserter Merkfähigkeit beobachtet werden, $b = 0,24$, $t(62) = 1,80$, $p = 0,08$. Weitere signifikante Effekte gab es nicht.

4.1.4.6 BLENDUNG

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Blendbewertung mittels inverser de Boer Skala präsentiert. Die Bandbreite der Bewertungen reichte von „1 - gerade bemerkbar“ bis „9 - unerträglich“. Tabelle 4.4 zeigt die vom Lichtszenario abhängigen mittleren Blendbewertungen inklusive Standardabweichung. Der Grad der Blendung wurde ausschließlich während des zweiten Messblocks erhoben. In Abbildung 4.12 wird die Blendbewertung in Abhängigkeit vom Lichtszenario graphisch als Boxplot dargestellt (inkl. Mittelwert). Die Länge der dargestellten Whisker beträgt den 1,5-fachen Interquartilsabstand (25% bis 75%).

Tabelle 4.4: Mittelwert und Standardabweichung der Blendbewertung (inverse de Boer Skala) in Abhängigkeit vom Lichtszenario

	Lichtszenario					
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Blendbewertung	2,66	2,15	5,16	1,61	4,06	1,56

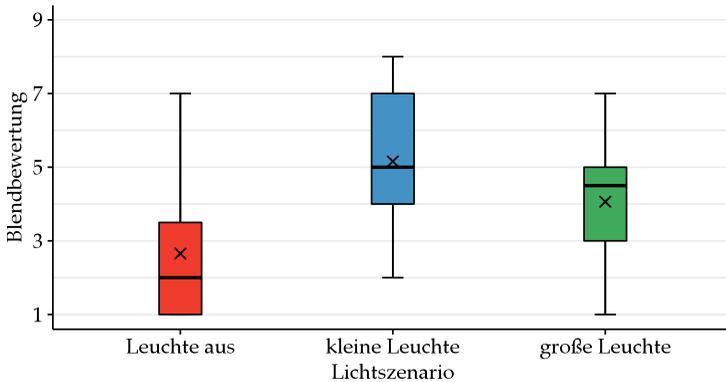


Abbildung 4.12: Boxplots der Blendbewertung in Abhängigkeit vom LichtszENARIO. Das Kreuz symbolisiert den Mittelwert.

Da die Blendwirkung nur während des zweiten Messblocks erhoben wurde, wurde zur inferenzstatistischen Untersuchung der Blendung ein einfaktorielles LMM mit Messwiederholung herangezogen. Die eingangs für das LichtszENARIO festgelegten Kontraste blieben erhalten. Die LMM Analyse zeigte einen signifikanten Einfluss des Lichtszenarios auf die wahrgenommene Blendung, $\chi^2(2) = 32,46$, $p < 0,001$. Mit Hilfe der Kontraste konnte aufgedeckt werden, dass die subjektive Blendung signifikant höher ausfiel, wenn eine der beiden hellen Lichtquellen eingeschaltet war, $b = 0,65$, $t(62) = 5,76$, $p < 0,001$, $r = 0,59$. Im direkten Vergleich der beiden hellen Lichtquellen fiel die Blendwirkung bei der großen Lichtquelle signifikant geringer aus, als bei der kleinen Lichtquelle, $b = -0,55$, $t(62) = -2,79$, $p = 0,007$, $r = 0,33$.

4.1.4.7 SONSTIGE SUBJEKTIVE DATEN

Mit Hilfe ergänzender Fragebögen wurden im Rahmen dieser Studie weitere subjektive Daten zur Lichtqualität und Lichtwirkung erhoben. Die prozentuale Verteilung der Daten wird nachfolgend vorgestellt. Bei den siebenstufigen Likert-Skalen werden die Ergebnisse links und rechts der Antwortmöglichkeiten „neutral“ bzw. „genau richtig“ zusammengefasst dargestellt („viel zu dunkel“, „zu dunkel“ und „etwas zu dunkel“ werden beispielsweise zu „zu dunkel“). Die ursprünglichen Antwortverteilungen sind in Anhang B.2.13 zu finden. Da der Fokus dieser Arbeit auf der aktivierenden Lichtwirkung lag, werden ausschließlich die Daten der Szenarien *kleine Leuchte* und *große Leuchte* präsentiert. Aufgrund teilweise nicht vollständig ausgefüllter Fragebögen, variiert die Anzahl der ausgewerteten Antworten in Abhängigkeit der Frage zwischen $n = 30$ und $n = 32$.

In Bezug auf die Helligkeit empfanden 16,67% der Probanden die kleine Leuchte als zu dunkel, während sie 23,23% als optimal und 60,00% als zu hell wahrnahmen. Dahingegen wirkte die große Leuchte auf 18,75% der Versuchsteilnehmer als zu dunkel. Für 43,75% war die Helligkeit optimal und für weitere 37,50% zu hell.

Wird die Farbtemperatur betrachtet, so empfanden 53,33% der Teilnehmer die kleine Leuchte als zu kalt, während sie 46,67% als optimal bezeichneten. Keine Testperson empfand die kleine Leuchte als zu warm. Im Vergleich dazu wurde die große Leuchte von 50,00% als zu kalt, von 43,75% als optimal und von 6,75% der Probanden als zu warm empfunden.

Auf 30,00% der Probanden wirkte die kleine Leuchte angenehm, während sie 20,00% als neutral und 50,00% als unangenehm bezeichneten. Verglichen damit wirkte die große Leuchte auf 32,26% der Probanden neutral, auf 41,94% angenehm und auf 25,81% unangenehm.

10,00% der Testpersonen empfanden die kleine Leuchte als gemütlich, während sie von 20,00% als neutral wahrgenommen wurde. Auf 70,00% wirkte die kleine Leuchte ungemütlich. Analog dazu machte die große Leuchte auf 19,35% der Probanden einen gemütlichen Eindruck. Auf 16,13% wirkte sie neutral und auf 64,52% ungemütlich.

Als aktivierend nahmen 60,00% der Probanden die kleine Leuchte wahr. Dahingegen empfanden sie 36,67% als neutral und 3,33% als ermüdend. Die große Leuchte wirkte 70,97% der Testpersonen aktivierend und auf weitere 19,35% neutral. 9,68% empfanden die große Leuchte ermüdend.

Mit Blick auf die Größe wurde die kleine Leuchte von 70,97% als zu klein und von 29,03% als optimal bewertet. Auf keinen Probanden wirkte die kleine Leuchte zu groß. Die große Leuchte wurde von 22,58% der Probanden als zu klein, von 54,84% als optimal und von 22,58% als zu groß wahrgenommen.

Wird die Position der Leuchte im Blickfeld betrachtet, so wurde die kleine Leuchte von 54,84% als zu niedrig bewertet. 32,26% empfanden die Position als optimal, während sie 12,90% als zu hoch wahrnahmen. Im Vergleich dazu wirkte die große Leuchte auf 48,39% der Testpersonen als zu niedrig, während sie 41,94% als optimal wahrnahmen. 9,68% der Probanden empfanden die Position als zu hoch.

Wird ein Blick auf die Fragen des dritten Messblocks geworfen, so bejahten 28,58% der Probanden sich durch die kleine Leuchte wacher zu fühlen, während sich 54,84% ein bisschen wacher fühlten. 22,58% fühlten sich nicht wacher. Dahingegen bejahten 31,25% der Probanden durch die große Leuchte wacher geworden zu sein, während sich 50,00% ein bisschen wacher fühlten. 18,75% verneinten wacher geworden zu sein.

Bezüglich der Leistungsfähigkeit bejahten 19,35% der Probanden sich durch das Licht der kleinen Leuchte leistungsfähiger zu fühlen. 35,48% fühlten sich ein bisschen leistungsfähiger, während 45,16% eine Leistungssteigerung verneinten. Im Vergleich dazu bejahten 21,88% sich durch die große Leuchte leistungsfähiger zu fühlen. Weitere 37,50% fühlten sich ein bisschen leistungsfähiger und 40,63% verneinten eine Leistungssteigerung.

Um die Wirkung nicht-visueller Effekte zu steigern, wurden die Probanden gefragt, ob sie eine höhere Helligkeit für einen größeren leistungssteigernden Effekt akzeptieren würden. Bei der kleinen Leuchte bejahten 38,71% diese Frage, während weitere 22,58% nur eine geringe höhere Helligkeitssteigerung akzeptieren würden. 45,16% der Testpersonen würde keine Erhöhung der Helligkeit akzeptieren. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der großen Leuchte. Hier akzeptieren 40,63% der Probanden keine höhere Helligkeit, während 21,88% eine geringe Helligkeitserhöhung hinnehmen würden. Weitere 37,50% würden eine höhere Helligkeit annehmen, wenn diese mit einer Leistungssteigerung einhergehen würde.

4.1.5 DISKUSSION

In diesem Teilabschnitt werden die im vorherigen Unterkapitel vorgestellten Ergebnisse unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1.2 aufgestellten Hypothesen diskutiert. Basierend auf den daraus gewonnenen Erkenntnissen wird im Anschluss die angewandte Untersuchungsmethodik hinterfragt.

4.1.5.1 EINFLUSS DES MESSZEITPUNKTS

Wird der Einfluss des Messzeitpunkts auf Ausprägungen subjektiver Merkmale der *Alertness* betrachtet, so konnte bei allen Tests (KSS, VAS und MDBF) ein signifikanter Anstieg der Müdigkeit vom ersten zum zweiten Messblock beobachtet werden. Somit wird die in Abschnitt 4.1.2 formulierte Alternativhypothese $H_{1.1}$ bestätigt, welche besagt, dass die Ausprägung der AV (hier subjektive *Alertness*) nach einer monotonen Nebenaufgabe geringer ausfällt als davor. Diese Beobachtung weist darauf hin, dass das Schauen der Naturdokumentation eine geeignete Nebenaufgabe war, um zu einem Dekrement der subjektiven *Alertness* zu führen. Da die subjektive *Alertness* zwischen dem zweiten und dritten Block in allen drei Tests jedoch auf einem annähernd konstanten Niveau blieb, muss die Alternativhypothese $H_{1.2}$ verworfen werden. Die Vermutung, dass die Ausprägung der subjektiven *Alertness* über zwei kurz aufeinander folgende Messzeitpunkte nicht variiert, wurde demnach bestätigt. Zum einen deutet dieses Erkenntnis darauf hin, dass die Zusammenstellung der

Fragebögen und Leistungstests keinen Einfluss auf die subjektive *Alertness* hatte. Zum anderen kann daraus abgeleitet werden, dass die Pause zwischen dem zweiten und dritten Messblock zu kurz war, um zu einem Abweichen der subjektiven *Alertness* zu führen.

Mit Blick auf die verhaltensbezogene *Alertness* (PVT) hat die Kontrastanalyse gezeigt, dass sich die Reaktionszeiten vom ersten zum zweiten Messblock signifikant verschlechterten, wodurch die Hypothese H_{1.1} bestätigt wird. Demnach ist die gewählte Nebenaufgabe monoton genug, um auch beim PVT eine Verschlechterung der Leistung hervorzurufen. Da jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Reaktionszeiten des zweiten und dritten Blocks beobachtet werden konnten, muss die Hypothese H_{1.2} verworfen werden. Dies bestätigt die Vermutung, dass die Pause zwischen den Blöcken zu kurz ist, um signifikante Schwankungen der verhaltensbezogenen *Alertness* hervorzurufen.

Beim FDST als Merkmal höherer kognitiver Funktionen müssen die Hypothesen H_{1.1} (gerichtet) und H_{1.2} (ungerichtet) ebenfalls verworfen werden, da sich bei der Ergebnisanalyse ein anderer Effekt beobachten ließ. Anders als vermutet fiel die Merkfähigkeit zwischen dem ersten und zweiten Block nicht ab, sondern stieg signifikant, wonach die Nebenaufgabe ungeeignet dazu war, um zu einem Dekrement der Merkfähigkeit zu führen. Weiterhin erreichte der Anstieg der Merkfähigkeit zwischen dem zweiten und dritten Messblock nahezu Signifikanz. Dieser Anstieg über die verschiedenen Messblöcke hinweg deutet auf einen Lerneffekt hin (vgl. Abschnitt 4.1.4.5, Abbildung 4.11). Zwischen dem zweiten und dritten Messblock wurde

dieser Lerneffekt gegebenenfalls durch einen Deckeneffekt limitiert, da die maximale Länge der FDST Zahlenfolgen neun Ziffern betrug.

4.1.5.2 EINFLUSS VON HELLEM LICHT

Bei der inferenzstatistischen Analyse der KSS, VAS und des MDBF zeigte sich, dass helles Licht im Vergleich zu gedimmtem Licht dazu geeignet ist, um ein höheres Wachheitsgefühl zu erhalten (vgl. Abschnitte 4.1.4.1, 4.1.4.2 und 4.1.4.3). Demnach kann die Alternativhypothese $H_{1.3}$ für subjektive Merkmale der *Alertness* bestätigt werden. Die Ergebnisse stimmen mit Beobachtungen der in Kapitel 2.4 beschriebenen Studien überein. Weiterhin zeigte sich, dass eine Beleuchtungsstärke von 200 lx am Auge ausreichend ist, um positiven Einfluss auf die subjektive *Alertness* zu nehmen (vgl. [131]).

Ein signifikanter Interaktionseffekt des Messzeitpunkts und der Lichtbedingung (Licht an vs. aus) auf die subjektive *Alertness* (KSS, VAS und MDBF) konnte bei genauerer Betrachtung nur zwischen dem ersten und zweiten Messblock beobachtet werden. Die Hypothese $H_{1.5}$ wird daher bestätigt, während die Alternativhypothese $H_{1.7}$ verworfen wird. Diese Beobachtung zeigt, dass das helle Licht dazu geeignet war, um der Müdigkeitssteigerung entgegenzuwirken, welche durch eine monotone Nebenaufgabe hervorgerufen wurde. Hierbei ist zu betonen, dass das helle Licht der Müdigkeitssteigerung nur entgegenwirkte, aber zu keiner Steigerung der Wachheit führte. Ein möglicher Grund hierfür ist gegebenenfalls, dass das

Wachheitsniveau der Probanden bereits bei Versuchsbeginn auf einem hohen Level lag und sich durch helles Licht nicht weiter erhöhen ließ. Da kein signifikanter Unterschied zwischen ein- oder ausgeschaltetem hellem Licht auf die Differenz der subjektiven *Alertness* zwischen dem zweiten und dritten Messblock beobachtet werden konnte, wurde die Hypothese H_{1.7} verworfen. Hier lässt sich mutmaßen, dass die Fragebögen und Leistungstests selbst anregend genug waren, um die subjektive *Alertness* auf einem stabilen Niveau zu halten.

Wird die verhaltensbezogene *Alertness* anhand der Reaktionszeiten während des PVT analysiert, so hat sich weder für den Haupteffekt Lichtszenario, noch für die Interaktion aus Messzeitpunkt und Lichtszenario (helles Licht ein vs. aus) ein signifikanter Effekt aufgetan. Dementsprechend müssen die Hypothesen H_{1.3}, H_{1.5} und H_{1.7} im Hinblick auf die verhaltensbezogene *Alertness* verworfen werden. Dies kann zum einen daran liegen, dass das gewählte Studiendesign ungeeignet war, um lichtinduzierte Effekte auf die PVT Reaktionszeiten hervorzurufen. Andere Studien verwendeten beispielsweise deutlich höhere Beleuchtungsstärken mit wesentlich längeren Expositionszeiten, um signifikante Effekte hervorzurufen (vgl. z.B. [14] oder [135]). Wie Souman et al. jedoch aufzeigten, ist die generelle Eignung des PVT im Rahmen von Studien zu nicht-visuellen Effekten zu hinterfragen [130]. Obwohl der PVT häufig eingesetzt wird, werden unabhängig vom Studiendesign selten und unzuverlässig signifikante lichtinduzierte Einflüsse auf die Leistung während des PVT gefunden [130]. Der PVT könnte damit gänzlich ungeeignet zum

konstanten nachweisen nicht-visueller Effekte sein. Diese hier formulierte Vermutung wird von einer Beobachtung unterstützt, welche sich mit hardwareabhängigen Latenzen beim Erfassen der Reaktionszeiten beschäftigt. Reifman et al. konnten aufzeigen, dass beim Erfassen der Reaktionszeiten je nach Hardware Latenzen zwischen 4,7 und 50,6 ms zu berücksichtigen sind [236]. Demnach könnte eine lichtinduzierte Verbesserung der Reaktionszeit in der Latenz des Messsystems untergehen. Ohne Kenntnis der Latenz der jeweiligen Hardware wird ein Vergleich der Reaktionszeiten über mehrere Studien hinweg daher zusätzlich erschwert (analog Souman et al. [130]).

Beim FDST konnte ebenfalls kein signifikanter Einfluss von hellem Licht oder von Interaktionseffekten auf die Leistung beobachtet werden, wodurch die Hypothesen $H_{1.3}$, $H_{1.5}$ und $H_{1.7}$ im Hinblick auf höhere kognitive Funktionen verworfen werden. Diese Erkenntnisse stehen im Gegensatz zu den Ergebnissen von Huiberts et al., welche eine Verbesserung der FDST Leistung unter hellem Licht beobachten konnten [140]. Dort wurden allerdings Beleuchtungsstärken von 200 und 1000 lx bei jeweils 4000 K über eine Dauer von 60 Minuten miteinander verglichen. Gegebenenfalls sind daher die hier gewählten Lichtbedingungen ungeeignet, um lichtinduzierte Effekte auf die FDST Leistung hervorzurufen. Weiterhin ist es möglich, dass potentielle leistungssteigernde Effekte durch Licht im Lerneffekt des FDST untergehen.

4.1.5.3 EINFLUSS DES RAUMWINKELS

Ein Hauptaugenmerk der Studie war es, den Einfluss des Raumwinkels auf nicht-visuelle Effekte zu untersuchen, wenn die Beleuchtungsstärke am Auge konstant gehalten wird. Hier konnte bei keinem der verwendeten subjektiven und verhaltensbezogenen Tests ein signifikanter Einfluss oder gar ein Trend beobachtet werden, so dass die Hypothesen $H_{1.4}$, $H_{1.6}$ und $H_{1.8}$ verworfen werden. Auf Basis der hier generierten Ergebnisse ist jedoch nicht zu erkennen, ob der Raumwinkel bei nicht-visuellen Effekten grundsätzlich keine Rolle spielt, ob es sich um ein Zufallsergebnis handelt oder ob das gewählte Studiendesign ungeeignet ist. Letzteres ist nicht auszuschließen, da unabhängig vom Raumwinkel kein signifikanter Effekt der hellen Lichtexposition auf die Leistung beobachtet werden konnte. Daher ist es möglich, dass extremere Versuchsbedingungen (höhere Beleuchtungsstärken, größere Raumwinkelunterschiede, übermüdete Probanden, etc.) herangezogen werden müssen, um grundlegendere Tendenzen herausarbeiten zu können. Hierbei gilt es allerdings abzuwägen, inwieweit sich streng kontrollierte Bedingungen auf praxisnahe Szenarien übertragen lassen.

Einen vom Raumwinkel abhängigen signifikanten Effekt gab es aber dennoch. Wie zu erwarten fiel die subjektive Blendung bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge geringer aus, wenn der Raumwinkel größer war. Die Alternativhypothese $H_{1.9}$ wird daher bestätigt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die große Leuchtfläche im Vergleich zur kleinen Leuchtfläche mit einer geringeren Leuchtdichte

einhergeht, welche unter Berücksichtigung der Umgebungsleuchtdichte zu einem geringeren bzw. angenehmeren Kontrast führt. Die Blendwirkung und der damit zusammenhängende visuelle Komfort sollten daher grundsätzlich bei der Auslegung von Lichtquellen berücksichtigt werden, welche zum Auslösen nicht-visueller Effekte verwendet werden. Auf der inversen de Boer Skala wurde die Blendwirkung der kleinen Leuchtfläche z.B. als „gerade akzeptabel“ bewertet ($M = 5,16$, $SD = 1,61$). Unter gegebenen Rahmenbedingungen sollte die Leuchtdichte der kleinen Leuchtfläche daher nicht erhöht werden.

4.1.5.4 DISKUSSION DER UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Die in Abschnitt 4.1.4.7 präsentierten Ergebnisse zeigen, dass die kleine Leuchte zwar als aktivierend wahrgenommen wurde, sie allerdings auch als zu hell, zu kalt, unangenehm und ungemütlich empfunden wurde. Unter Berücksichtigung möglicher Stellschrauben, um Einfluss auf nicht-visuelle Effekte zu nehmen, und der Tatsache, dass eine Vielzahl der Probanden keine bzw. nur eine geringe Helligkeitssteigerung zur Maximierung nicht-visueller Effekte akzeptieren würde, wird das lichttechnische Setup der kleinen Leuchte jedoch als angemessen bewertet. Zwar könnten Leuchtdichte und Farbtemperatur erhöht werden, allerdings würde damit vermutlich auch die Akzeptanz der Leuchte sinken, wodurch die Leuchte in der Praxis seltener eingesetzt werden würde. Ein milderer Bild ergibt sich bei der großen Leuchtfläche, was darauf hinweist, dass der größere

Raumwinkel speziell in Bezug auf die visuelle Wahrnehmung zu einer höheren Akzeptanz führt. Wird ein ähnliches, schlechteres Akzeptanzniveau wie bei der kleinen Leuchte angestrebt, so könnten Leuchtdichte und Farbtemperatur der großen Leuchte erhöht werden, um die Wirkung nicht-visueller Effekte potentiell zu verstärken.

Die Ergebnisse der vorherigen Kapitel zeigen, dass zumindest die Fragebögen (KSS, VAS und MDBF) dazu geeignet waren, um Schwankungen der subjektiven *Alertness* in Abhängigkeit des Messzeitpunkts und/oder des Lichtszenarios zu visualisieren. Dahingegen wurde aufgezeigt, dass PVT und FDST ungeeignet dazu waren, um im gewählten Design zu übertragbaren Ergebnissen zu führen. Leistungstests, welche weniger anfällig auf Lerneffekte und die Hardware des Messsystems reagieren, wären besser geeignet.

Hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs konnte beobachtet werden, dass sowohl die Dauer der monotonen Nebenaufgabe, als auch die Dauer der Lichtexposition adäquat ausgewählt wurden, um die vermuteten Effekte aufzuzeigen. Lediglich der dritte Messblock blieb ohne Wirkung, sodass die Pause zum zweiten Messblock in zukünftigen Studien entweder länger ausfallen sollte oder gänzlich auf den dritten Messblock verzichtet werden sollte.

Im Vergleich zu vielen Studien aus Abschnitt 2.4, gab es im Rahmen dieser Untersuchungen kaum Einschränkungen bei der Auswahl des Probandenkollektivs. Gleiches gilt für die Anforderungen bzw. Restriktionen, welche vor der Studiendurchführung an die Versuchspersonen gestellt wurden (z.B. Koffeinkonsum, Schlafdefizit, etc.). Da

dadurch keinerlei Information über die vorherige Lichthistorie eines Probanden vorlag, ist nicht auszuschließen, dass externe Parameter die Studienergebnisse maßgeblich beeinflussten. Um nicht-visuelle Effekte zuverlässiger nachweisen zu können, könnte dem durch strengere Probandenanforderungen entgegengesteuert werden, welche durch extremere Versuchsbedingungen ergänzt werden (z.B. Studiendurchführung in den frühen Morgenstunden). Dies würde jedoch der Anforderung widersprechen, dass das Versuchsdesign frei genug gestaltet sein muss, um Effekte zu generieren, welche sich auch im Alltag erzeugen lassen.

4.1.6 FAZIT

Mit Hilfe der hier vorgestellten und diskutierten Probandenstudie sollte untersucht werden, inwiefern sich nicht-visuelle Effekte im PKW Kontext bei einer morgendlichen Fahrt zur Arbeit (autonom oder chauffiert) hervorrufen lassen. Auf diesem Anwendungsfall basierend wurde in einer Laborumgebung analysiert, ob und wie zwei Lichtquellen mit unterschiedlichem Raumwinkel während einer 35-minütigen Lichtexposition Einfluss auf subjektive und objektive Parameter nehmen. Die Größe der Lichtquellen orientierte sich dabei an räumlichen Gegebenheiten aus dem Fahrzeuginterieur. Die Ergebnisse zeigten, dass mit Hilfe von Licht dem Verfall der subjektiven *Alertness* entgegengewirkt werden kann, der durch eine monotone Nebenaufgabe hervorgerufen wird. Bei verschiedenen Messmethode (KSS, VAS oder MDBF) konnten die Probanden ihre subjektive

Alertness aufrechterhalten, wenn das helle Licht eingeschaltet war. Ohne Licht fiel die subjektive *Alertness* nach der monotonen Nebenaufgabe dagegen signifikant um 14 bis 20%. Hierbei konnten allerdings keine Effekte beobachtet werden, welche sich auf die unterschiedlichen Raumwinkel der Lichtquellen zurückführen ließen. Bei den leistungsbezogenen Parametern (PVT und FDST) konnte kein signifikanter Einfluss durch helles Licht und damit auch nicht durch unterschiedliche Raumwinkel beobachtet werden. Im Rahmen der Diskussion der PVT und FDST Ergebnisse wurde im Anschluss erörtert, dass beide Tests wenig dazu geeignet sind, um zuverlässig nicht-visuelle Effekte aufzudecken. Im Hinblick auf den visuellen Komfort bzw. die Blendung wurde aufgezeigt, dass der Raumwinkel einer Lichtquelle die Blendwirkung signifikant beeinflusst. Bei gleicher Beleuchtungsstärke am Auge wurde die größere Lichtquelle als signifikant weniger blendend beurteilt.

Zusammengefasst konnte die hier vorgestellte Studie nachweisen, dass die subjektive *Alertness* in einem automotive Kontext durch Licht beeinflusst werden kann. Die Beobachtungen ließen sich jedoch nicht bei leistungsbezogenen Merkmalen wiederholen und waren unabhängig vom Raumwinkel der Lichtquellen. Nachfolgende, auf dieser Studie aufbauende Untersuchungen sollten daher den Versuchsablauf modifizieren und geeignete Leistungstests auswählen, um den Einfluss von Lichtquellen und deren Raumwinkel auf aktivierende, nicht-visuelle Effekte zu analysieren.

4.2 WIEDERHOLUNG DER VORGÄNGERSTUDIE MIT ANGEPASSTEM KONZEPT

4.2.1 FORSCHUNGSSCHWERPUNKT

Die Probandenstudie des vorherigen Kapitels hat gezeigt, dass ihr Studiendesign grundsätzlich dazu geeignet ist, um positive lichtinduzierte Effekte auf subjektiver Ebene hervorzurufen. Allerdings haben sich mit Blick auf die Dauer des Versuchs und die verwendeten Leistungstests auch methodische Defizite herauskristallisiert.

In einer zweiten Studie soll daher das Design der ersten Untersuchung aufgegriffen werden und entsprechend der zuvor gewonnen Erkenntnisse optimiert werden, sodass nicht-visuelle Effekte zuverlässiger nachgewiesen werden können, falls sie auftreten. Die Anpassungen betreffen dabei zum einen die Datenerhebung nach der Lichtexposition (Block 3, vgl. Abschnitt 4.1.3). Auf sie soll verzichtet werden, da sie keinerlei Einfluss auf die zuvor analysierten abhängigen Variablen hatte (vgl. Abschnitt 4.1.4) und die Datenerhebung dadurch zeitlich effizienter gestaltet werden kann. Zum anderen sind die verhaltensbezogenen Tests betroffen. Wie viele der in Kapitel 2.4 vorgestellten Untersuchungen, sollte die Studie des vorherigen Abschnitts neben der positiven Wirkung von Licht auf die subjektive *Alertness* auch aktivierende Lichteffekte auf verhaltensbezogene Parameter nachweisen. Dies konnte allerdings nicht bewerkstelligt werden. Dabei ist nicht klar, ob die Wirkung nicht aufgezeigt werden

konnte, weil es sie nicht gab, oder ob sie aufgrund ihrer kleinen Wirkung im Lerneffekt (FDST), in der Latenz des Messsystems (PVT) oder der Inkonsistenz des Tests (PVT) untergegangen ist. Infolgedessen sollen geeignetere Leistungstests verwendet werden, welche robuster reagieren und zuverlässigere Ergebnisse liefern.

Mit Blick auf die zu analysierenden Fragestellungen, wird der Untersuchungsschwerpunkt der Vorgängerstudie übernommen. Das heißt auch diese Studie wird den Einfluss von hellem Licht und unterschiedlichen Raumwinkeln auf die subjektive *Alertness* und leistungsbezogene Parameter untersuchen. Das Szenario ist dabei erneut an eine chauffierte oder autonome Fahrt zur Arbeit angelehnt.

4.2.2 HYPOTHESEN

Wie zuvor beschrieben übernimmt die hier vorgestellte Studie die zentralen Fragen der Vorgängeruntersuchung und soll lediglich das Studiendesign optimieren. Da aus den Fragestellungen die Forschungshypothesen abgeleitet werden, werden die Alternativhypothesen der vorhergehenden Datenerhebung in dieser Studie im Wesentlichen erneut verwendet (vgl. Abschnitt 4.1.2). Auf die Hypothesen zum Einfluss des Messzeitpunkts nach dem Lichtszenario (Block 2 vs. Block 3) wird allerdings verzichtet, da dort keinerlei signifikante Effekte beobachtet werden konnten (vgl. Abschnitte 4.1.4 und 4.1.5). Somit werden in dieser Studie die nachfolgenden Alternativhypothesen analysiert:

- H_{1.1}: Die Ausprägung der AV fällt nach einer monotonen Nebenaufgabe negativer aus als davor.
- H_{1.2}: Die Ausprägung der AV fällt mit hellem Licht positiver aus als ohne helles Licht.
- H_{1.3}: Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert die Ausprägung der AV in Abhängigkeit des Raumwinkels einer Lichtquelle.
- H_{1.4}: Die Ausprägung der AV fällt nach einer monotonen Nebenaufgabe negativer aus als davor. Dabei fällt sie mit hellem Licht weniger negativ aus als ohne.
- H_{1.5}: Nach einer monotonen Nebenaufgabe variiert die Ausprägung der AV über kurz aufeinander folgende Messzeitpunkte. Bei hellem Licht und gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert die AV dabei in Abhängigkeit des Raumwinkels der Lichtquelle.

Mit AV sind in den oben genannten Hypothesen die subjektiven und leistungsbezogenen Parameter gemeint, welche im Rahmen der Studie erhoben werden.

4.2.3 METHODE

4.2.3.1 STUDIENDESIGN & STICHPROBE

Das Studiendesign dieser Untersuchung wurde im Wesentlichen von der in Kapitel 4.1 beschriebenen Vorgängerstudie übernommen. Das heißt, es wurden erneut drei Lichtszenarien in Form eines *within-subject* Designs untersucht. Hierbei wurden die gleichen Lichtszenarien wie in der Vorgängerstudie untersucht (*Leuchte aus, kleine Leuchte oder große Leuchte*). Im Vergleich zur vorherigen Studie wurde die Dauer des Versuchsdurchlaufs auf 60 Minuten reduziert, indem der letzte Messblock, welcher keinerlei Einfluss auf die nicht-visuelle Lichtwirkung hatte, weggelassen wurde. Während des verkürzten Ablaufs entfielen erneut 35 Minuten auf das jeweilige Lichtszenario. Darin eingebettet war wiederum die 20-minütige Nebenaufgabe. Begonnen wurde mit den Versuchsdurchläufen entweder um 08:00, 09:15 oder um 10:30 Uhr.

Mit Blick auf die Homogenisierung des Probandenkollektivs und die allgemeinen Rahmenbedingungen (konstante Startuhrzeit, Pause zwischen den Versuchstagen, etc.) wurden die gleichen Vorkehrungen wie in der vorherigen Untersuchung getroffen. Insgesamt nahmen 32 Testpersonen (24 männlich, 8 weiblich) an der Probandenstudie teil. Ihr Durchschnittsalter betrug $30,8 \pm 10,7$ (*SD*) Jahre. Das Studiendesign wurden vom Betriebsrat der Audi AG genehmigt. Die Durchführung der Studie erfolgte im September 2019.

4.2.3.2 VERSUCHSUMGEBUNG

Zur Durchführung der hier beschriebenen Probandenstudie wurde der Aufbau der vorherigen Studie wiederverwendet. Eine genaue Beschreibung der aus abgedunkelter Kabine, Arbeitsplatz und Leuchten bestehenden Versuchsumgebung ist in Abschnitt 4.1.3.2 zu finden. Gleiches gilt für die lichttechnischen Parameter.

4.2.3.3 MESSGRÖßEN

Um die nicht-visuelle Wirkung von Licht auf die Probanden messen zu können, wurden im Rahmen dieser Studie sowohl subjektive als auch objektive, leistungsbezogene Daten erhoben. Zur Analyse der subjektiven *Alertness* wurde dabei erneut auf die bereits zuvor verwendete KSS zurückgegriffen, welche hier allerdings mit Hilfe des Laptops beantwortet werden musste.

Aufgrund der Schwächen der in der Vorgängerstudie verwendeten Leistungstests, wurden zur Durchführung dieser Studie andere Testverfahren herangezogen. So wurde anstatt dem FDST ein *Complex Span Task* (CST) verwendet, welcher ebenfalls ein Test des Arbeitsgedächtnis ist (für weitere Informationen siehe [237]). Zur Durchführung des CST wurde eine Implementation von Stone und Towse (siehe [238]) ins Deutsche übersetzt und auf den bereitgestellten Laptops wiedergegeben. Auf dem Bildschirm wurde hierbei eine 4 x 4 Matrix gezeigt, wobei zufällig ausgewählte Felder der Matrix einzeln aufleuchteten. Je nach Schwierigkeitsgrad leuchteten zwei bis fünf

Felder auf, deren Position und Reihenfolge sich die Probanden merken mussten. Zwischen zwei zu merkenden Items mussten die Probanden zusätzlich eine Nebenaufgabe lösen, bei der per Tastendruck (linke Pfeiltaste = ja oder rechte Pfeiltaste = nein) beurteilt werden musste, ob ein in einer 8 x 8 Matrix gezeigtes Muster symmetrisch war oder nicht. Die Symmetrieaufgabe dient im Allgemeinen dazu den Komplexitätsgrad der Merkaufgabe zu erhöhen und führt dazu, dass der CST auch als *Symmetry Span Task* bekannt ist (vgl. [237]). Nachdem das letzte Item bzw. Feld gezeigt wurde, mussten die Probanden die Position und Reihenfolge der zuvor gesehenen Felder durch Klicken in die 4 x 4 Matrix richtig wiedergeben. Für jede richtige Wiedergabe erhielten die Probanden einen Punkt. Bei drei Wiederholungen pro Schwierigkeitsgrad konnten dadurch maximal zwölf Punkte erreicht werden. Aufgrund der erhöhten Komplexität des CST wurde davon ausgegangen, dass sich beim CST anders als beim FDST kein Lerneffekt einstellt. Ergänzend sei erwähnt, dass hier eine gekürzte Version des CST verwendet wurde, welche nur ca. zehn Minuten in Anspruch nahm. Gekürzte CST sind dennoch ein geeignetes Mittel, um das Arbeitsgedächtnis zu evaluieren [239].

Als zweiter objektiver Test wurde ein d2-R Test zur Beurteilung der Aufmerksamkeit/Konzentration eingesetzt [240], welcher z.B. auch in im Rahmen einer Studie zu nicht-visuellen Effekten mit Schülern verwendet wurde (siehe [10]). Der d2-R Test besteht aus mehreren Zeilen der Buchstaben „d“ und „p“, wobei zusätzlich jeweils null bis zwei kleine Striche über- oder unterhalb der Buchstaben zu sehen sind. Aufgabe der Probanden war es die Zeilen zu scannen und alle „d“

mit insgesamt zwei Strichen (über- und/oder unterhalb) zu markieren. Für jedes richtig gesetzte Kreuz erhielten die Probanden einen Punkt, sodass maximal 130 Punkte erreicht werden konnten. Für falsch gesetzte Kreuze erhielten die Teilnehmer Minuspunkte. Der d2-R wurde in Papierform durchgeführt. Mit Blick auf das Szenario *Leuchte aus* wurde die durch die Nachttischlampe erzeugte Beleuchtung als ausreichend bewertet, um den d2-R Test durchführen zu können. Der d2-R Test wurde in vier bis fünf Minuten durchgeführt.

4.2.3.4 ABLAUF

Wie auch in der Vorgängerstudie standen drei voneinander unabhängige Versuchsumgebungen zur Verfügung, sodass bis zu drei Probanden den Versuch parallel durchführen konnten. Der Ablauf vor Studienbeginn ähnelte dabei stark dem Prozedere der vorherigen Studie (siehe Abschnitt 4.1.3.4). Am Tag vor der Versuchsdurchführung wurden die Testpersonen darum gebeten ihre übliche Zubettgehzeit beizubehalten und den Kaffeekonsum am Versuchstag an ihrem Alltag zu orientieren. Nachdem die Probanden zum vereinbarten Termin im Labor eintrafen, wurden sie gebeten in der ihnen zugewiesenen Kabine Platz zu nehmen und ihren Stuhl entsprechend den Vorgaben aus Abschnitt 4.1.3.2 einzustellen. Im Anschluss daran begann der Versuch mit dem in Abbildung 4.13 dargestellten Ablauf.

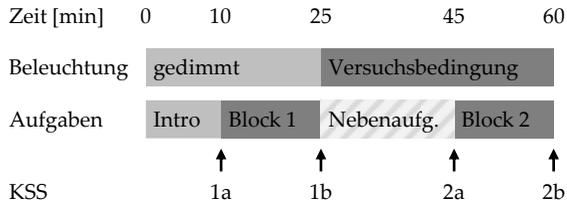


Abbildung 4.13: Ablauf des 60-minütigen Versuchs mit zwei Testblöcken und monotoner Nebenaufgabe. Je nach Versuchsbedingung wird nach 25 Minuten das Lichtpanel eingeschaltet.

Bei gedimmtem Licht wurde mit einem Einführungsblock von 10 Minuten gestartet, während dem sich die Probanden mit der Versuchsumgebung und den Tests vertraut machen durften. Die hier bearbeiteten KSS und gekürzten Leistungstests flossen nicht in die spätere Auswertung mit ein. Anders als bei der ersten Studie wurden die Versuchsanweisungen in dieser Studie nicht auf Papier, sondern in digitaler Form auf dem Bildschirm präsentiert. Die Anweisungen selbst orientierten sich dabei an den Anweisungen der ersten Studie.

Nach zehn Minuten folgte der erste 15-minütige Messblock, zu dessen Beginn die KSS abgefragt wurde. Im Anschluss daran wurden der CST sowie der d2-R Test durchgeführt. Zum Abschluss des Blocks wurde erneut die KSS abgefragt.

25 Minuten nach Versuchsbeginn wurde das entsprechende Lichtszenario gestartet (*Leuchte aus, kleine Leuchte* oder *große Leuchte*) und mit der Nebenaufgabe begonnen. Als Nebenaufgabe musste erneut eine 20-minütige Naturdokumentation ohne Ton angeschaut werden.

Im Anschluss an die Nebenaufgabe bzw. 45 Minuten nach Versuchsbeginn wurde mit dem zweiten Messblock über 15 Minuten begonnen, welcher identisch zum ersten Messblock ablief. Je nach Lichtszenario blieb das Lichtpanel hierbei eingeschaltet. Nach Abschluss des Messblocks bzw. 60 Minuten nach Versuchsbeginn durften die Probanden die Kabinen wieder verlassen.

4.2.3.5 STATISTISCHE ANALYSE

Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte analog der in Abschnitt 4.1.3.5 beschriebenen Methode mittels deskriptiver Statistik und inferenzstatistischer Analyse (LMM). In den nachfolgenden Tabellen sind die hypothesengeleiteten Kontraste zu sehen, welche im Rahmen dieser Studie zur Analyse der Daten verwendet wurden.

Tabelle 4.5: Orthogonale Kontraste für den Faktor Lichtszenario

Lichtszenario	Kontrast 1	Kontrast 2
Leuchte aus	-2	0
kleine Leuchte	1	-1
große Leuchte	1	1

Tabelle 4.6: Orthogonaler Kontrast für den Faktor Messzeitpunkt

Messzeitpunkt	Kontrast
Block 1	1
Block 2	-1

4.2.4 ERGEBNISSE

Im folgenden Teilabschnitt werden die Ergebnisse der Datenanalyse präsentiert. KSS, DST und d2-R wurden sowohl deskriptiv, als auch inferenzstatistisch ausgewertet. Aufgrund unvollständiger Daten mussten drei Datensätze der KSS gestrichen werden, sodass nur 29 Datensätze ausgewertet werden konnte. Beim CST mussten zwei Datensätze aufgrund fehlender Messpunkte verworfen werden, wodurch hier 30 Datensätze analysiert wurden.

4.2.4.1 KAROLINSKA SLEEPINESS SCALE (KSS)

Analog dem Vorgehen in der vorherigen Studie wurden die zu Beginn und am Ende der Messblöcke erhobenen KSS Werte gemittelt, sodass nur noch ein Wert pro Block vorlag. Die nicht gemittelten Werte sind in Anhang C.1 zu finden. Der Verlauf der gemittelten KSS Mittelwerte wird inklusive 95% Konfidenzintervall in Abbildung 4.14 visualisiert. Ergänzend sind Boxplots sowie tabellarisch dargestellte Mittelwerte und Standardabweichungen der KSS Wertungen in Anhang C.2 zu finden.

Die inferenzstatistische Analyse der Daten mittels LMM zeigte, dass der Faktor Messzeitpunkt keinen signifikanten Einfluss auf die subjektive Müdigkeit hatte, $\chi^2(1) = 1,41, p = 0,23$. Dahingegen wurde ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Lichtszenario aufgedeckt, $\chi^2(2) = 9,77, p = 0,01$. Ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen den Faktoren Messzeitpunkt und Lichtszenario stellte sich allerdings

nicht ein, $\chi^2(2) = 2,02$, $p = 0,37$. Im Rahmen der anschließenden Kontrastanalyse konnte beobachtet werden, dass sich die Probanden in Szenarien mit Licht (*kleine* und *große Leuchte*; $M = 6,44$, $SD = 1,70$) signifikant müder fühlten als im Szenario *Leuchte aus* ($M = 5,72$, $SD = 1,71$), $b = 0,24$, $t(104) = 3,09$, $p = 0,003$. Die Effektgröße ist klein, $r = 0,29$.

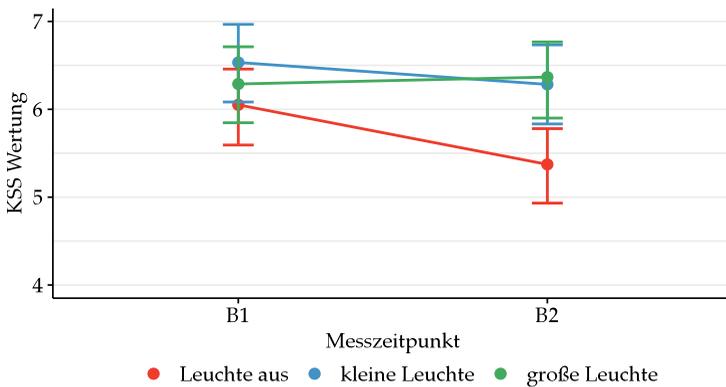


Abbildung 4.14: Mittlere KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto geringer fällt die Wertung aus.

4.2.4.2 COMPLEX SPAN TASK (CST)

Um das Arbeitsgedächtnis zu testen, wurde ein CST mit einer Symmetriaufgabe als Nebenaufgabe eingesetzt. Pro richtig wiedergegebener Merkaufgabe erhielten die Probanden einen Punkt. Bei vier Schwierigkeitsgraden und jeweils drei Wiederholungen konnten dadurch maximal zwölf Punkte erreicht werden. In Abbildung 4.15

ist der Verlauf der im Mittel erreichten CST Punktzahl in Abhängigkeit des Blocks und des Lichtszenarios dargestellt. Anhang C.3 zeigt ergänzende Ergebnisse.

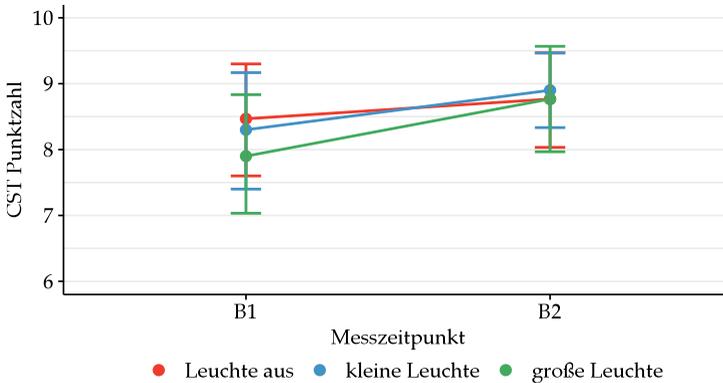


Abbildung 4.15: Mittelwerte der CST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.

Die inferenzstatistische Analyse der Daten zeigte einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Messzeitpunkt auf die Leistung des Arbeitsgedächtnis, $\chi^2(1) = 5,41, p = 0,02$. Der Faktor Lichtszenario hatte keine signifikante Wirkung, $\chi^2(2) = 1,07, p = 0,58$. Gleiches gilt für die Interaktion aus Messzeitpunkt und Lichtszenario, $\chi^2(2) = 0,86, p = 0,65$. Mit Hilfe der Kontrastanalyse konnte im Anschluss aufgezeigt werden, dass die Merkfähigkeit der Probanden während des ersten Messblocks ($M = 8,22, SD = 2,45$) signifikant geringer ausfiel als während des zweiten Messblocks ($M = 8,81, SD = 1,99$), $b = -0,29, t(29) = -2,32, p = 0,03, r = 0,40$.

4.2.4.3 D2-R TEST

Über die Anzahl der richtig oder falsch angekreuzten Targets konnte beim d2-R Test die Konzentrationsleistung der Probanden ermittelt werden. Bei idealer Konzentrationsleistung lag die zu erreichende Punktzahl bei 130. Wie die Konzentrationsleistungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario verlief wird in Abbildung 4.16 dargestellt. Boxplots sowie die tabellarische Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Anhang C.4 zu finden.

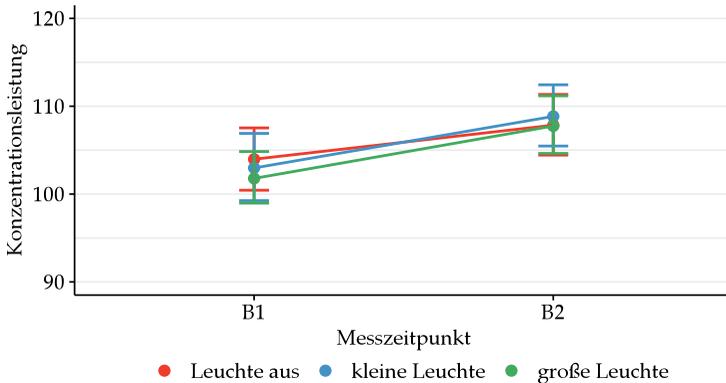


Abbildung 4.16: Mittelwerte der Konzentrationsleistung in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.

Im Rahmen der Analyse mittels LMM konnte ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Messzeitpunkt auf die Konzentrationsleistung festgestellt werden, $\chi^2(1) = 35,39, p < 0,001$. Dahingegen stellte sich kein signifikanter Effekt des Faktors Lichtszenario ein,

$\chi^2(2) = 1,72$, $p = 0,42$. Die Interaktion der beiden Faktoren Messzeitpunkt und Lichtszenario war ebenfalls nicht signifikant, $\chi^2(2) = 1,40$, $p = 0,50$. Zur detaillierteren Untersuchung wurden die Daten mit Hilfe der zuvor festgelegten Kontraste analysiert. Hier konnte beobachtet werden, dass die Konzentrationsleistung der Probanden vor der Nebenaufgabe signifikant schlechter ausfiel ($M = 102,91$, $SD = 10,06$) als nach dem Schauen der Dokumentation ($M = 108,15$, $SD = 9,95$), $b = -2,62$, $t(31) = -6,34$, $p < 0,001$. Der Effekt fiel groß aus, $r = 0,75$.

4.2.5 DISKUSSION

4.2.5.1 EINFLUSS DES MESSZEITPUNKTS

Unabhängig vom Lichtszenario konnte im Rahmen dieser Studie kein signifikanter Anstieg der subjektiven Müdigkeit vom ersten ($M = 6,34$, $SD = 1,70$) zum zweiten Messblock nachgewiesen werden ($M = 6,07$, $SD = 1,76$), sodass die Alternativhypothese $H_{1.1}$ in Bezug auf die KSS verworfen werden muss. Die Ergebnisse stehen damit im Gegensatz zu den Erkenntnissen der Vorgängerstudie, bei der die Messblöcke die gleiche Länge hatten und die gleiche Nebenaufgabe verwendet wurde. Da dort mit Hilfe von drei redundanten Tests die signifikant ermüdende Wirkung der Nebenaufgabe nachgewiesen werden konnte (vgl. Abschnitt 4.1.5.1), liegt hier möglicherweise ein

Fehler zweiter Art vor, welcher dazu führt, dass die Alternativhypothese fälschlicherweise verworfen wurde.

Werden die Ergebnisse des CST und d2-R Tests betrachtet, so konnte ebenfalls keine signifikante Verschlechterung der Leistung zwischen dem ersten und zweiten Messblock beobachtet werden. Ganz im Gegenteil. Mit Blick auf das Arbeitsgedächtnis zeigte sich nach der Nebenaufgabe ($M = 8,81$, $SD = 1,99$) eine signifikant verbesserte Leistung als davor ($M = 8,22$, $SD = 2,45$). Ein ähnliches Bild ergab sich beim d2-R Test, bei dem die Konzentrationsleistung nach der Nebenaufgabe ($M = 108,15$, $SD = 9,95$) im Vergleich zu davor ebenfalls zunahm ($M = 102,91$, $SD = 10,06$). Dies deutet darauf hin, dass beide Tests einem Lerneffekt unterliegen, welcher beim CST mit mittlerer ($r = 0,40$) und beim d2-R Test mit großer Effektgröße ($r = 0,75$) einhergeht. Das verfolgte Ziel einen für den Lerneffekt weniger empfindlichen Test zu finden konnte damit nicht verwirklicht werden. Da dadurch keine schläfrig machende Wirkung der Nebenaufgabe nachgewiesen werden konnte, wird die Hypothese $H_{1.1}$ mit Blick auf den CST und d2-R Test verworfen.

4.2.5.2 EINFLUSS VON HELLEM LICHT

Wird der Einfluss des Lichtszenarios auf die durch die KSS erhobene *Alertness* betrachtet, so zeigt sich ein weiteres Ergebnis, welches im Gegensatz zu den Erkenntnissen der Vorgängerstudie steht. Anders als erwartet fühlten sich die Probanden nicht schläfriger, sondern

signifikant wacher, wenn das Szenario *Leuchte aus* ($M = 5,72$, $SD = 2,26$) mit den kombinierten Szenarien *kleine* und *große Leuchte* ($M = 6,44$, $SD = 1,70$) verglichen wird. Eine mögliche Erklärung für diesen kleinen Effekt ($r = 0,29$) ist, dass das durchschnittliche Müdigkeitsniveau zu Beginn des Szenarios *Leuchte aus* auf einem niedrigeren Niveau lag ($M = 6,04$, $SD = 1,65$) als bei den anderen beiden Szenarien (*kleine Leuchte*: $M = 6,70$; $SD = 1,69$; *große Leuchte*: $M = 6,28$; $SD = 1,73$), wodurch die gesamte Wertung auf ein tieferes Level gezogen wurde. Im Rahmen dieser Studie muss daher die Hypothese $H_{1.2}$ mit Blick auf die subjektive *Alertness* verworfen werden.

Ebenso muss die Hypothese $H_{1.4}$ verworfen werden, da sich kein signifikanter, vom Licht abhängiger Unterschied der subjektiven *Alertness* beobachten zwischen den Messblöcken ließ. Die Ergebnisse zeigen, dass die subjektive Müdigkeit bei eingeschaltetem Licht auf einem ähnlichen Niveau blieb. Dies entspricht den Beobachtungen aus der ersten Studie (vgl. Abschnitt 4.1.4.1). Bei ausgeschaltetem Licht stieg die Müdigkeit jedoch nicht wie erwartet an, sondern blieb auf ihrem Niveau bzw. sank tendenziell sogar. Hier stehen die Beobachtungen im Gegensatz zur ersten Studie, bei der die Probanden ohne Licht signifikant müder wurden. Eine mögliche Ursache für diese Beobachtung liefert erneut das Müdigkeitsniveau zu Beginn der Studie. In der Vorgängerstudie starteten die Probanden mit einer KSS Wertung von $M = 3,41$, $SD = 1,09$, welche nach der Nebenaufgabe auf $M = 5,02$, $SD = 1,42$ anstieg. Hier hingegen starteten die Probanden mit einer deutlich höheren Müdigkeit von $M = 6,04$, $SD = 1,65$, welche nach der Nebenaufgabe auf $M = 5,41$, $SD = 1,73$ abfiel.

Eventuell war das Müdigkeitsniveau hier bei Beginn bereits so hoch, dass die monotone Nebenaufgabe keinen Ermüdungseffekt hervorrufen konnte, welchem das Licht entgegenwirken hätte können.

Hinsichtlich der Leistungstests müssen die Alternativhypothesen $H_{1.2}$ und $H_{1.4}$ verworfen werden, da weder beim CST noch beim d2-R Test signifikante Haupteffekte des Faktors Lichtszenario oder signifikante Interaktionseffekte nachgewiesen werden konnten. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen der Vorgängerstudie, bei der ebenfalls kein signifikanter Einfluss der Versuchsbedingung oder der Interaktion aus Messzeitpunkt und Lichtszenario auf die Leistung nachgewiesen werden konnte (siehe Abschnitte 4.1.4 und 4.1.5). Falls Licht die Leistung bei kognitiven Tests zuverlässig positiv beeinflussen kann, so scheinen die Effekte sehr klein zu sein. Um kleine Effekte zuverlässig nachweisen zu können, ist allerdings eine größere als die hier verwendete Anzahl an Probanden notwendig, wodurch der organisatorische Aufwand bei der Datenerhebung deutlich steigt. Ob kleine Effekte diesen Aufwand mit Blick auf eine praktische Anwendung rechtfertigen, ist kritisch zu hinterfragen.

4.2.5.3 EINFLUSS DES RAUMWINKELS

Wird der Einfluss des Raumwinkels auf die Ergebnisse betrachtet, so lässt sich bei keiner der abhängigen Variablen ein signifikanter Effekt beobachten. Daher werden die Hypothesen $H_{1.3}$ und $H_{1.5}$ verworfen. Die Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen der

Vorgängerstudie, bei der ebenfalls keinerlei Einfluss des Raumwinkels auf die subjektive *Alertness* und leistungsbezogene Parameter nachgewiesen werden konnte. Ob der Raumwinkel wie in der Vorgängerstudie Einfluss auf den visuellen Komfort und die psychologische Blendung genommen hat, lässt sich hier aufgrund der nicht erhobenen Daten nicht beurteilen.

4.2.5.4 DISKUSSION DER UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Die hier vorgestellte Untersuchung sollte die Methodik der Vorgängerstudie aufgreifen und optimieren. Im Hinblick auf die Versuchsdauer und den Einfluss etwaiger Messsysteme auf die Datenqualität konnte dies auch bewerkstelligt werden. So konnte die Zeit pro Versuchsdurchführung auf 60 Minuten reduziert werden, indem auf den wirkungslosen dritte Messblock der ersten Studie verzichtet wurde. Der Einfluss des Messsystems auf die Datenqualität konnte eliminiert werden, indem Leistungstests verwendet wurden, deren primäre Ergebnisse unabhängig von der Latenz des Messsystems sind. Die anderen Studienziele konnten allerdings nicht umgesetzt werden. Zum einen konnte der positive Einfluss der hellen Lichtszenarien auf die subjektive *Alertness* nicht reproduziert werden. Zum anderen konnten bei der kognitiven Leistungsfähigkeit trotz andersartiger Tests erneut keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden, welche sich auf das Lichtszenario zurückführen ließen.

In Kapitel 3.3 wurde der Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit auf Untersuchungen mit weniger streng kontrollierten und extremen Versuchsbedingungen gelegt. Basierend auf den Ergebnissen der ersten Studie wurde diese Herangehensweise als vielversprechend und das daraus abgeleitete Konzept als geeignet bewertet (siehe Abschnitte 4.1.4 & 4.1.5). Werden die Ergebnisse der ersten und zweiten Untersuchung kombiniert betrachtet, so muss diese Herangehensweise überdacht werden. Während die erste Studie noch einen signifikant positiven Einfluss von Licht auf die subjektive *Alertness* nachweisen konnte, konnten in der hier diskutierten Studie keinerlei positive Lichteffekte beobachtet werden. Im Hinblick auf die leistungsbezogenen Parameter und unter Berücksichtigung der Analyse von Souman et al. ist dies nachvollziehbar, da sich nicht-visuelle Effekte eher auf subjektiver Ebene und seltener auf leistungsbezogener Ebene beobachten lassen [130]. Analog zur ersten Studie wurde allerdings erwartet, dass sich die Lichtwirkung auch in dieser Studie signifikant in den Ergebnissen der subjektiven *Alertness* niederschlägt. Bei gleichbleibenden Lichtszenarien gelang dies allerdings nicht. Es ist daher fraglich, ob das Studienkonzept mit seinen wenig restriktiven Anforderungen (z.B. Auswahl des Probandenkollektivs oder Uhrzeit der Studiendurchführung) im Kontext einer automobilen Anwendung sinnvoll gewählt ist, um nicht visuelle Effekte hervorzurufen. Exemplarisch soll hierzu die Uhrzeit der Studiendurchführung und deren Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit herangezogen werden. Mit Hilfe der Studie bzw. Studien sollte eine morgendliche Fahrt zur Arbeit (automatisiert oder chauffiert) nachgeahmt werden. Die Uhrzeiten zu denen die Daten erhoben wurde,

entsprachen dem allerdings nicht. Die Daten der ersten Studie wurden zwischen 08:30 und 12:00 Uhr erhoben, während die Daten der zweiten Studie zwischen 08:00 und 11:30 Uhr erhoben wurde. Bedingt durch die circadiane Rhythmik steigt zu diesen Uhrzeiten die kognitive Leistungsfähigkeit, um gegen Mittag ihren Höhepunkt zu erreichen (siehe [108]). Möglicherweise konnte kein Einfluss der Lichtbedingung auf die kognitive Leistungsfähigkeit festgestellt werden, da sich die Probanden zur Uhrzeit der Datenerhebung bereits auf einem hohen kognitiven Niveau befanden. Die Studien zu einem früheren Zeitpunkt (z.B. 07:00 Uhr) durchzuführen, wäre daher vermutlich effektiver gewesen, um lichtinduzierte Effekte hervorrufen zu können.

Basierend auf den bisher gesammelten Erkenntnissen und der aktuellen Studienlage zu nicht-visuellen Effekten (siehe Kapitel 2.4) entsteht der Eindruck, dass sich nicht visuelle Effekte primär in „extremen“ Situationen hervorrufen lassen (z.B. bei Schlafdefizit, spät in der Nacht, früh am Morgen, etc.). In zukünftigen Studien mit Bezug zum Automobil sollten daher auch andere Anwendungsfälle für nicht-visuelle Effekte berücksichtigt werden, welche z.B. mit einer längeren Lichtexposition am frühen Morgen oder am späten Abend einhergehen.

4.2.6 FAZIT

Wie zuvor erwähnt sollte die hier vorgestellte Studie das Konzept der Vorgängerstudie aufgreifen und optimieren. Dadurch sollten lichtinduzierte nicht-visuelle Effekte nicht nur subjektiven, sondern auch bei leistungsbezogenen Parametern sichtbar gemacht werden.

Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass die hellen Lichtpanels (*kleine* oder *große Leuchte*) trotz anderer Tests (*complex span* & *d2-R*) erneut keinen Einfluss auf die kognitive Leistungsfähigkeit hatten. Zudem konnten selbst die subjektiven Ergebnisse der Vorgängerstudie nicht reproduziert werden. Entgegen der Erwartungen zeigte sich, dass sich die Probanden während des Szenarios ohne Licht signifikant wacher fühlten als in den anderen beiden Szenarien. Dieser Effekt wurde jedoch auf das allgemein niedrigere Müdigkeitsniveau der Versuchspersonen zu Beginn des Szenarios *Leuchte aus* zurückgeführt. Der Raumwinkel der Lichtquelle spielte abermals keinerlei Rolle.

Diese Beobachtungen führten zu der Vermutung, dass das wenig streng kontrollierte Studienkonzept nicht dazu geeignet ist, um zuverlässig nicht-visuelle Effekte nachweisen zu können. Mit Blick auf zukünftige Untersuchungen im Bereich Automobil wird daher empfohlen das Versuchsdesign zu überdenken und seltenere sowie extremere Anwendungsfälle als das morgendliche Pendeln zur Arbeit bei der Studiengestaltung zu berücksichtigen.

4.3 NICHT-VISUELLE LICHTWIRKUNG IN EINEM FAHRSIMULATOR

4.3.1 FORSCHUNGSSCHWERPUNKT

Die vorherigen Studien haben gezeigt, dass ihr Versuchsdesign nicht dazu geeignet ist, um die subjektive Müdigkeit reproduzierbar und die kognitive Leistungsfähigkeit generell mit Licht zu beeinflussen. Für eine weitere Studie wird daher unter Berücksichtigung strengerer Randparameter ein neues Versuchsdesign erarbeitet, um die nicht-visuelle Lichtwirkung im Kontext des Automobils zu analysieren. Die Stellschrauben zur Neugestaltung des Konzepts sind der angedachte Anwendungsfall, die daraus abgeleiteten abhängigen und unabhängigen Variablen, die Anforderungen an das Probandenkollektiv sowie die Gestaltung der Versuchsumgebung.

Als Ausgangspunkt für den Anwendungsfall dient weiterhin die morgendliche Autofahrt, deren Randbedingungen im Vergleich zu den Vorgängerstudien variiert werden. Die Abweichungen betreffen dabei den Beginn und die Dauer der Fahrt sowie der damit einhergehenden Lichtexposition. Wie bereits erwähnt schwankt die kognitive Leistungsfähigkeit tageszeitabhängig und erreicht mittags ihren Höhepunkt [108]. Im Vergleich zu den vorherigen Untersuchungen beginnt die Studie daher zu einem Zeitpunkt, an dem sich die kognitive Leistungsfähigkeit auf einem niedrigeren Niveau befindet (06:30 Uhr). Dadurch soll sich der Einfluss der unterschiedlichen

Lichtsznarien stärker in der Ausprägung der erhobenen Parameter bemerkbar machen. Mit dem gleichen Ziel wird die Lichtexpositionszeit erhöht (ca. 90 Minuten). Wie in Abschnitt 2.4.5 beschrieben, konnten Chang et al. beobachten, dass die Unterdrückung von Melatonin mit zunehmender Lichtexpositionsdauer steigt [190]. Mit diesen Änderungen entspricht der Anwendungsfall zeitlich nicht mehr der morgendlichen Fahrt zur Arbeit, sondern kann z.B. als morgendliche Dienstreise interpretiert werden. Mit Blick auf den visuellen Komfort und die bauraumseitigen Einschränkungen im Fahrzeuginnenraum werden die lichttechnischen Parameter und damit auch die Lichtsznarien der Vorgängeruntersuchungen übernommen (*Leuchte aus, kleine und große Leuchte*). Zwar könnten eine höhere Beleuchtungsstärke zu stärker ausgeprägten nicht-visuellen Effekten führen (vgl. Abschnitt 2.4.1), jedoch wird diese unter Berücksichtigung der als gerade akzeptabel eingestuften Blendwirkung der kleinen Leuchte (siehe Abschnitt 4.1.4.6) nicht erhöht werden.

Unter Berücksichtigung dieser Leitlinien geht die Studie der Frage nach, welchen Einfluss eine morgendliche Lichtexposition auf die subjektive Müdigkeit sowie leistungsbezogene und physiologische Parameter der Versuchsteilnehmer hat. Hierbei soll zudem beantwortet werden, ob der Raumwinkel einer Lichtquelle die Ausprägung nicht-visueller Effekte beeinflusst, wenn die Lichtquellen die gleiche Beleuchtungsstärke am Auge erzeugen.

Zur Beantwortung dieser Frage werden erneut bewährte subjektive Fragebögen und Leistungstests herangezogen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Diese werden jedoch durch physiologische Daten bzw. den

Melatoninspiegel ergänzt, um analog zu vielen der in Abschnitt 2.4 vorgestellten Studien ein detaillierteres Bild der nicht-visuellen Lichtwirkung zeichnen zu können. Mit Blick auf das Automobil wird zudem der Anwendungsfall des passiven Mitfahrens um das aktive Fahren erweitert. Dadurch kann nicht nur analysiert werden, wie Licht die Leistung bei z.B. Merkfähigkeitstests, sondern auch beim Lenken eines Fahrzeugs selbst beeinflusst. Da Blendung durch die zum Auslösen nicht-visueller Effekte verwendeten Lichtquellen als sicherheitsrelevantes Risiko für den Fahrer und andere Verkehrsteilnehmer gesehen wird, wird die Studie in einem Fahrsimulator durchgeführt. Die simulierte Fahrt soll die monotone Nebenaufgabe der vorherigen Studien ersetzen. Die allgemeine Datenerhebung erfolgt wie in den vorherigen Studien über mehrere Messzeitpunkte bzw. -blöcke hinweg, um zeitabhängige Veränderungen der abhängigen Variablen visualisieren zu können.

4.3.2 HYPOTHESEN

Basierend auf den zuvor formulierten Fragestellungen und unter Berücksichtigung der zuvor genannten Leitlinien werden nachfolgende Hypothesen formuliert, welche im Rahmen der Studie analysiert werden sollen. Die unabhängigen Variablen sind der Zeitpunkt der Datenerfassung sowie das Lichtszenario, wobei beim Lichtszenario sowohl zwischen Licht/kein Licht, als auch zwischen kleiner/großer Raumwinkel unterschieden werden muss. Die abhängigen Variablen

sind Merkmale der subjektiven *Alertness*, die Fahrleistung und sonstige kognitive Leistungsparameter sowie der Melatoninspiegel.

Hinsichtlich der subjektiven *Alertness* und den leistungsbezogenen Merkmalen wird erwartet, dass diese aufgrund der monotonen Versuchsgestaltung über die Messzeitpunkte hinweg negativer ausfallen. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass dem durch helles Licht entgegengewirkt werden kann. In welche Richtung der Raumwinkel die Ergebnisse beeinflusst, ist nicht klar. Nachfolgend werden die subjektive *Alertness* und die leistungsbezogenen Merkmale austauschbar als AV bezeichnet. Mit „positiver“ werden wacher, aufmerksamer und leistungsfähiger in Verbindung gebracht. Mit „negativer“ die entsprechenden Gegenteile. Davon ausgehend lassen sich die nachfolgenden Alternativhypothesen formulieren:

- H_{1.1}: Die Ausprägung der AV fällt über die Messzeitpunkte hinweg negativer aus.
- H_{1.2}: Die Ausprägung der AV fällt mit hellem Licht positiver aus als ohne helles Licht.
- H_{1.3}: Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert die Ausprägung der AV in Abhängigkeit des Raumwinkels der Lichtquelle.
- H_{1.4}: Die Ausprägung der AV fällt mit hellem Licht über die Messzeitpunkte hinweg positiver aus als ohne helles Licht.

H_{1.5}: Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert die Ausprägung der AV über die Messzeitpunkte hinweg in Abhängigkeit des Raumwinkels der Lichtquelle.

Ergänzend hierzu lassen sich die folgenden Hypothesen für den Melatonin Spiegel formulieren. Hier sei erwähnt, dass aufgrund der circadianen Rhythmik über die Messzeitpunkte hinweg von einem fallenden Melatonin Spiegel ausgegangen wird, dessen Absinken durch helles Licht beschleunigt werden soll.

H_{1.6}: Der Melatonin Spiegel sinkt über die Messzeitpunkte hinweg.

H_{1.7}: Der Melatonin Spiegel liegt mit hellem Licht auf einem niedrigeren Niveau als ohne helles Licht.

H_{1.8}: Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert der Melatonin Spiegel in Abhängigkeit des Raumwinkels der Lichtquelle.

H_{1.9}: Mit hellem Licht sinkt der Melatonin Spiegel über die Messzeitpunkte hinweg schneller als ohne helles Licht.

H_{1.10}: Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge variiert der Verlauf des Melatonin Spiegels über die Messzeitpunkte hinweg in Abhängigkeit des Raumwinkels der Lichtquelle.

Zu guter Letzt wird die Alternativhypothese zur raumwinkelabhängigen Blendwirkung aus der ersten Probandenstudie übernommen und untersucht (vgl. Abschnitt 4.1.2):

H_{1.11}: Bei konstanter Beleuchtungsstärke am Auge sinkt die Blendwirkung mit zunehmendem Raumwinkel einer Lichtquelle.

4.3.3 METHODE

4.3.3.1 STUDIENDESIGN & STICHPROBE

Wie auch bei den Vorgängerstudien wurde bei der hier beschriebenen Untersuchung ein *within-subject* Design mit den messwiederholten Faktoren Lichtszenario (*Leuchte aus*, *kleine Leuchte*, und *große Leuchte*; siehe Abschnitt 4.1.3.1) und Messzeitpunkt verwendet. Hierbei kamen erneut die bereits bekannten Lichtpanels zum Einsatz, welche dieses Mal in einen Fahrsimulator integriert wurden. Eine detailliertere Beschreibung der Versuchsumgebung folgt in Abschnitt 4.3.3.2. Startzeitpunkt der Versuchstermine war immer um 06:00 Uhr, wohingegen die Erhebung relevanter Daten um ca. 06:30 Uhr begann. Das entsprechende Lichtszenario wurde um 07:00 Uhr gestartet und hatte eine Dauer von 90 Minuten. Der Studienablauf selbst wird in Abschnitt 4.3.3.4 genauer erläutert.

Bei der Probandenauswahl wurde erneut darauf geachtet das Kollektiv mit Hilfe des *Morningness-Eveningness-Questionnaire* zu homogenisieren, indem Testpersonen der Ausprägung „extremer Morgentyp“ oder „extremer Abendtyp“ von der Studienteilnahme ausgeschlossen wurden. Ansonsten galten die Kriterien bzw. Anforderungen der Vorgängerstudien (vgl. z.B. Abschnitt 4.1.3.1).

Insgesamt nahmen 17 Probanden an der Studie teil (9 männlich, 8 weiblich). Ihr Durchschnittsalter betrug $34,88 \pm 9,16$ (*SD*) Jahre.

Die Probandenstudie wurde am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW) durchgeführt. In Bezug auf ethische und datenschutzrechtliche Aspekte wurde das Studiendesign von der internen Ethikprüfung und vom Datenschutzbeauftragten des WIVW genehmigt. Unter Berücksichtigung eines speziellen Hygienekonzeptes (COVID-19-Pandemie) fand die Datenerhebung zwischen Ende August und Anfang Oktober 2020 statt.

4.3.3.2 VERSUCHSUMGEBUNG

In dieser Studie wurden die bereits bekannten Lichtpanels in zwei räumlich voneinander getrennte Fahrsimulatoren integriert, sodass der Versuch von zwei Probanden parallel durchgeführt werden konnte. Beide Simulatoren standen in Räumen, welche komplett abgedunkelt werden konnten. Zur Grundausrüstung der Simulatoren gehörte ein verstellbarer Fahrzeugsitz, ein Lenkrad mit Tasten, Pedalerie zum Beschleunigen und Bremsen, ein vor den Probanden positionierter Monitor zum Anzeigen der simulierten Fahrt sowie ein Computer. Abbildung 4.17 zeigt, wie die verwendeten Simulatoren aussahen (ohne lichttechnische Modifikationen).

Innerhalb der Simulatoren wurden die Lichtpanels schräg oberhalb der Monitore angebracht, welche zur Visualisierung der simulierten Fahrt verwendet wurden (vgl. Abbildung 4.18). Die Panels wurden

dabei so ausgerichtet, dass sie durch ihre räumliche Positionierung und Orientierung die Gegebenheiten aus den Vorgängerstudien reproduzierten (vgl. Abschnitt 4.1.3.2). Aus lichttechnischer Sicht wurde demnach über alle drei Studien hinweg das gleiche geometrische Setup verwendet. Die Einstellung der richtigen Sitzposition wurde in einem von den drei Versuchsdurchführungen unabhängigen Termin durchgeführt. Dazu später mehr.



Abbildung 4.17: Manuelle Fahrt in einem Fahrsimulator (ohne lichttechnische Anpassungen)

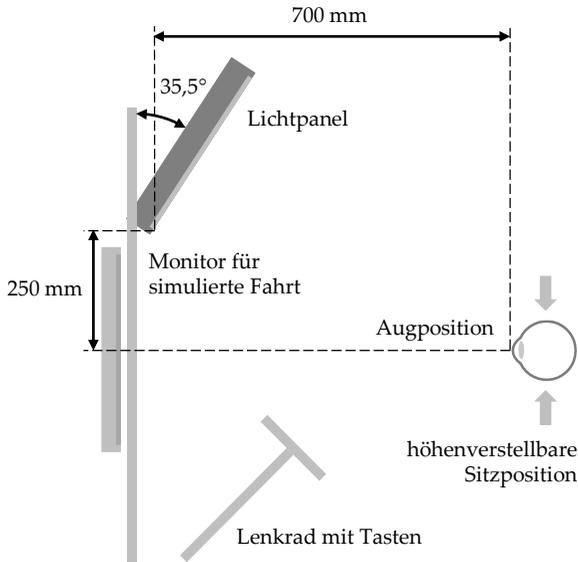


Abbildung 4.18: Schematische Seitenansicht der Versuchsumgebung im Fahrsimulator

Um neben den geometrischen Eigenschaften der Lichtpanels auch die lichttechnischen Parameter der Vorgängerstudien zu reproduzieren, wurden die Panels vor Studienbeginn neu eingestellt und mit Hilfe eines Spektrometers vermessen (Gigahertz-Optik BTS25-EF). Im Szenario *kleine Leuchte* erschienen die Lichtpanels daher erneut unter einem Raumwinkel von 0,05 sr und erzeugten bei einer Farbtemperatur von ca. 6500 K eine Beleuchtungsstärke von ca. 200 lx am Auge der Probanden. Ohne eingesetzte Blende bzw. im Szenario *große Leuchte* wurde das Lichtpanel unter einem Raumwinkel von 0,44 sr wahrgenommen und erzeugte bei einer Farbtemperatur von ca. 6500 K ebenfalls ca. 200 lx am Auge. Im Vergleich zu den vorherigen Studien

konnte die *melanopic-EDI* in beiden Szenarien jedoch durch Feinjustierung des Spektrums von ca. 167 lx auf ca. 200 lx erhöht werden. Hinsichtlich nicht-visueller Effekte war das hier verwendete Spektrum demnach effektiver. Neben den Lichtpanels wurde außerdem die bereits bekannte Nachttischleuchte wiederverwendet, um die Hintergrundbeleuchtung zu erzeugen. Analog zu den Vorgängerstudien wurde die Leuchte im unteren Bereich des Sichtfeldes positioniert. Bei einer Farbtemperatur von ca. 2200 K erzeugte sie hierbei allerdings nur ca. 5 lx am Auge der Probanden (Szenario *Leuchte aus*). Die Beleuchtungsstärke des Bildschirms wurde wie in den vorherigen Studien vernachlässigt. Detailliertere Informationen zu den spektralen Vermessungen sind in Anhang D.1 zu finden.

4.3.3.3 MESSGRÖßEN

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden sowohl subjektive, physiologische als auch leistungsbezogene Daten erhoben. Das Befragungskonzept zur Erhebung der subjektiven Daten setzte sich dabei aus mehreren Komponenten zusammen.

Die erste Komponente des Befragungskonzeptes beschäftigte sich mit der Verfassung der Probanden vor der eigentlichen Versuchsdurchführung. Hier mussten die Probanden zwei Tage vor Beginn der Frühtermine ein Online-Tagebuch zur Erfassung ihres Tagesablaufs ausfüllen. Außerdem wurden die Testpersonen zu Beginn eines jeden Termins zum Schlaf in der vorherigen Nacht befragt. Durch diese

beiden Maßnahmen sollte es im Nachhinein ermöglicht werden mögliche Ausreißer bei anderen Messgrößen zu erklären. Mit der zweiten Komponente des Befragungskonzeptes wurde die Verfassung der Probanden während der Versuchsdurchführung abgefragt. Hierzu wurde bei jedem Aufgabenwechsel die KSS verwendet. Zusätzlich mussten die Versuchspersonen bei jedem Beleuchtungswechsel den MDBF ausfüllen. Zum Abschluss eines jeden Termins wurden außerdem einige Fragen zur Lichtqualität sowie zur Blendung gestellt (analog zur ersten Studie, vgl. Abschnitt 4.1.3.3).

Um die nicht-visuelle Lichtwirkung auf physiologischer Ebene untersuchen zu können, mussten die Probanden bei jedem Aufgabenwechsel Speichelproben zur Analyse ihres Melatoninspiegels abgeben. Die Studie folgt damit einigen in Kapitel 2.4 beschriebenen Untersuchungen, bei denen ebenfalls der Melatoninspiegel analysiert wurde. In der hier beschriebenen Studie mussten die Probanden ca. zwei Minuten auf einem Wattebausch kauen und dieses anschließend in ein kleines Gefäß zur Aufbewahrung einführen. Das Gefäß wurde im Anschluss zentrifugiert, tiefgefroren und anonymisiert bei einem Labor mittels Radioimmunassays analysiert.

Zur Analyse der leistungsbezogenen Daten kam eine Zusammenstellung aus kognitiven Tests zum Einsatz. Der erste Test war ein *Go-NoGo* Test, bei dem die Probanden eine Abfolge von Punkten und Kreuzen sahen (30% Punkte, 70% Kreuze, 2000 ms ISI). Aufgabe der Probanden war es so schnell wie möglich eine der Tasten am Lenkrad zu drücken, sobald sie den Punkt auf dem Bildschirm sahen. Der *Go-NoGo* Test wurde unter anderem in [6] eingesetzt und spiegelt die

Fähigkeit zur Reaktionsunterdrückung wider (siehe Kapitel 2.3.3). Als zweiter Test wurde ein *2-back task* verwendet, bei dem die Probanden per Tastendruck bestätigen mussten, ob ein auf dem Bildschirm gesehener Buchstabe identisch mit dem vor zwei Positionen gesehen Buchstaben war (20%ige Wahrscheinlichkeit). Der *n-back* Test wurde unter anderem in [142] eingesetzt und spiegelt das Leistungsvermögen des Arbeitsgedächtnis wieder (siehe Abschnitt 2.3.3). Weiterhin wurde ein *Rapid Serial Visual Presentation (RSVP)* Test verwendet. Hier sahen die Probanden eine schnelle Abfolge von Buchstaben und Zahlen auf dem Bildschirm (350 ms Stimulus, 50 ms ISI) und mussten so schnell wie möglich eine Taste ihres Lenkrades drücken, wenn sie eine Zahl sahen (10% Wahrscheinlichkeit). Der RSVP Test wurde explorativ erhoben, da er nach aktuellem Kenntnistand noch nicht zur Erforschung nicht-visueller Effekte verwendet wurde. Mit Hilfe des RSVP Tests kann untersucht werden, wie viel Aufmerksamkeit zur Verarbeitung visueller Informationen nötig ist (siehe z.B. [241]). Alle in dieser Testbatterie verwendeten Tests wurden in weißer Schrift/Symbolik auf schwarzem Hintergrund präsentiert und hatten eine Dauer von ca. 6 Minuten. Bei den hier genannten Tests konnte neben der Hit- bzw. Miss-Rate auch die Reaktionsgeschwindigkeit analysiert werden. Hierauf wurde allerdings aufgrund der im Rahmen des PVT gesammelten Erkenntnisse verzichtet.

Neben der Testbatterie mussten die Probanden auch einer 20-minütigen Fahraufgabe inklusive Nebenaufgabe nachkommen. Bei der Fahraufgabe mussten die Probanden auf einem monotonen Autobahnabschnitt eine konstante Geschwindigkeit von 120 km/h

beibehalten. Zusätzlich sollten sie nur auf der linken Spur fahren (ohne Vorderfahrzeug), da die rechte Spur durch langsamere Fahrzeuge blockiert war. Bei der Fahrt wurde Dämmerung und Nebel simuliert, um die visuellen Kontraste und die Helligkeit gering zu halten. Als Maß für die Fahrleistung wurde die Standardabweichung von der mittleren Fahrstreifenposition herangezogen, da diese unabhängig von der individuellen Fahrstrategie ist und eine gute Vergleichbarkeit zwischen Studien ermöglicht [242]. Während der Fahraufgabe wurde zusätzlich explorativ eine akustische Vigilanzuhr als Nebenaufgabe eingesetzt (vgl. [243]). Hier wurde in regelmäßigen Abständen ein Ton abgespielt (2000 ms ISI), welcher ab und zu ausgelassen wurde (15% Wahrscheinlichkeit). Aufgabe der Probanden war es so schnell wie möglich eine Taste ihres Lenkrades zu drücken, wenn sie eine Auslassung bemerkten. Zur Auswertung wurde auch hier wieder die Miss-Quote herangezogen.

4.3.3.4 ABLAUF

Die Studiendurchführung war in vier Termine unterteilt. Der erste Termin fand tagsüber statt und diente als Einführungstermin, bei dem die Probanden eine Einwilligungserklärung unterschrieben und sich mit der Versuchsumgebung sowie den Aufgaben vertraut machen durften. Zusätzlich wurde ihre Sitzposition für die eigentliche Datenerhebung vermessen. Während den folgenden drei Frühterminen wurden dann die Daten der unterschiedlichen Lichtszenarien erhoben (*Leuchte aus*, *kleine Leuchte* und *große Leuchte*).

Bei den Frühterminen trafen die Probanden um 06:00 Uhr morgens im Labor ein und wurden von der Versuchsleitung begrüßt. Anschließend nahmen sie im ihnen zugewiesenen Fahrsimulator Platz, füllten die Vorbefragung zum Schlaf in der vorherigen Nacht aus (inkl. KSS & MDBF) und gaben eine Speichelprobe ab. Die hier erhobenen Daten flossen nicht in die Auswertung mit ein, da sie lediglich zum Aufdecken möglicher Ausreißer dienten. Auf die Vorbefragung folgte eine ca. 25-minütige Adaptationsphase bei Dunkelheit.

Um 06:30 Uhr begann die eigentliche Versuchsdurchführung. Zu Beginn wurde hier das gedimmte Hintergrundlicht eingeschaltet und die Probanden beantworteten die KSS sowie den MDBF. Zusätzlich wurde eine Speichelprobe entnommen. Danach folgte die erste ca. 20-minütige Testbatterie bestehend aus *Go-NoGo*, *2-back* und RSVP Test. Zum Abschluss der Testbatterie wurden wieder KSS und MDBF beantwortet sowie eine weitere Speichelprobe abgegeben.

Um 07:00 Uhr begann das Lichtszenario (*Leuchte aus*, *kleine Leuchte* und *große Leuchte*). Hier starteten die Probanden mit der ca. 20-minütigen Fahr- und Nebenaufgabe, um dann mit der ca. 20-minütigen Testbatterie fortzufahren. Diese Abfolge wurde anschließend wiederholt, sodass während des Lichtszenarios zwei simulierte Fahrten und zwei Testbatterien durchgeführt wurden. Zwischen den Aufgabenblöcken wurden zusätzlich Speichelproben abgegeben und die KSS beantwortet. Am Ende des Lichtszenarios wurde erneut der MDBF beantwortet sowie die Schlussbefragung zur Lichtqualität und zur Blendung durchgeführt, sodass der Versuch gegen 08:30 Uhr beendet werden konnte.

Abbildung 4.27 zeigt den schematischen Ablauf eines Versuchstages. Die Anweisungen an die Probanden vor der Versuchsdurchführung sind in Anhang D.2 zu finden.

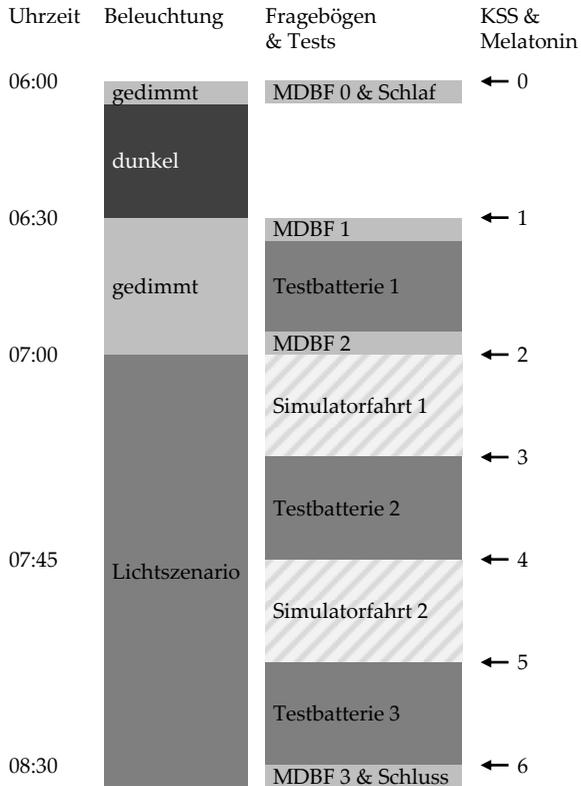


Abbildung 4.19: Ablauf eines Versuchstages im Fahrsimulator

4.3.3.5 STATISTISCHE ANALYSE

Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte analog der in Abschnitt 4.1.3.5 beschriebenen Methodik mittels deskriptiver Statistik und inferenzstatistischer Analyse (LMM). Die Kontraste für den Faktor Lichtszenario entsprachen den Kontrasten der vorherigen Studien. Da die Anzahl der Messzeitpunkte und die damit zusammenhängende Beleuchtung (gedimmt, dunkel oder Lichtszenario) über verschiedenen Tests und Fragebögen variierte, wurden pro Test und Fragebogen individuelle Kontraste aufgestellt, welche benachbarte Messzeitpunkte miteinander verglichen (vgl. Abschnitt 4.1.3.5).

4.3.4 ERGEBNISSE

Nach der Dunkeladaptation wurde im Rahmen dieser Studie mit Hilfe einer Vielzahl an Messgrößen ein umfangreiches Datenpaket generiert, um den Einfluss unterschiedlicher Lichtszenarien auf nicht-visuelle Effekte zu untersuchen. Viele der Messgrößen lieferten dabei keine zusätzlichen bzw. neuen Erkenntnisse. Nachfolgend werden daher nur die Ergebnisse der KSS, der Melatoninproben, des *2-back task*, der Fahrleistung sowie der de Boer Skala präsentiert und analysiert. Die Ergebnisse des MDBF (wach/müde), der Vigilanzuhr, des *Go-NoGo* sowie des RSVP Tests sind in Anhang D.3 zu finden. Die Fragebögen zur Lichtqualität lieferten im Vergleich zur ersten Probandenstudie (vgl. Abschnitt 4.1.4.7) keine neuen Erkenntnisse. Sie werden im Rahmen dieser Auswertung daher nicht weiter betrachtet.

Weiterhin lieferten die Tagebücher, die Fragebögen zum Schlaf in der vorherigen Nacht sowie die vor der Dunkeladaptation erhobenen Daten keine Hinweise auf außergewöhnliche Ereignisse und damit zusammenhängende Ausreißer. Auch sie werden daher in der nachfolgenden Auswertung nicht weiter behandelt bzw. berücksichtigt.

Da nicht alle der nachfolgend präsentierten Ergebnisse in den gleichen Messblöcken erhoben wurden, wird der Faktor Messzeitpunkt anders als in den vorherigen Studien nicht über den entsprechenden Block beschrieben, sondern über die Uhrzeit. Die Betrachtung der Daten erfolgt ab 06:30 Uhr bzw. nach der Dunkeladaptation.

4.3.4.1 KAROLINSKA SLEEPINESS SCALE (KSS)

Abbildung 4.20 zeigt den vom Lichtszenario abhängigen Verlauf der mittleren KSS Wertungen entlang eines Versuchstages. Hierbei ist das 95-minütige Lichtexpositionsintervall gräulich hinterlegt (07:00 bis 08:35 Uhr). Weiterhin sind die zu einer Uhrzeit gemessenen Daten zur besseren Visualisierung versetzt zueinander dargestellt. Ergänzende Ergebnisse (tabellarische Übersicht und Boxplots) sind in Anhang D.3.1 zu finden.

Im Rahmen der Analyse mittels LMM konnte ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Messzeitpunkt bzw. Uhrzeit auf die subjektive Müdigkeit festgestellt werden, $\chi^2(5) = 17,27, p = 0,004$. Dahingegen stellte sich kein signifikanter Effekt des Faktors Lichtszenario ein, $\chi^2(2) = 1,10, p = 0,58$. Die Interaktion der beiden Faktoren Uhrzeit und

LichtszENARIO war ebenfalls nicht signifikant, $\chi^2(10) = 6,63$, $p = 0,76$. Die anschließende Kontrastanalyse zeigte, dass die subjektive Müdigkeit der Probanden zwischen 06:55 ($M = 4,47$, $SD = 1,51$) und 07:23 Uhr ($M = 5,57$, $SD = 1,69$), bzw. nach der ersten simulierten Fahrt, signifikant zunahm, $b = 1,08$, $t(80) = 3,63$, $p < 0,001$, $r = 0,38$. Weitere signifikante Effekte konnten nicht beobachtet werden.

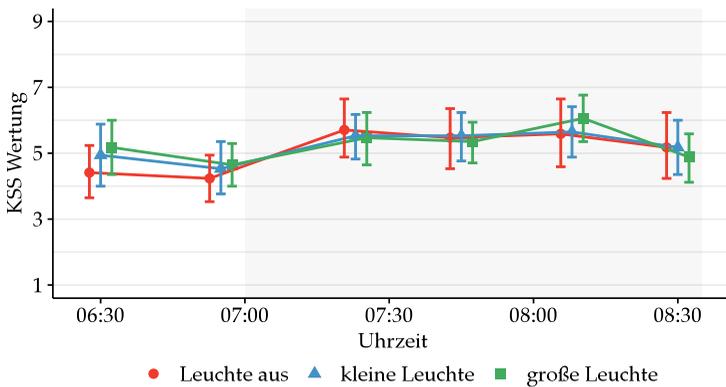


Abbildung 4.20: Mittlere KSS Wertungen (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und LichtszENARIO

4.3.4.2 MELATONINSPIEGEL

Um den Einfluss der unterschiedlichen Lichtszenarien auf den Melatoninspiegel zu untersuchen, mussten die Probanden während der Versuchsdurchführung mehrere Speichelproben abgeben. Die Ergebnisse der mit RIA ermittelten Melatoninspiegel sind in Abbildung 4.21 zu sehen. Der Verlauf der gemittelten Melatoninspiegel (inkl. 95% CI) wird dort in Abhängigkeit der Uhrzeit und des

Lichtszenarios visualisiert. Wie auch zuvor wird das 95-minütige Lichtexpositionsintervall gräulich im Hintergrund dargestellt, während zur gleichen Uhrzeit gemessene Daten leicht versetzt zueinander gezeigt werden, um deren Sichtbarkeit zu verbessern. Die tabellarische Darstellung der Melatonin Mittelwerte inklusive Standardabweichung sowie Boxplots sind in Anhang D.3.2 zu finden.

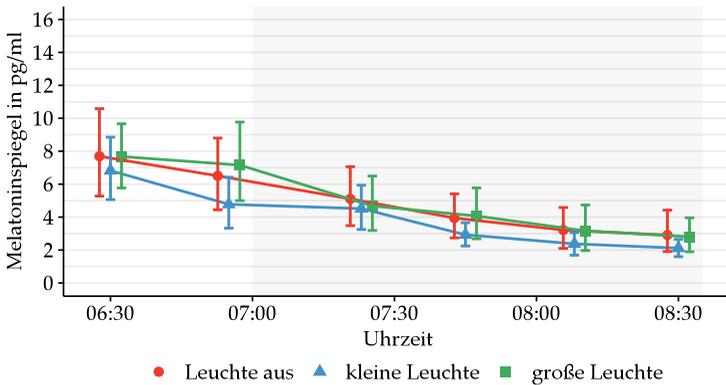


Abbildung 4.21: Verlauf des mittleren Melatoninspiegels (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario

Bei der Analyse der Melatoninspiegel mittels LMM konnte für die beiden Faktoren Uhrzeit ($\chi^2(5) = 100,51, p < 0,001$) und Lichtszenario ($\chi^2(2) = 14,25, p < 0,001$) ein signifikanter Haupteffekt nachgewiesen werden. Ein signifikanter Interaktionseffekt manifestierte sich allerdings nicht, $\chi^2(10) = 5,36, p = 0,87$. Die Kontrastanalyse der benachbarten Messzeitpunkte bzw. Uhrzeiten zeigte, dass der Melatoninspiegel jedes Mal signifikant abfiel:

- **06:30 - 06:55 Uhr:** $b = -2,82$, $t(80) = -9,80$, $p < 0,001$, $r = 0,74$
- **06:55 - 07:23 Uhr:** $b = -4,38$, $t(80) = -12,06$, $p < 0,001$, $r = 0,80$
- **07:23 - 07:45 Uhr:** $b = -4,56$, $t(80) = -11,85$, $p < 0,001$, $r = 0,80$
- **07:45 - 08:08 Uhr:** $b = -3,63$, $t(80) = -9,99$, $p < 0,001$, $r = 0,75$
- **08:08 - 08:30 Uhr:** $b = -1,97$, $t(80) = -6,86$, $p < 0,001$, $r = 0,61$

Im Vergleich zum Szenario mit gedimmten Licht konnte die Kontrastanalyse bei den Szenarien mit hellem Licht einen Trend zu geringeren Melatoninspiegeln aufdecken, $b = -0,16$, $t(192) = -1,80$, $p = 0,07$. Im direkten Vergleich der beiden Szenarien mit eingeschaltetem Lichtpanel fiel der Melatoninspiegel im Szenario *große Leuchte* signifikant höher aus, $b = 0,50$, $t(192) = 3,31$, $p = 0,001$, $r = 0,23$. Weitere signifikante Effekte konnten nicht nachgewiesen werden.

4.3.4.3 2-BACK TASK

Beim *2-back task* mussten die Probanden beurteilen, ob ein soeben gesehener Buchstabe identisch mit dem Buchstaben war, welchen sie zwei Positionen zuvor gesehen haben. Die prozentuale Trefferquote richtig erkannter, sich wiederholender Buchstaben zeigt Abbildung 4.22 in Abhängigkeit der Testbatterie bzw. der Uhrzeit und des Lichtszenarios. Ergänzende Ergebnisse sind in Anhang D.3.3 zu finden.

Die LMM Analyse konnte einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Uhrzeit nachweisen, $\chi^2(2) = 6,45$, $p = 0,04$, während der Faktor

LichtszENARIO nicht signifikant war, $\chi^2(2) = 0,21, p = 0,90$. Der Interaktionseffekt der Faktoren Uhrzeit und LichtszENARIO war ebenfalls nicht signifikant, $\chi^2(4) = 1,34, p = 0,84$. Bei der Kontrastanalyse benachbarter Testbatterien bzw. Uhrzeiten zeigte sich, dass die prozentuale Trefferquote der Probanden signifikant von der ersten Testbatterie ($M = 86,59, SD = 12,15$) zur zweiten Testbatterie ($M = 82,20, SD = 13,26$) abfiel, $b = 4,45, t(32) = 2,50, p = 0,02, r = 0,40$. Weitere signifikante Effekte zeigten sich nicht.

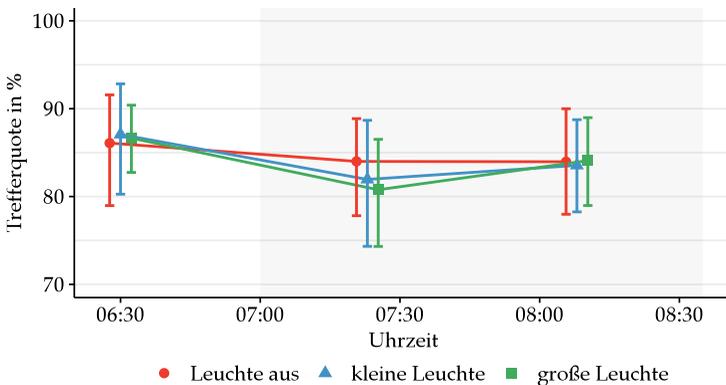


Abbildung 4.22: Verlauf der mittleren *2-back task* Trefferquote (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und LichtszENARIO

4.3.4.4 FAHRLEISTUNG

Zur Analyse der Fahrleistung wurde die Standardabweichung der lateralen Spurposition herangezogen. Deren Mittelwertverlauf wird in Abhängigkeit der Uhrzeit und des Lichtszenarios in Abbildung 4.23 dargestellt. Wie auch zuvor wird dort das Zeitfenster der

Lichtexposition grüulich hinterlegt gezeigt, während die Mittelwerte zur besseren Sichtbarkeit leicht zueinander verschoben dargestellt werden. Ergänzende Ergebnisse sind in Anhang D.3.4 zu finden.

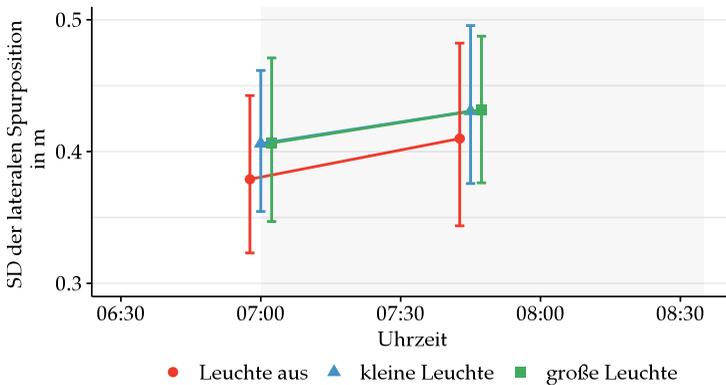


Abbildung 4.23: Verlauf der mittleren Standardabweichung der lateralen Spurposition (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario

Bei der inferenzstatistischen Analyse der Standardabweichung der lateralen Spurposition mittels LMM konnte weder für den Faktor Uhrzeit, $\chi^2(1) = 3,38, p = 0,07$, noch für den Faktor Lichtszenario, $\chi^2(2) = 3,10, p = 0,21$, ein signifikanter Haupteffekt festgestellt werden. Gleiches gilt für den Interaktionseffekt der beiden Faktoren Uhrzeit und Lichtszenario, $\chi^2(2) = 0,05, p = 0,98$.

4.3.4.5 BLENDUNG

Nachfolgend werden in Abbildung 4.24 die mittels inverser de Boer Skala ermittelten Blendbewertungen in Form eines Boxplots dargestellt (inkl. Mittelwert). Die Blendbewertung wurde mit dem Schlussfragebogen um 08:30 Uhr erhoben. Ein höherer Wert entspricht einem höheren subjektiven Blendempfinden.

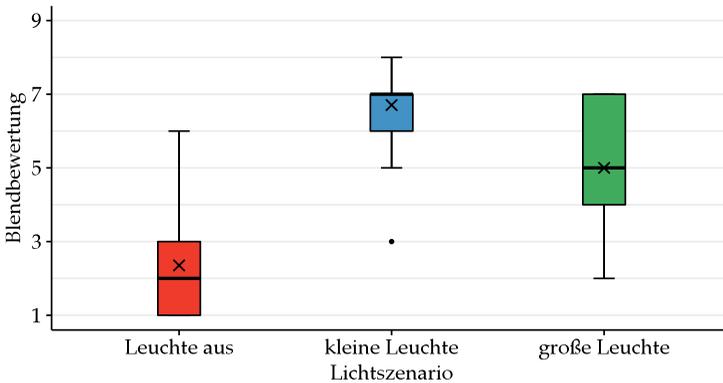


Abbildung 4.24: Boxplots der Blendbewertung in Abhängigkeit vom LichtszENARIO. Das Kreuz symbolisiert den Mittelwert.

Die Analyse der Blendbewertung mittel LMM zeigte, dass das LichtszENARIO einen signifikanten Einfluss auf das subjektive Blendempfinden hatte, $\chi^2(2) = 45,54, p < 0,001$. Bei der Kontrastanalyse zeigte sich, dass die wahrgenommene Blendung signifikant höher ausfiel, wenn eines der beiden Lichtpanels eingeschaltet war, $b = 1,17, t(32) = 7,66, p < 0,001, r = 0,80$. So lag die Blendbewertung bei eingeschaltetem Lichtpanel (*kleine & große Leuchte*) bei $M = 5,85, SD = 1,69$,

während sie ohne helles Licht (*Leuchte aus*) nur bei $M = 2,35$, $SD = 1,66$ lag. Im direkten Vergleich der hellen Lichtpanels fiel das subjektive Blendempfinden beim großen Raumwinkel ($M = 5,00$, $SD = 1,66$) signifikant geringer aus als beim kleinen Raumwinkel ($M = 6,71$, $SD = 1,26$), $b = -0,85$, $t(32) = -3,24$, $p = 0,002$, $r = 0,50$.

4.3.5 DISKUSSION

4.3.5.1 EINFLUSS DES MESSZEITPUNKTS

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Faktor Zeit in Form von verschiedenen Messzeitpunkten und -blöcken die Ausprägungen der in dieser Studie erhobenen abhängigen Variablen unterschiedlich beeinflusst hat.

Zuallererst soll auf den Verlauf der Melatoninkonzentration eingegangen werden, da sich hier uhrzeitabhängige Änderungen am deutlichsten bemerkbar gemacht haben. Zu Beginn der Versuchsdurchführung (06:30 Uhr) lag der Melatoninspiegel auf einem Niveau von $M = 7,40$ pg/ml, $SD = 4,58$ pg/ml, um dann von Messpunkt zu Messpunkt signifikant abzufallen. Am Ende (08:30 Uhr) erreichte er ein Niveau von $M = 2,61$ pg/ml, $SD = 2,21$ pg/ml. Basierend auf diesem signifikanten Einfluss des Faktors Messzeitpunkt kann demnach die Alternativhypothese $H_{1.6}$ bestätigt werden. Der beobachtete Verlauf entspricht den Erwartungen und deckt sich mit den Ergebnissen, welche aus der Literatur bekannt sind (siehe z.B. [91]).

Weniger konsistente Ergebnisse konnten bei den anderen abhängigen Variablen beobachtet werden. Wie die Ergebnisse der inferenzstatistischen Analyse gezeigt haben, wurde die Ausprägung der KSS ebenfalls signifikant vom Messzeitpunkt beeinflusst, weshalb die Alternativhypothese $H_{1.1}$ mit Blick auf die KSS bestätigt werden kann. Bei genauer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass das signifikante Absinken der subjektiven Müdigkeit nur zwischen den Messungen um 06:55 ($M = 4,47$, $SD = 1,51$) und 07:23 Uhr ($M = 5,57$, $SD = 1,69$) auftritt. Interessanterweise fand zwischen diesen beiden Messungen die erste simulierte Fahrt statt. Daraus lässt sich schließen, dass die wenig abwechslungsreiche Fahrt auf der Autobahn inklusive der Vigilanzuhr als Nebenaufgabe monoton genug war, um das Müdigkeitsniveau der Probanden zu steigern. Diese Beobachtung bezieht sich allerdings nur auf die erste und nicht auf die zweite simulierte Fahrt, da sich hier keine Zunahme der Müdigkeit zeigte. Erklären lässt sich dies möglicherweise dadurch, dass die Müdigkeit der Probanden bereits nach der ersten Fahrt so stark zunahm, wodurch das Müdigkeitsniveau nach der zweiten Fahrt nicht weiter negativ beeinflusst werden konnte. Ähnliche signifikante Ergebnisse zeigten sich auch beim *2-back task*, weshalb die Alternativhypothese $H_{1.1}$ auch in diesem Kontext bestätigt werden kann. Hier fiel der Anteil richtig erkannter Targets von $M = 86,59\%$, $SD = 12,15\%$ auf $M = 82,20\%$, $SD = 13,26\%$.

Von den bisherigen Beobachtungen abweichende Ergebnisse zeigten sich hingegen bei der Fahrleistung, bei der der Messzeitpunkt keinen signifikanten Einfluss hatte, sodass hier die Alternativhypothese $H_{1.1}$

verworfen werden muss. Als mögliche Erklärung für dieses Ergebnis kann die gleiche Vermutung wie beim Verlauf der KSS Ergebnisse herangezogen werden. Die Probanden erreichten bereits bei der ersten Fahrt ein so hohes Müdigkeitsniveau, sodass sich anschließend keine weitere Steigerung der Müdigkeit und damit Verschlechterung der Fahrleistung einstellen konnte.

4.3.5.2 EINFLUSS VON HELLEM LICHT

In diesem Teilabschnitt wird der Einfluss der Lichtexposition auf die abhängigen Variablen diskutiert. Das heißt es wird beleuchtet inwiefern sich signifikante Unterschiede auf helles Licht (*kleine und große Leuchte*) anstatt gediminten Lichts (*Leuchte aus*) zurückführen lassen. Wie die Ergebnisse zeigen, hatte die Lichtexposition keinerlei signifikanten Einfluss auf die Ausprägung der subjektiven Müdigkeit (KSS) und der leistungsbezogenen Parameter (*2-back task* & Fahrleistung). Infolgedessen werden die Alternativhypothesen $H_{1.2}$ und $H_{1.4}$ verworfen. Beim Melatoninspiegel hingegen konnte ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Lichtszenario nachgewiesen werden. Dieser zeigte sich jedoch nur im Vergleich der Raumwinkel und nicht im Vergleich zwischen hellem und gediminten Licht. Dazu mehr in Abschnitt 4.3.5.3. Infolgedessen werden die Alternativhypothese $H_{1.7}$ und $H_{1.9}$ ebenfalls verworfen.

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Vielzahl an Messmethoden zur Hilfe gezogen, um den Einfluss von Licht auf subjektiver,

leistungsbezogener und physiologischer Ebene evaluieren zu können. Hierbei wurde auf der einen Seite auf bewährte Tests zurückgegriffen, welche in der Vergangenheit bereits erfolgreich bei Untersuchungen zur nicht-visuellen Lichtwirkung verwendet wurden (KSS, Melatonin, *2-back* und *Go-NoGo*; siehe z.B. [6, 14, 131, 142]). Auf der anderen Seite wurden zusätzlich Methoden mit explorativem Charakter verwendet, um die Bandbreite der verfügbaren Tests zu erhöhen (MDBF, RSVP, Vigilanzuhr und Fahraufgabe). Aufgrund dieser breiten Vielfalt an Methoden zur Datenerhebung ist es unwahrscheinlich, dass in dieser Studie die Testauswahl für das fehlende Erscheinen der nicht-visuellen Lichtwirkung verantwortlich ist. Vielmehr ergeben sich andere Möglichkeiten, welche die hier generierten Ergebnisse erklären.

Zum einen fällt auf, dass das Probandenkollektiv mit einer Anzahl von 17 Versuchsteilnehmer kleiner war als in den Vorgängerstudien (jeweils 32 Probanden). Durch das kleinere Probandenkollektiv fallen die aus statistischer Sicht nachweisbaren Effekte größer aus (für weitere Informationen siehe z.B. [244]). Infolgedessen ist es möglich, dass durch Licht hervorgerufene kleine Effekte gar nicht aufgedeckt werden konnten. Für zukünftige Studien, welche den hier verwendeten Anwendungsfall mit den hier verwendeten lichttechnischen Parametern aufgreifen, würde dies bedeuten, dass ein größeres Probandenkollektiv zum Nachweis potentieller Effekte nötig ist. Wenn die durch Licht hervorgerufenen Effekte allerdings tatsächlich klein sind, ist im Hinblick auf eine praktische Anwendung zu hinterfragen, ob

ihr Einsatz sinnvoll ist oder ob ihre Wirkung durch andere externe Einflüsse überdeckt wird.

Zum anderen ist es möglich, dass die verwendeten lichttechnischen Parameter im gewählten Design schlichtweg ungeeignet dazu waren, um nicht-visuelle Effekte hervorzurufen. Die lichttechnischen Eigenschaften der Lichtpanels wurden auf Basis der in Abschnitt 2.4 vorgestellten Untersuchungen festgelegt, wobei eine natürliche Anmutung und das Risiko von Blendung als limitierende Faktoren berücksichtigt wurden. Daraus resultierten eine Farbtemperatur von 6500 K und eine Beleuchtungsstärke von 200 lx. Die Effektivität der hier verwendeten lichttechnischen Werte kann aufgrund unterschiedlicher Konzepte zwar nicht direkt mit den Werten der Studien aus Abschnitt 2.4 verglichen werden, dennoch erscheinen 6500 K und 200 lx als zu gering. Wird der visuelle Komfort im Fahrzeuginterieur vernachlässigt, so wäre eine Erhöhung von Farbtemperatur und/oder Beleuchtungsstärke hilfreich, um den melanopischen Wirkungsgrad der Lichtquellen zu erhöhen. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass selbst Beleuchtungsstärken von >1000 lx keine Garantie für das Auftreten nicht-visueller Effekte darstellen (siehe z.B. [165]).

4.3.5.3 EINFLUSS DES RAUMWINKELS

Eine Fragestellung der Studie war, ob die Ausprägung nicht-visueller Effekte vom Raumwinkel der auslösenden Lichtquelle abhängt. Nachfolgend soll daher der Einfluss des Raumwinkels auf die

subjektive *Alertness*, die leistungsbezogenen Parameter, den Melatoninspiegel und das Blendempfinden erörtert werden.

Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge hat die statistische Analyse gezeigt, dass der Raumwinkel keinerlei Einfluss auf die KSS, den *2-back task* und die Fahrleistung hatte. Demnach müssen die Alternativhypothesen $H_{1.3}$ und $H_{1.5}$ verworfen werden. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, hatte der Raumwinkel jedoch einen signifikanten Einfluss auf den per Speichelprobe erhobenen Melatoninspiegel. Dieser Einfluss machte sich unabhängig vom Messzeitpunkt bemerkbar, sodass die Alternativhypothese $H_{1.8}$ bestätigt wird, während die Alternativhypothese $H_{1.10}$ verworfen wird. Die Hintergründe für diesen signifikanten Unterschied zeigt Abbildung 4.21. Dort ist zu sehen, dass die Melatoninspiegel zu Beginn der Szenarien *Leuchte aus* und *kleine Leuchte* auf einem ähnlichen Niveau lagen, während die Melatoninkonzentration im Szenario *große Leuchte* etwas niedriger war. Im Anschluss verliefen die Melatoninspiegel ähnlich, um an Ende der Versuchsdurchführung das gleiche Bild wie zu Beginn darzustellen. Die Szenarien *Leuchte aus* und *kleine Leuchte* lagen auch hier auf einem ähnlichen Niveau, während das des Szenarios *große Leuchte* etwas niedriger war. Der signifikante Unterschied entstand demnach nicht durch eine raumwinkelabhängige Melatoninunterdrückung, sondern aufgrund des allgemein niedrigeren Melatoninniveaus während des Szenarios *große Leuchte*.

Auf Basis der im Rahmen dieser Studie generierten Ergebnisse ist es weiterhin nicht möglich die zuvor formulierte Fragestellung zu beantworten. Auf der einen Seiten konnten im Vergleich der Szenarien

kleine und *große Leuchte* keine auf das Lichtszenario zurückzuführende Unterschiede festgestellt werden. Dies lässt vermuten, dass der Raumwinkel keine Rolle bei nicht-visuellen Effekten spielt. Auf der anderen Seite konnten im direkten Vergleich zwischen hellem und gedimmtem Licht generell keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Daraus lässt sich ableiten, dass auch andere lichttechnische Parameter, wie z.B. die Beleuchtungsstärke, für das fehlende Auftreten nicht-visueller Effekte verantwortlich sind.

Ein vom Raumwinkel abhängiger, signifikanter Effekt konnte im Rahmen dieser Studie dennoch aufgedeckt werden. Mit Blick auf den visuellen Komfort fiel die Blendung bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge wie zu erwarten geringer aus, wenn der Raumwinkel größer war. Die Alternativhypothese $H_{1.9}$ wird daher bestätigt. So lag die mittels inverser de Boer Skala ermittelte Blendbewertung der kleinen Lichtquelle bei $M = 6.71$; $SD = 1.26$, während sie bei der großen Lichtquelle bei $M = 5.00$; $SD = 1.66$ lag. Die große Lichtquelle wurde demnach als „gerade akzeptabel“ wahrgenommen, während die kleine Lichtquelle als „störend“ galt. Im Vergleich zur ersten Studie fielen die Bewertungen der beide Lichtszenarien zwar etwas höher aus, grundsätzlich stimmen die Ergebnisse jedoch überein (vgl. Abschnitt 4.1.4.6). Demnach bestätigt sich auch hier, dass die Blendwirkung bei der Auslegung von Lichtquellen berücksichtigt werden muss, wenn diese zum Auslösen nicht-visueller Effekte herangezogen werden sollen.

4.3.5.4 DISKUSSION DER UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Infolge der Ergebnisse und Erkenntnisse der ersten beiden Studien wurde das Versuchsdesign dieser Studie verschärft, um nicht-visuelle Effekte besser aufdecken zu können. Diese Herangehensweise basierte auf der Tendenz einiger in Abschnitt 2.4 vorgestellten Untersuchungen. Durch die Auswahl extremer Uhrzeiten (z.B. [69]), hoher Beleuchtungsstärken (z.B. [2]) und tagelangem Schlafentzug (z.B. [14]) wurden dort teilweise sehr spezifische, nicht alltägliche Situationen geschaffen, mit deren Hilfe sich nicht-visuelle Effekte leichter hervorrufen ließen. In einem weniger extremen Maß folgte die hier durchgeführte Studie diesem Trend, um einen spezifischeren Anwendungsfall zu kreieren. Hierzu wurde vom ursprünglichen Anwendungsfall der morgendlichen Fahrt zur Arbeit abgewichen, indem die Dauer der nachgestellten Fahrt und Lichtexposition deutlich auf 90 Minuten erhöht wurde. Weitere Verschärfungen betrafen die Anforderungen an das Probandenkollektiv. So mussten die Versuchspersonen beispielsweise ein Schlaftagebuch führen, um 06:00 Uhr im Labor eintreffen und auf dem Weg dorthin eine Sonnenbrille tragen. Trotz dieser Anpassungen und stärkerer Kontrolle der Probanden konnte im Rahmen dieser Studie dennoch kein Einfluss der Lichtexposition geschweige des Raumwinkels auf nicht-visuelle Effekte beobachtet werden.

Möglicherweise liegt der Grund hierfür am grundlegenden Setting der Studie. Bedingt durch die circadiane Rhythmik sinkt der Melatoninspiegel morgens, während die kognitive Leistungsfähigkeit steigt.

Somit unterstützte die Lichtexposition (Beginn 07:00 Uhr) lediglich den natürlich ablaufenden Prozess. Wie bereits in Abschnitt 4.3.5.2 diskutiert, ist daher nicht auszuschließen, dass die hier gewählten lichttechnischen Parameter zu gering waren, um im gewählten Setting zu einem stärkeren Abfall (Melatonin) bzw. Anstieg (kognitive Leistung) zu führen. Um diese These in zukünftigen Studien zu untersuchen, müsste der Studienbeginn in die Abendstunden bzw. in die Nacht gelegt werden, sodass die Lichtexposition der natürlichen circadianen Rhythmik entgegenwirken kann. Werden in einem solchen Setting allerdings weitere extreme Rahmenbedingungen zum Auslösen nicht-visueller Effekte benötigt, so ist kritisch zu hinterfragen, inwiefern es sinnvoll ist eine auf nicht-visuelle Lichtwirkung ausgelegte Leuchte zu entwickeln und in ein Fahrzeug zu integrieren. Bei dieser würde es sich nicht um ein Produkt handeln, welches zwar einen eingeschränkten Anwendungsfall abbildet, aber trotzdem regelmäßig und wirksam eingesetzt wird (z.B. einstündige Fahrt am späten Abend). Vielmehr würde es sich um ein Nischenprodukt handeln, welches auf spezielle und seltene Anwendungsfälle ausgelegt ist (z.B. übermüdete Fahrt mitten in der Nacht).

Ein weiterer möglicher Erklärungsgrund für das Ausbleiben nicht-visueller Effekte bietet der Ablauf eines Versuchsszenarios an sich. Nach Beginn des Versuchs um 06:30 Uhr waren die Probanden ununterbrochen beschäftigt. Entweder führten sie eine Testbatterie durch, beantworteten Fragebögen oder waren mit der Fahrt im Simulator beschäftigt. Da es demnach keine Ruhephasen gab, war die Aneinanderreihung der einzelnen Studieninhalte möglicherweise zu

aktivierend, um zu einem Dekrement der subjektiven Müdigkeit oder des Leistungsvermögens zu führen, welchem durch Licht entgegengewirkt hätte werden können. In zukünftigen Studien könnte daher die Anzahl an Leistungstests und Testbatterien reduziert werden, um mit Hilfe einer längeren simulierten Fahrt ein höheres Maß an Müdigkeit zu induzieren. Teilautonome bzw. autonome Fahrten gelten dabei als besonders ermüdend [220].

4.3.6 FAZIT

Als Motivation für die hier präsentierte Studie dienten die Erkenntnisse der beiden Vorgängerstudien. Zum einen konnte dort keinerlei Wirkung von Licht auf kognitive Leistungsmerkmale nachgewiesen werden, zum anderen lieferte die studienübergreifende Analyse der subjektiven Müdigkeit widersprüchliche Ergebnisse (vgl. Abschnitte 4.1.5 und 4.2.5). Ihr Design wurde daraufhin als ungeeignet eingeordnet. Wie die Literatur jedoch zeigt, ist es durch strikter ausgelegte Studienkonzepte durchaus möglich jene Merkmale mit Hilfe von Licht zu beeinflussen (siehe Abschnitt 2.4).

Aufgrund dessen wurde im Rahmen dieser Studie ein neues Studiendesign entwickelt, welches den Beginn der Datenerhebung auf einen circadian günstigeren Zeitpunkt vorzog (06:30 Uhr) und die Dauer der Lichtexposition deutlich erhöhte (90 Minuten ab 07:00 Uhr). Die lichttechnischen Eigenschaften waren dabei identisch zu den Vorgängerstudien. Infolgedessen wurde auch hier der Einfluss von hellem

Licht und des Raumwinkels auf nicht-visuelle Effekte untersucht. Bewerkselligt wurde dies mit Hilfe einer umfangreichen Datensammlung, welche neben subjektiven (KSS) und leistungsbezogenen Parametern (*2-back*, etc.) auch ein physiologisches Merkmal enthielt (Melatonin). Ergänzend wurde der Anwendungsfall der passiven morgendlichen Fahrt aufgeweicht, indem aktive Fahrten in einem Fahrsimulator in den Versuchsablauf integriert wurden.

Abgesehen von der Blendung zeigte die Datenanalyse jedoch, dass Lichtexposition und Raumwinkel keinen Einfluss auf die Ergebnisse der durchgeführten Tests hatten. Im hier gewählten Kontext hat Licht demnach keinen signifikanten Einfluss auf nicht-visuelle Effekte.

Die Gründe für dieses Ergebnis sind vielschichtig. Zum einen waren Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke der Lichtquellen möglicherweise zu gering (6500 K bei 200 lx). Sollte dem Faktor Blendung in Zukunft eine untergeordnete Rolle zugesprochen werden, so sollten diese Parameter zum Auslösen nicht-visueller Effekte erhöht werden. Zum anderen war der Anwendungsfall am Morgen wohlmöglich nicht der richtige. Bedingt durch die circadiane Rhythmik steigt die Körperaktivität und kognitive Leistungsfähigkeit mit Tagesbeginn, sodass die Lichtexposition zu schwach gewesen sein könnte, um diesen Prozess weiter zu beschleunigen. Alternativ könnte demnach abends untersucht werden, ob mit Hilfe von Licht der dem tageszeitabhängigen Aktivitätsdekrement entgegengewirkt werden kann. Diese Überlegungen führen zu der Beobachtung, dass im Kontext des Automobils spezielle Voraussetzungen benötigt werden, damit Licht seinen Einfluss in Form von nicht-visuellen Effekten entfalten kann.

Wenn diese Voraussetzungen allerdings selten erfüllt werden und die Lichtwirkung insgesamt nur klein ist, dann ist kritisch zu hinterfragen, ob ein Einsatz von auf nicht-visuelle Effekte ausgelegten Leuchten im Fahrzeuginterieur sinnvoll ist.

Kapitel 5

ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

5.1 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde die nicht-visuelle Wirkung von Licht im Kontext einer Automotive-Anwendung im Fahrzeuginterieur untersucht. Hierzu wurde im ersten Schritt der aktuelle Stand der Wissenschaft eingeordnet, um den Forschungsschwerpunkt unter Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Einschränkungen festzulegen. Daraus resultierte die Fragestellung, ob Licht seine unmittelbar aktivierende Wirkung bei einer morgendlichen Fahrt im Automobil entfalten kann. Neben der Blendung wurde hierbei der verfügbare Bauraum als limitierender Faktor bei der Ausgestaltung des Lichtszenarios im Fahrzeuginnenraum angesehen. Infolgedessen wurde neben der allgemeinen Lichtwirkung auch der Einfluss unterschiedlich großer Leuchten und damit Raumwinkel (bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge) untersucht.

Um die zuvor formulierte Fragestellung zu analysieren, wurden drei Probandenstudien durchgeführt. In der ersten Studie, einer Laborstudie, wurde untersucht, ob eine 35-minütige Lichtexposition (6500 K bei 200 lx) das subjektive Müdigkeitsempfinden (KSS), die

Reaktionsfähigkeit (PVT) oder die Gedächtnisleistung (FDST) der Versuchsteilnehmer beeinflusst. Das Studienkonzept sowie die Anforderungen an das Probandenkollektiv wurden dabei weniger streng kontrolliert ausgelegt, um allgemeingültigere und praxisnahe Ergebnisse zu generieren. Die Ergebnisse bestätigten, dass die subjektive Müdigkeit signifikant durch helles Licht beeinflusst werden kann. So stieg das Müdigkeitsniveau der Versuchsteilnehmer in einem Szenario mit gedimmtem Licht deutlich an, wohingegen es in Szenarien mit hellem Licht auf nahezu konstantem Niveau blieb. Hier entsprachen die Ergebnisse den Erkenntnissen aus der Wissenschaft (vgl. Abschnitt 2.4). Bei der Reaktionsfähigkeit sowie Merkfähigkeit konnte dahingegen keinerlei Einfluss durch die Lichtexposition festgestellt werden. In gewisser Weise entsprach auch dieses Ergebnis den Erkenntnissen aus der Wissenschaft, da sich nicht-visuelle Effekte zuverlässiger auf subjektiver als auf objektiver Ebene nachweisen lassen (für weitere Informationen siehe [130]). Aufgrund eines möglichen Lern- und Deckeneffekts sowie messsystemabhängiger Latenzen wurden die Leistungstests für zukünftige Studien als ungenügend eingestuft. Abgesehen von der Blendung hatte der Raumwinkel keinen Einfluss auf die Studienergebnisse. Bei der Blendung zeigte sich jedoch erwartungsgemäß, dass die größere Lichtquelle (geringere Leuchtdichte) als angenehmer empfunden wurde. Dies bedeutet, dass der visuelle Komfort bei der Auslegung von Leuchten, welche nicht-visuelle Effekte hervorrufen sollen, berücksichtigt werden muss.

In der zweiten Studie wurde das Konzept der ersten Untersuchung aufgegriffen, um erneut den Einfluss von Licht auf die kognitive Leistungsfähigkeit in einer Laborumgebung zu untersuchen. Der Fokus der dabei gewählten Tests lag auf dem Arbeitsgedächtnis (CST) und der Konzentrationsfähigkeit (d2-R Test). Zudem sollte die zuvor beobachtete Wirkung auf die subjektive Müdigkeit (KSS) reproduziert werden. Dies gelang jedoch nicht. Entgegen der Erwartung fühlten sich die Versuchspersonen bei hellem Licht signifikant müder als bei dunklem Licht. Diese Beobachtung konnte jedoch mit dem allgemein niedrigeren Müdigkeitsniveau der Probanden erklärt werden, welches sich bereits zu Beginn des Szenarios *Leuchte aus* bemerkbar machte. Weiterhin zeigte sich in der Analyse der Leistungstests, dass die Lichtexposition keinerlei Einfluss auf das Arbeitsgedächtnis und die Konzentrationsfähigkeit hatte. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtungen lieferte eine Schwäche des Studiendesigns. So sollte das Konzept zwar eine morgendliche Fahrt zur Arbeit nachstellen, durchgeführt wurde die Studie allerdings am Vormittag. Bedingt durch die circadiane Rhythmik steigt die kognitive Leistungsfähigkeit im Laufe des Vormittags, sodass die Lichtexposition möglicherweise zu schwach war, um zu einer weiteren Steigerung zu führen. Auch hier hatte der Raumwinkel keinerlei Einfluss auf die Ergebnisse.

Unter Berücksichtigung der zuvor gesammelten Erkenntnisse wurde eine dritte Studie in einem Fahrsimulator durchgeführt. Auch hier wurde die nicht-visuelle Lichtwirkung und der Einfluss des Raumwinkels auf selbige im Automotive-Kontext untersucht. Der

Studienbeginn wurde allerdings auf 06:30 Uhr gelegt und die Dauer der Lichtexposition auf 90 Minuten erhöht. Zusätzlich wurden strengere Anforderungen an das Probandenkollektiv gestellt, sodass ein allgemein strenger kontrolliertes Versuchskonzept entstand. Neben der subjektiven Müdigkeit (KSS) und einigen leistungsbezogenen Parametern (u.a. *2-back task*) wurde auch der Melatoninspiegel analysiert. Außerdem wurde die Fahrleistung während einer simulierten Autobahnfahrt evaluiert. Die verwendete Lichttechnik entsprach den vorherigen Studien. Wie in der Datenanalyse nachgewiesen werden konnte, hatte die Lichtexposition keinerlei Einfluss auf die subjektiven, kognitiven und physiologischen Parameter. Lediglich bei der Blendung zeigte sich erneut, dass der große Raumwinkel als weniger blendend wahrgenommen wurde. Nach drei Studien ohne reproduzierbare bzw. nachweisbare Effekte, wurden die Ergebnisse mit den gewählten lichttechnischen Parametern und der vermutlich kleinen Effektgröße nicht-visueller Lichtwirkung begründet. Zusätzlich hätte das Studiendesign einen selteneren und damit extremeren Anwendungsfall abbilden können.

Auch wenn die in dieser Arbeit verwendeten lichttechnischen Parameter auf Basis des aktuellen Stands der Wissenschaft (vgl. Kapitel 2) ausgewählt wurden, so geschah dies maßgeblich unter Berücksichtigung einer praktischen Anwendung. Daraus wurde abgeleitet, dass das Risiko unerwünschter Blendung durch Limitierung der Beleuchtungsstärke am Auge minimiert werden muss. Außerdem sollte die Datenerhebung mit Hilfe eines weniger streng kontrollierten Studiendesigns erfolgen, um allgemeingültigere Ergebnisse zu erhalten,

welche sich auf unterschiedliche Anwender übertragen lassen. Werden diese Anforderungen und die in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse mit der aktuellen Studienlage verglichen (siehe Abschnitt 2.4), so lässt sich daraus schließen, dass dieses Vorgehen nicht zielführend ist. Wie die Forschung zeigt, werden unmittelbare nicht-visuelle Effekte häufig unter extremeren Bedingungen (höhere Beleuchtungsstärken, längere Expositionszeiten, übermüdete Probanden, etc.; siehe Abschnitt 2.4) analysiert, wodurch ihre Allgemeingültigkeit eingeschränkt wird. Selbst dabei sind sie allerdings nicht zuverlässig nachweisbar (vgl. [130]). Dies wiederum lässt vermuten, dass die Effektgröße nicht-visueller Effekte klein ausfällt und ihre Wirkung im Rauschen externer Einflussfaktoren untergeht. Übertragen auf eine Anwendung im Fahrzeuginterieur würde dies bedeuten, dass der visuelle Komfort vernachlässigt werden muss, wenn extremere Rahmenbedingungen dazu nötig sind, um kleine nicht-visuelle Effekte hervorrufen zu können. Zugleich würde auch der Anwendungsfall limitiert werden, wenn auf Basis der Rahmenbedingungen keine alltägliche Fahrt zur Arbeit, sondern nur noch eine übermüdete Fahrt in der späten Nacht abgebildet werden kann.

Da nicht-visuelle Effekte in dieser Arbeit nicht zuverlässig hervorgehoben werden konnten und der Raumwinkel abgesehen vom Blendempfinden keine Rolle spielte, kommt die Arbeit zu folgendem Fazit: Unter Berücksichtigung eines allgemeingültigen Szenarios, welches kurze Expositionszeiten und gemäßigte Beleuchtungsstärken beinhaltet, ist es nicht zielführend, Lichtquellen zum Auslösen aktivierender nicht-visueller Effekte ins Fahrzeuginterieur zu integrieren.

5.2 AUSBLICK

Die Untersuchungen dieser Arbeit haben sich auf die unmittelbare nicht-visuelle Lichtwirkung beschränkt. Wie in Kapitel 2 dargestellt wurde, gehen die Anfänge der Forschung zu nicht-visuellen Effekten jedoch auf die circadiane Lichtwirkung und deren Einfluss auf die Schlaf-Wach-Rhythmik zurück. Zwar konnte im Rahmen dieser Arbeit keine unmittelbare Lichtwirkung im Automotive-Kontext nachgewiesen werden, zukünftige Studien könnten sich allerdings mit der circadianen Lichtwirkung beschäftigen. Dabei könnte zum Beispiel untersucht werden, wie sich eine über mehrere Tage oder Wochen andauernde Lichtanwendung am Morgen oder am Abend auf die circadiane Phasenlage und die Schlafqualität auswirkt. Ein anderer Untersuchungsgegenstand wären saisonale Phänomene wie der Winterblues. Als praktischer Anwendungsfall könnte erneut die Fahrt zur oder von der Arbeit herangezogen werden.

Mit Blick auf die unmittelbare Lichtwirkung, aktivierende Effekte und den Einfluss des Raumwinkels, sollte in Zukunft das gewählte Studienkonzept überdacht werden. Aktuell gibt es kaum Studien, welche die Wirkung des Raumwinkels untersuchen, sodass sich keine konkrete Aussage über dessen Einfluss auf nicht-visuelle Effekte treffen lässt. Im Rahmen dieser Arbeit sollte zwar daran gearbeitet werden, aufgrund der allgemeingültigeren Studienkonzepte wurde das Auffinden relevanter Effekte jedoch erschwert. Selbst unabhängig vom Raumwinkel konnten hier keine reproduzierbaren Ergebnisse zum Einfluss der Lichtexposition (helles vs. gedimmtes

Licht) auf subjektive, leistungsbezogene und physiologische Parameter generiert werden. Aufgrund dessen konnte keine abschließende Bewertung der Wirkung des Raumwinkels auf nicht-visuelle Effekte erfolgen. Zukünftige Studien sollten daher unter strengeren Rahmenbedingungen durchgeführt werden (höhere Beleuchtungsstärken, übermüdete Probanden, etc.), sodass nicht-visuelle Effekte in einem ersten Schritt auf die Lichtexposition zurückgeführt werden können. Bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke am Auge könnte dann in einem zweiten Schritt der Einfluss des Raumwinkels evaluiert werden.

Wird die anwendungsbezogene Forschung zu nicht-visuellen Effekten im Automobil fortgesetzt, so gibt es für zukünftige Untersuchungen auch hier verschiedene Möglichkeiten. Zum einen könnte der Anwendungsfall überdacht werden, indem der Fokus wie bereits erwähnt auf extremere Szenarien gelegt wird (z.B. übermüdete Fahrt in der Nacht). Dadurch würde die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse und vermutlich die Nutzungsfrequenz einer auf nicht-visuelle Effekte ausgelegten Leuchte sinken. Eine weitere Stellschraube wäre die Anpassung der lichttechnischen Parameter, wobei hier stets der Einfluss von Blendung berücksichtigt werden sollte. Bei gegebenen bauraumseitigen Einschränkungen im Fahrzeuginterieur könnten zukünftige Studien eine dynamische Regulierung in ihre Leuchte integrieren, um deren Helligkeit in Abhängigkeit der Tageszeit und Umgebungsleuchtdichte anzupassen (siehe z.B. [199]). Mit Blick auf die Vision vom Fahrzeuginterieur als mobilen Arbeits- und Lebensraum, könnte dieses Konzept weiterentwickelt werden. So könnten neuartige Lichtkonzepte in den Innenraum integriert werden, welche

neben einer dynamischen Regulierung der Helligkeit und Farbtemperatur auch eine den Bedürfnissen der Passagiere angepasste Segmentierung der Lichtquelle erlauben. Eine solche Leuchte könnte für Phasen der Produktivität helles, kaltweißes und großflächiges Licht zur Verfügung stellen, während sie in Phasen der Entspannung ein gedimmtes, warmweißes und segmentiertes Erscheinungsbild annimmt. Als Beispiel für eine solche Leuchte kann das in Abbildung 5.1 dargestellte Human Centric Lighting Modell herangezogen werden, welches parallel zu dieser Arbeit entstanden ist und auf der CES 2020 präsentiert wurde.



Abbildung 5.1: Human Centric Lighting Modell mit variabler Segmentierung, Farbtemperatur und Helligkeit [245]

V LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Audi MediaCenter. "Raum-Fahrt in der Megacity." <https://www.audi-mediacycenter.com/de/pressemitteilungen/raum-fahrt-in-der-megacity-14595> (Zugriff am: 23. Mai. 2022).
- [2] Badia, P., Myers, B., Boecker, M., Culpepper, J. und Harsh, J. R., "Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior," *Physiology & behavior*, Jg. 50, Nr. 3, S. 583–588, 1991.
- [3] Cajochen, C. *et al.*, "High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light," *The Journal of clinical endocrinology and metabolism*, Jg. 90, Nr. 3, S. 1311–1316, 2005.
- [4] Vandewalle, G., Maquet, P. und Dijk, D.-J., "Light as a modulator of cognitive brain function," *Trends in cognitive sciences*, Jg. 13, Nr. 10, S. 429–438, 2009.
- [5] Czeisler, C. A. *et al.*, "Bright Light Resets the Human Circadian Pacemaker Independent of the Timing of the Sleep-Wake Cycle," *Science*, Jg. 233, Nr. 4764, S. 667–671, 1986.
- [6] Chellappa, S. L., Steiner, R., Blattner, P., Oelhafen, P., Götz, T. und Cajochen, C., "Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert?," *PloS one*, Jg. 6, Nr. 1, e16429, 2011.

- [7] Fu, Y., Liao, H.-W., Do, M. T. H. und Yau, K.-W., "Non-image-forming ocular photoreception in vertebrates," *Current opinion in neurobiology*, Jg. 15, Nr. 4, S. 415–422, 2005.
- [8] Figueiro, M. G., Nagare, R. und Price, L., "Non-visual effects of light: how to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness," *Lighting Research & Technology*, Jg. 50, Nr. 1, S. 38–62, 2018.
- [9] Figueiro, M. G., Kalsher, M., Steverson, B. C., Heerwagen, J., Kampschroer, K. und Rea, M. S., "Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers," *Lighting Research & Technology*, Jg. 51, Nr. 2, S. 171–183, 2019.
- [10] Barkmann, C., Wessolowski, N. und Schulte-Markwort, M., "Applicability and efficacy of variable light in schools," *Physiology & behavior*, Jg. 105, Nr. 3, S. 621–627, 2012.
- [11] Rosenthal, N. E. *et al.*, "Seasonal affective disorder. A description of the syndrome and preliminary findings with light therapy," *Archives of general psychiatry*, Jg. 41, Nr. 1, S. 72–80, 1984.
- [12] Caberletti, L., Elfmann, K., Kummel, M. und Schierz, C., "Influence of ambient lighting in a vehicle interior on the driver's perceptions," *Lighting Research & Technology*, Jg. 42, Nr. 3, S. 297–311, 2010.
- [13] Viola, A. U., James, L. M., Schlangen, L. J. M. und Dijk, D.-J., "Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality," *Scand J Work Environ Health*, Jg. 34, Nr. 4, S. 297–306, 2008.
- [14] Phipps-Nelson, J., Redman, J. R., Dijk, D.-J. und Rajaratnam, S. M. W., "Daytime exposure to bright light, as compared to dim

- light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance," *Sleep*, Jg. 26, Nr. 6, S. 695–700, 2003.
- [15] Palczewski, K., "Chemistry and biology of vision," *The Journal of biological chemistry*, Jg. 287, Nr. 3, S. 1612–1619, 2012.
- [16] Wässle, H., "Parallel processing in the mammalian retina," *Nature reviews. Neuroscience*, Jg. 5, Nr. 10, S. 747–757, 2004.
- [17] Kandel, E. R., Koester, J. D., Mack, S. H. und Siegelbaum, S. A., *Principles of Neural Science*. New York: McGraw-Hill, 2021.
- [18] Moore, R. Y. und Lenn, N. J., "A retinohypothalamic projection in the rat," *The Journal of comparative neurology*, Jg. 146, Nr. 1, S. 1–14, 1972.
- [19] Moore, R. Y., Speh, J. C. und Card, J. P., "The retinohypothalamic tract originates from a distinct subset of retinal ganglion cells," *The Journal of comparative neurology*, Jg. 352, Nr. 3, S. 351–366, 1995.
- [20] Weaver, D. R., "The suprachiasmatic nucleus: a 25-year retrospective," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 13, Nr. 2, S. 100–112, 1998.
- [21] Hastings, M. H., Maywood, E. S. und Brancaccio, M., "Generation of circadian rhythms in the suprachiasmatic nucleus," *Nature reviews. Neuroscience*, Jg. 19, Nr. 8, S. 453–469, 2018.
- [22] Morris, C. J., Aeschbach, D. und Scheer, F. A. J. L., "Circadian system, sleep and endocrinology," *Molecular and cellular endocrinology*, Jg. 349, Nr. 1, S. 91–104, 2012.
- [23] Aeschbach, D., Matthews, J. R., Postolache, T. T., Jackson, M. A., Giesen, H. A. und Wehr, T. A., "Two circadian rhythms in

- the human electroencephalogram during wakefulness," *The American journal of physiology*, Jg. 277, Nr. 6, R1771-9, 1999.
- [24] Dijk, D.-J. und Lockley, S. W., "Integration of human sleep-wake regulation and circadian rhythmicity," *Journal of applied physiology*, Jg. 92, Nr. 2, S. 852–862, 2002.
- [25] Rea, M. A., "Photic entrainment of circadian rhythms in rodents," *Chronobiology international*, Jg. 15, Nr. 5, S. 395–423, 1998.
- [26] Johnson, R. F., Moore, R. Y. und Morin, L. P., "Loss of entrainment and anatomical plasticity after lesions of the hamster retinohypothalamic tract," *Brain Research*, Jg. 460, Nr. 2, S. 297–313, 1988.
- [27] Morin, L. P., "The circadian visual system," *Brain Research Reviews*, Jg. 19, Nr. 1, S. 102–127, 1994.
- [28] Lewy, A. J., Wehr, T. A., Goodwin, F. K., Newsome, D. A. und Markey, S. P., "Light suppresses melatonin secretion in humans," *Science*, Jg. 210, Nr. 4475, S. 1267–1269, 1980.
- [29] Cajochen, C., Kräuchi, K. und Wirz-Justice, A., "Role of melatonin in the regulation of human circadian rhythms and sleep," *Journal of neuroendocrinology*, Jg. 15, Nr. 4, S. 432–437, 2003.
- [30] Cajochen, C., Kräuchi, K. und Wirz-Justice, A., "The Acute Soporific Action of Daytime Melatonin Administration: Effects on the EEG during Wakefulness and Subjective Alertness," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 12, Nr. 6, S. 636–643, 1997.
- [31] Deacon, S. und Arendt, J., "Melatonin-induced temperature suppression and its acute phase-shifting effects correlate in a

- dose-dependent manner in humans," *Brain Research*, Jg. 688, 1-2, S. 77–85, 1995.
- [32] Kräuchi, K., Cajochen, C. und Wirz-Justice, A., "A relationship between heat loss and sleepiness: effects of postural change and melatonin administration," *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, Jg. 83, Nr. 1, S. 134–139, 1997.
- [33] Claustrat, B. und Leston, J., "Melatonin: Physiological effects in humans," *Neuro-Chirurgie*, Jg. 61, 2-3, S. 77–84, 2015.
- [34] Schmeißer, M., Schumann, S. und Ulfig, N., *Kurzlehrbuch Neuroanatomie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2020.
- [35] Cajochen, C., Dijk, D. J. und Borbély, A. A., "Dynamics of EEG slow-wave activity and core body temperature in human sleep after exposure to bright light," *Sleep*, Jg. 15, Nr. 4, S. 337–343, 1992.
- [36] Boivin, D. B., Duffy, J. F., Kronauer, R. E. und Czeisler, C. A., "Dose-response relationships for resetting of human circadian clock by light," *Nature*, Jg. 379, Nr. 6565, S. 540–542, 1996.
- [37] Takahashi, J. S., DeCoursey, P. J., Bauman, L. und Menaker, M., "Spectral sensitivity of a novel photoreceptive system mediating entrainment of mammalian circadian rhythms," *Nature*, Jg. 308, Nr. 5955, S. 186–188, 1984.
- [38] Hughes, A. T. L., "Locomotor exercise and circadian rhythms in mammals," *Current Opinion in Physiology*, Jg. 5, S. 51–57, 2018.
- [39] Nelson, D. E. und Takahashi, J. S., "Sensitivity and integration in a visual pathway for circadian entrainment in the hamster

- (*Mesocricetus auratus*),“ *The Journal of physiology*, Jg. 439, S. 115–145, 1991.
- [40] Nelson, D. E. und Takahashi, J. S., “Comparison of visual sensitivity for suppression of pineal melatonin and circadian phase-shifting in the golden hamster,” *Brain Research*, Jg. 554, 1-2, S. 272–277, 1991.
- [41] Czeisler Charles A. *et al.*, “Suppression of Melatonin Secretion in Some Blind Patients by Exposure to Bright Light,” *The New England Journal of Medicine*, Jg. 332, Nr. 1, S. 6–11, 1995.
- [42] Klerman, E. B. *et al.*, “Photic resetting of the human circadian pacemaker in the absence of conscious vision,” *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 17, Nr. 6, S. 548–555, 2002.
- [43] Lucas, R. J. und Foster, R. G., “Neither functional rod photoreceptors nor rod or cone outer segments are required for the photic inhibition of pineal melatonin,” *Endocrinology*, Jg. 140, Nr. 4, S. 1520–1524, 1999.
- [44] Freedman, M. S. *et al.*, “Regulation of mammalian circadian behavior by non-rod, non-cone, ocular photoreceptors,” *Science*, Jg. 284, Nr. 5413, S. 502–504, 1999.
- [45] Foster, R. G., Provencio, I., Hudson, D., Fiske, S., Grip, W. de und Menaker, M., “Circadian photoreception in the retinally degenerate mouse (rd/rd),” *Journal of Comparative Physiology A*, Jg. 169, Nr. 1, S. 39–50, 1991.
- [46] Yamazaki, S., Goto, M. und Menaker, M., “No evidence for extraocular photoreceptors in the circadian system of the Syrian hamster,” *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 14, Nr. 3, S. 197–201, 1999.

- [47] Provencio, I., Jiang, G., Grip, W. J. de, Hayes, W. P. und Rollag, M. D., "Melanopsin: An opsin in melanophores, brain, and eye," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Jg. 95, Nr. 1, S. 340–345, 1998.
- [48] Provencio, I., "A Novel Human Opsin in the Inner Retina," *The Journal of Neuroscience*, Jg. 20, Nr. 2, S. 600–605, 2000.
- [49] Provencio, I., Rollag, M. D. und Castrucci, A. M., "Photoreceptive net in the mammalian retina: This mesh of cells may explain how some blind mice can still tell day from night.," *Nature*, Jg. 415, Nr. 6871, S. 493, 2002.
- [50] Hannibal, J., Hindersson, P., Knudsen, S. M., Georg, B. und Fahrénkrug, J., "The Photopigment Melanopsin Is Exclusively Present in Pituitary Adenylate Cyclase-Activating Polypeptide-Containing Retinal Ganglion Cells of the Retinohypothalamic Tract," *J. Neurosci.*, Jg. 22, Nr. 1, RC191-RC191, 2002.
- [51] Hattar, S., Liao, H. W., Takao, M., Berson, D. M. und Yau, K. W., "Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity," *Science (New York, N.Y.)*, Jg. 295, Nr. 5557, S. 1065–1070, 2002.
- [52] Hattar, S. *et al.*, "Central projections of melanopsin-expressing retinal ganglion cells in the mouse," *The Journal of comparative neurology*, Jg. 497, Nr. 3, S. 326–349, 2006.
- [53] Gooley, J. J., Lu, J., Chou, T. C., Scammell, T. E. und Saper, C. B., "Melanopsin in cells of origin of the retinohypothalamic tract," *Nature neuroscience*, Jg. 4, Nr. 12, S. 1165, 2001.
- [54] Ruby, N. F. *et al.*, "Role of melanopsin in circadian responses to light," *Science*, Jg. 298, Nr. 5601, S. 2211–2213, 2002.

- [55] Panda, S. *et al.*, "Melanopsin (Opn4) requirement for normal light-induced circadian phase shifting," *Science*, Jg. 298, Nr. 5601, S. 2213–2216, 2002.
- [56] Hankins, M. W., Peirson, S. N. und Foster, R. G., "Melanopsin: an exciting photopigment," *Trends in Neurosciences*, Jg. 31, Nr. 1, S. 27–36, 2008.
- [57] Panda, S. *et al.*, "Melanopsin is required for non-image-forming photic responses in blind mice," *Science*, Jg. 301, Nr. 5632, S. 525–527, 2003.
- [58] Hattar, S. *et al.*, "Melanopsin and rod-cone photoreceptive systems account for all major accessory visual functions in mice," *Nature*, Jg. 424, Nr. 6944, S. 76–81, 2003.
- [59] Gooley, J. J., Rajaratnam, S. M. W., Brainard, G. C., Kronauer, R. E., Czeisler, C. A. und Lockley, S. W., "Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light," *Science translational medicine*, Jg. 2, Nr. 31, 31ra33, 2010.
- [60] Berson, D. M., "Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock," *Science*, Jg. 295, Nr. 5557, S. 1070–1073, 2002.
- [61] Berson, D., "Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors," *Trends in Neurosciences*, Jg. 26, Nr. 6, S. 314–320, 2003.
- [62] Dacey, D. M. *et al.*, "Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN," *Nature*, Jg. 433, Nr. 7027, S. 749–754, 2005.
- [63] Esquivá, G., Lax, P., Pérez-Santonja, J. J., García-Fernández, J. M. und Cuenca, N., "Loss of Melanopsin-Expressing Ganglion

- Cell Subtypes and Dendritic Degeneration in the Aging Human Retina," *Frontiers in aging neuroscience*, Jg. 9, S. 79, 2017.
- [64] Hannibal, J. *et al.*, "Melanopsin is expressed in PACAP-containing retinal ganglion cells of the human retinohypothalamic tract," *Investigative ophthalmology & visual science*, Jg. 45, Nr. 11, S. 4202–4209, 2004.
- [65] Hannibal, J., Christiansen, A. T., Heegaard, S., Fahrenkrug, J. und Kiilgaard, J. F., "Melanopsin expressing human retinal ganglion cells: Subtypes, distribution, and intraretinal connectivity," *The Journal of comparative neurology*, Jg. 525, Nr. 8, S. 1934–1961, 2017.
- [66] Liao, H.-W. *et al.*, "Melanopsin-expressing ganglion cells on macaque and human retinas form two morphologically distinct populations," *The Journal of comparative neurology*, Jg. 524, Nr. 14, S. 2845–2872, 2016.
- [67] Curcio, C. A. und Allen, K. A., "Topography of ganglion cells in human retina," *The Journal of comparative neurology*, Jg. 300, Nr. 1, S. 5–25, 1990.
- [68] Do, M. T. H. und Yau, K.-W., "Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells," *Physiological reviews*, Jg. 90, Nr. 4, S. 1547–1581, 2010.
- [69] Thapan, K., Arendt, J. und Skene, D. J., "An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans," *Journal of Physiology*, Jg. 535.1, S. 261–267, 2001.
- [70] Brainard, G. C. *et al.*, "Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian

- Photoreceptor," *The Journal of Neuroscience*, Jg. 21, Nr. 16, S. 6405–6412, 2001.
- [71] Tu, D. C. *et al.*, "Physiologic diversity and development of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells," *Neuron*, Jg. 48, Nr. 6, S. 987–999, 2005.
- [72] Kräuchi, K., "The thermophysiological cascade leading to sleep initiation in relation to phase of entrainment," *Sleep medicine reviews*, Jg. 11, Nr. 6, S. 439–451, 2007.
- [73] Wright, K. P., Hull, J. T. und Czeisler, C. A., "Relationship between alertness, performance, and body temperature in humans," *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, Jg. 283, Nr. 6, R1370-7, 2002.
- [74] Wright, K. P., Hull, J. T., Hughes, R. J., Ronda, J. M. und Czeisler, C. A., "Sleep and wakefulness out of phase with internal biological time impairs learning in humans," *Journal of cognitive neuroscience*, Jg. 18, Nr. 4, S. 508–521, 2006.
- [75] Kriegsfeld, L. J. und Silver, R., "The regulation of neuroendocrine function: Timing is everything," *Hormones and behavior*, Jg. 49, Nr. 5, S. 557–574, 2006.
- [76] Patton, A. P. und Hastings, M. H., "The suprachiasmatic nucleus," *Current biology : CB*, Jg. 28, Nr. 15, R816-R822, 2018.
- [77] Aschoff, J., "Circadian Rhythms in Man," *Science*, Jg. 148, Nr. 3676, S. 1427–1432, 1965.
- [78] Czeisler, C. A. *et al.*, "Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker," *Science*, Jg. 284, Nr. 5423, S. 2177–2181, 1999.

- [79] Duffy, J. F. *et al.*, "Sex difference in the near-24-hour intrinsic period of the human circadian timing system," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Jg. 108 Suppl 3, S. 15602–15608, 2011.
- [80] Colwell, C. S., "Linking neural activity and molecular oscillations in the SCN," *Nature reviews. Neuroscience*, Jg. 12, Nr. 10, S. 553–569, 2011.
- [81] Morin, L. P., "Neuroanatomy of the extended circadian rhythm system," *Experimental neurology*, Jg. 243, S. 4–20, 2013.
- [82] Teclemariam-Mesbah, R., Horst, G. J. ter, Postema, F., Wortel, J. und Buijs, R. M., "Anatomical demonstration of the supra-chiasmatic nucleus-pineal pathway," *J. Comp. Neurol.*, Jg. 406, Nr. 2, S. 171–182, 1999.
- [83] Borjigin, J., Zhang, L. S. und Calinescu, A.-A., "Circadian regulation of pineal gland rhythmicity," *Molecular and cellular endocrinology*, Jg. 349, Nr. 1, S. 13–19, 2012.
- [84] Pevet, P. und Challet, E., "Melatonin: both master clock output and internal time-giver in the circadian clocks network," *Journal of physiology, Paris*, Jg. 105, 4-6, S. 170–182, 2011.
- [85] Tordjman, S. *et al.*, "Melatonin: Pharmacology, Functions and Therapeutic Benefits," *Current neuropharmacology*, Jg. 15, Nr. 3, S. 434–443, 2017.
- [86] Sletten, T. L., Vincenzi, S., Redman, J. R., Lockley, S. W. und Rajaratnam, S. M. W., "Timing of sleep and its relationship with the endogenous melatonin rhythm," *Frontiers in neurology*, Jg. 1, S. 137, 2010.

- [87] Duffy, J. F., Zeitzer, J. M., Rimmer, D. W., Klerman, E. B., Dijk, D.-J. und Czeisler, C. A., "Peak of circadian melatonin rhythm occurs later within the sleep of older subjects," *American journal of physiology. Endocrinology and metabolism*, Jg. 282, Nr. 2, E297-303, 2002.
- [88] Hut, R. A. und Beersma, D. G. M., "Evolution of time-keeping mechanisms: early emergence and adaptation to photoperiod," *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, Jg. 366, Nr. 1574, S. 2141–2154, 2011.
- [89] Hut, R. A., "Photoperiodism: shall EYA compare thee to a summer's day?," *Current biology : CB*, Jg. 21, Nr. 1, R22-5, 2011.
- [90] Lewy, A. J., Cutler, N. L. und Sack, R. L., "The Endogenous Melatonin Profile as a Marker for Circadian Phase Position," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 14, Nr. 3, S. 227–236, 1999.
- [91] Benloucif, S., Guico, M. J., Reid, K. J., Wolfe, L. F., L'hermite-Balériaux, M. und Zee, P. C., "Stability of melatonin and temperature as circadian phase markers and their relation to sleep times in humans," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 20, Nr. 2, S. 178–188, 2005.
- [92] Chou, T. C., Bjorkum, A. A., Gaus, S. E., Lu, J., Scammell, T. E. und Saper, C. B., "Afferents to the Ventrolateral Preoptic Nucleus," *The Journal of Neuroscience*, Jg. 22, Nr. 3, S. 977–990, 2002.
- [93] Saper, C. B., Scammell, T. E. und Lu, J., "Hypothalamic regulation of sleep and circadian rhythms," *Nature*, Jg. 437, Nr. 7063, S. 1257–1263, 2005.
- [94] Sherin, J. E., Elmquist, J. K., Torrealba, F. und Saper, C. B., "Innervation of Histaminergic Tuberomammillary Neurons by

- GABAergic and Galaninergic Neurons in the Ventrolateral Preoptic Nucleus of the Rat," *J. Neurosci.*, Jg. 18, Nr. 12, S. 4705–4721, 1998.
- [95] Lu, J., Greco, M. A., Shiromani, P. und Saper, C. B., "Effect of Lesions of the Ventrolateral Preoptic Nucleus on NREM and REM Sleep," *J. Neurosci.*, Jg. 20, Nr. 10, S. 3830–3842, 2000.
- [96] Gooley, J. J., Lu, J., Fischer, D. und Saper, C. B., "A Broad Role for Melanopsin in Nonvisual Photoreception," *The Journal of Neuroscience*, Jg. 23, Nr. 18, S. 7093–7106, 2003.
- [97] Aston-Jones, G., "Brain structures and receptors involved in alertness," *Sleep medicine*, Jg. 6, S3-S7, 2005.
- [98] Aston-Jones, G., Chen, S., Zhu, Y. und Oshinsky, M. L., "A neural circuit for circadian regulation of arousal," *Nature neuroscience*, Jg. 4, Nr. 7, S. 732–738, 2001.
- [99] Berridge, C. W., "Noradrenergic modulation of arousal," *Brain Research Reviews*, Jg. 58, Nr. 1, S. 1–17, 2008.
- [100] Harrington, M. E., "The Ventral Lateral Geniculate Nucleus and the Intergeniculate Leaflet: Interrelated Structures in the Visual and Circadian Systems," *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Jg. 21, Nr. 5, S. 705–727, 1997.
- [101] Clarke, R. J., Zhang, H. und Gamlin, P. D. R., "Primate pupillary light reflex: receptive field characteristics of pretectal luminance neurons," *Journal of neurophysiology*, Jg. 89, Nr. 6, S. 3168–3178, 2003.
- [102] Hu, H., Cui, Y. und Yang, Y., "Circuits and functions of the lateral habenula in health and in disease," *Nature reviews. Neuroscience*, Jg. 21, Nr. 5, S. 277–295, 2020.

- [103] Vandewalle, G. *et al.*, "Spectral quality of light modulates emotional brain responses in humans," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Jg. 107, Nr. 45, S. 19549–19554, 2010.
- [104] Cajochen, C., Chellappa, S. L. und Schmidt, C., "Circadian and Light Effects on Human Sleepiness–Alertness," in *Sleepiness and Human Impact Assessment*, Garbarino, S., Nobili, L. und Costa, G., Hg., Milano: Springer Milan, 2014, S. 9–22.
- [105] Burgess, H. J., Crowley, S. J., Gazda, C. J., Fogg, L. F. und Eastman, C. I., "Preflight Adjustment to Eastward Travel: 3 Days of Advancing Sleep with and without Morning Bright Light," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 18 (4), S. 318–328, 2003.
- [106] Chan, S. und Debono, M., "Replication of cortisol circadian rhythm: new advances in hydrocortisone replacement therapy," *Therapeutic advances in endocrinology and metabolism*, Jg. 1, Nr. 3, S. 129–138, 2010.
- [107] Massin, M. M., Maeyns, K., Withofs, N., Ravet, F. und Gérard, P., "Circadian rhythm of heart rate and heart rate variability," *Archives of disease in childhood*, Jg. 83, Nr. 2, S. 179–182, 2000.
- [108] Blatter, K. und Cajochen, C., "Circadian rhythms in cognitive performance: methodological constraints, protocols, theoretical underpinnings," *Physiology & behavior*, Jg. 90, 2-3, S. 196–208, 2007.
- [109] Krishnan, H. C. und Lyons, L. C., "Synchrony and desynchrony in circadian clocks: impacts on learning and memory," *Learning & Memory*, Jg. 22, Nr. 9, S. 426–437, 2015.

- [110] Foster, R. G., "Sleep, circadian rhythms and health," *Interface focus*, Jg. 10, Nr. 3, 2020.
- [111] Foster, R. G. und Kreitzman, L., *Rhythms of life: The biological clocks that control the daily lives of every living thing*. New Haven, London: Yale University Press, 2005.
- [112] Foster, R. G. und Kreitzman, L., "The rhythms of life: what your body clock means to you!," *Experimental physiology*, Jg. 99, Nr. 4, S. 599–606, 2014.
- [113] Cajochen, C., Blatter, K. und Wallach, D., "Circadian and Sleep-Wake Dependent Impact on Neurobehavioral Function," *Psychologica Belgica*, Jg. 44, 1-2, S. 59–80, 2004.
- [114] Deboer, T., "Sleep homeostasis and the circadian clock: Do the circadian pacemaker and the sleep homeostat influence each other's functioning?," *Neurobiology of sleep and circadian rhythms*, Jg. 5, S. 68–77, 2018.
- [115] Waterhouse, J., Reilly, T., Atkinson, G. und Edwards, B., "Jet lag: trends and coping strategies," *The Lancet*, Jg. 369, Nr. 9567, S. 1117–1129, 2007.
- [116] Caruso, C. C., "Negative impacts of shiftwork and long work hours," *Rehabilitation nursing : the official journal of the Association of Rehabilitation Nurses*, Jg. 39, Nr. 1, S. 16–25, 2014.
- [117] Eastman, C. I. und Burgess, H. J., "How To Travel the World Without Jet lag," *Sleep medicine clinics*, Jg. 4, Nr. 2, S. 241–255, 2009.
- [118] Duffy, J. F., Kronauer, R. E. und Czeisler, C. A., "Phase-shifting human circadian rhythms: influence of sleep timing, social

- contact and light exposure," *Journal of Physiology*, Jg. 495.1, S. 289–297, 1996.
- [119] Czeisler, C. A. und Gooley, J. J., "Sleep and circadian rhythms in humans," *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology*, Jg. 72, S. 579–597, 2007.
- [120] Duffy, J. F. und Wright, K. P., "Entrainment of the human circadian system by light," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 20, Nr. 4, S. 326–338, 2005.
- [121] Crowley, S. J. und Eastman, C. I., "Phase advancing human circadian rhythms with morning bright light, afternoon melatonin, and gradually shifted sleep: can we reduce morning bright-light duration?," *Sleep medicine*, Jg. 16, Nr. 2, S. 288–297, 2015.
- [122] Jewett, M. E., Rimmer, D. W., Duffy, J. F., Klerman, E. B., Kronauer, R. E. und Czeisler, C. A., "Human circadian pacemaker is sensitive to light throughout subjective day without evidence of transients," *The American journal of physiology*, Jg. 273, 5 Pt 2, R1800-9, 1997.
- [123] Khalsa, S. B. S., Jewett, M. E., Cajochen, C. und Czeisler, C. A., "A phase response curve to single bright light pulses in human subjects," *Journal of Physiology*, Jg. 549, Pt 3, S. 945–952, 2003.
- [124] Kretschmer, V., Schmidt, K.-H. und Griefahn, B., "Bright light effects on working memory, sustained attention and concentration of elderly night shift workers," *Lighting Research & Technology*, Jg. 44, Nr. 3, S. 316–333, 2012.
- [125] Yoon, I.-Y., Kripke, D. F., Elliott, J. A., Youngstedt, S. D., Rex, K. M. und Hauger, R. L., "Age-related changes of circadian

- rhythms and sleep-wake cycles," *Journal of the American Geriatrics Society*, Jg. 51, Nr. 8, S. 1085–1091, 2003.
- [126] Roenneberg, T., Wirz-Justice, A. und Mellow, M., "Life between clocks: daily temporal patterns of human chronotypes: Daily temporal patterns of human chronotypes," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 18, Nr. 1, S. 80–90, 2003.
- [127] Horne, J. A. und Ostberg, O., "A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms," *International journal of chronobiology*, Jg. 4, Nr. 2, S. 97–110, 1976.
- [128] Bailey, S. L. und Heitkemper, M. M., "Circadian rhythmicity of cortisol and body temperature: morningness-eveningness effects," *Chronobiology international*, Jg. 18, Nr. 2, S. 249–261, 2001.
- [129] Facer-Childs, E. R., Boiling, S. und Balanos, G. M., "The effects of time of day and chronotype on cognitive and physical performance in healthy volunteers," *Sports medicine - open*, Jg. 4, Nr. 1, S. 47, 2018.
- [130] Souman, J. L., Tinga, A. M., Te Pas, S. F., van Ee, R. und Vlakamp, B. N. S., "Acute alerting effects of light: A systematic literature review," *Behavioural brain research*, Jg. 337, S. 228–239, 2018.
- [131] Cajochen, C., Zeitzer, J. M., Czeisler, C. A. und Dijk, D.-J., "Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness," *Behavioural brain research*, Jg. 115, Nr. 1, S. 75–83, 2000.
- [132] R ger, M., Gordijn, M. C. M., Beersma, D. G. M., Vries, B. de und Daan, S., "Time-of-day-dependent effects of bright light

- exposure on human psychophysiology: comparison of daytime and nighttime exposure," *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, Jg. 290, Nr. 5, R1413-20, 2006.
- [133] Perrin, F. *et al.*, "Nonvisual responses to light exposure in the human brain during the circadian night," *Current biology*, Jg. 14, Nr. 20, S. 1842-1846, 2004.
- [134] Smolders, K. C. und Kort, Y. A. de, "Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal," *Journal of Environmental Psychology*, Jg. 39, S. 77-91, 2014.
- [135] Smolders, K. C. H. J., Kort, Y. A. W. de und Cluitmans, P. J. M., "A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures," *Physiology & behavior*, Jg. 107, Nr. 1, S. 7-16, 2012.
- [136] Cajochen, C., "Alerting effects of light," *Sleep medicine reviews*, Jg. 11, Nr. 6, S. 453-464, 2007.
- [137] Figueiro, M. G., Bierman, A., Plitnick, B. und Rea, M. S., "Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night," *BMC neuroscience*, Jg. 10, S. 105, 2009.
- [138] Posner, M. I., "Measuring alertness," *Annals of the New York Academy of Sciences*, Jg. 1129, S. 193-199, 2008.
- [139] Oken, B. S., Salinsky, M. C. und Elsas, S. M., "Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement," *Clinical Neurophysiology*, Jg. 117, Nr. 9, S. 1885-1901, 2006.

- [140] Huiberts, L. M., Smolders, K. C. H. J. und Kort, Y. A. W. de, "Shining light on memory: Effects of bright light on working memory performance," *Behavioural brain research*, Jg. 294, S. 234–245, 2015.
- [141] Alkozei, A. *et al.*, "Exposure to Blue Light Increases Subsequent Functional Activation of the Prefrontal Cortex During Performance of a Working Memory Task," *Sleep*, Jg. 39, Nr. 9, S. 1671–1680, 2016.
- [142] Vandewalle, G. *et al.*, "Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure," *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, Jg. 17, Nr. 12, S. 2788–2795, 2007.
- [143] Diamond, A., "Executive functions," *Annual review of psychology*, Jg. 64, S. 135–168, 2013.
- [144] Collins, A. und Koechlin, E., "Reasoning, learning, and creativity: frontal lobe function and human decision-making," *PLoS biology*, Jg. 10, Nr. 3, e1001293, 2012.
- [145] Cowan, N., "What are the differences between long-term, short-term, and working memory?," in *Essence of Memory (Progress in Brain Research 169)*, Sossin, W. S., Lacaille, J.-C. und Castellucci, V. F., Hg., s.l.: Elsevier textbooks, 2008, S. 323–338.
- [146] Bortz, J. und Döring, N., *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler*, 5. Aufl. (Springer-Lehrbuch). Berlin: Springer, 2016.
- [147] Akerstedt, T. und Gillberg, M., "Subjective and objective sleepiness in the active individual," *The International journal of neuroscience*, Jg. 52, 1-2, S. 29–37, 1990.

- [148] Dinges, D. F. und Powell, J. W., "Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations," *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, Jg. 17, Nr. 6, S. 652–655, 1985.
- [149] Kirchner, W. K., "Age differences in short-term retention of rapidly changing information," *Journal of experimental psychology*, Jg. 55, Nr. 4, S. 352–358, 1958.
- [150] Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R. und Bullmore, E., "N-back working memory paradigm: a meta-analysis of normative functional neuroimaging studies," *Human Brain Mapping*, Jg. 25, Nr. 1, S. 46–59, 2005.
- [151] Donders, F. C., "On the speed of mental processes," *Acta Psychologica*, Jg. 30, S. 412–431, 1969.
- [152] Meule, A., "Reporting and Interpreting Task Performance in Go/No-Go Affective Shifting Tasks," *Frontiers in psychology*, Jg. 8, S. 701, 2017.
- [153] Verbruggen, F. und Logan, G. D., "Automatic and controlled response inhibition: associative learning in the go/no-go and stop-signal paradigms," *Journal of experimental psychology. General*, Jg. 137, Nr. 4, S. 649–672, 2008.
- [154] Lockley, S. W., Evans, E. E., Scheer, F. A., Brainard, G. C., Czeisler, C. A. und Aeschbach, D., "Short-Wavelength Sensitivity for the Direct Effects of Light on Alertness, Vigilance, and the Waking Electroencephalogram in Humans," *Sleep*, Jg. 29, Nr. 2, S. 161–168, 2006.

- [155] Pressman, M. R. und Fry, J. M., "Relationship of autonomic nervous system activity to daytime sleepiness and prior sleep," *Sleep*, Jg. 12, Nr. 3, S. 239–245, 1989.
- [156] Henelius, A., Sallinen, M., Huotilainen, M., Müller, K., Virkkala, J. und Puolamäki, K., "Heart rate variability for evaluating vigilant attention in partial chronic sleep restriction," *Sleep*, Jg. 37, Nr. 7, S. 1257–1267, 2014.
- [157] Schmidt, C., Collette, F., Cajochen, C. und Peigneux, P., "A time to think: circadian rhythms in human cognition," *Cognitive neuropsychology*, Jg. 24, Nr. 7, S. 755–789, 2007.
- [158] Zeitzer, J. M., Dijk, D.-J., Kronauer, R. E., Brown, E. N. und Czeisler, C. A., "Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression," *Journal of Physiology*, Jg. 526.3, S. 695–702, 2000.
- [159] Lowden, A., Akerstedt, T. und Wibom, R., "Suppression of sleepiness and melatonin by bright light exposure during breaks in night work," *Journal of Sleep Research*, Jg. 13, Nr. 1, S. 37–43, 2004.
- [160] Chang, A.-M., Scheer, F. A. J. L. und Czeisler, C. A., "The human circadian system adapts to prior photic history," *The Journal of physiology*, Jg. 589, Pt 5, S. 1095–1102, 2011.
- [161] Chang, A.-M., Scheer, F. A. J. L., Czeisler, C. A. und Aeschbach, D., "Direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans depend on prior light history," *Sleep*, Jg. 36, Nr. 8, S. 1239–1246, 2013.

- [162] Vandewalle, G. *et al.*, "Daytime light exposure dynamically enhances brain responses," *Current biology*, Jg. 16, Nr. 16, S. 1616–1621, 2006.
- [163] Koenigs, M., Barbey, A. K., Postle, B. R. und Grafman, J., "Superior parietal cortex is critical for the manipulation of information in working memory," *J. Neurosci.*, Jg. 29, Nr. 47, S. 14980–14986, 2009.
- [164] Smolders, K., Kort, Y. A. de und Cluitmans, P. J., "Higher light intensity induces modulations in brain activity even during regular daytime working hours," *Lighting Research & Technology*, Jg. 48, Nr. 4, S. 433–448, 2016.
- [165] Huiberts, L. M., Smolders, K. C. H. J. und Kort, Y. A. W. de, "Non-image forming effects of illuminance level: Exploring parallel effects on physiological arousal and task performance," *Physiology & behavior*, Jg. 164, Pt A, S. 129–139, 2016.
- [166] Smolders, K. C. H. J., Peeters, S. T., Vogels, I. M. L. C. und Kort, Y. A. W. de, "Investigation of Dose-Response Relationships for Effects of White Light Exposure on Correlates of Alertness and Executive Control during Regular Daytime Working Hours," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 33, Nr. 6, S. 649–661, 2018.
- [167] Lok, R., Woelders, T., Gordijn, M. C. M., Hut, R. A. und Beersma, D. G. M., "White Light During Daytime Does Not Improve Alertness in Well-rested Individuals," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 33, Nr. 6, S. 637–648, 2018.
- [168] Phipps-Nelson, J., Redman, J. R., Schlangen, L. J. M. und Rajaratnam, S. M. W., "Blue light exposure reduces objective measures of sleepiness during prolonged nighttime performance

- testing," *Chronobiology international*, Jg. 26, Nr. 5, S. 891–912, 2009.
- [169] Plitnick, B., Figueiro, M. G., Wood, B. und Rea, M. S., "The effects of red and blue light on alertness and mood at night," *Lighting Research & Technology*, Jg. 42, Nr. 4, S. 449–458, 2010.
- [170] Vandewalle, G. *et al.*, "Brain responses to violet, blue, and green monochromatic light exposures in humans: prominent role of blue light and the brainstem," *PloS one*, Jg. 2, Nr. 11, e1247, 2007.
- [171] Foucher, J. R., Otzenberger, H. und Gounot, D., "Where arousal meets attention: a simultaneous fMRI and EEG recording study," *NeuroImage*, Jg. 22, Nr. 2, S. 688–697, 2004.
- [172] Cabeza, R. und Nyberg, L., "Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies," *Journal of cognitive neuroscience*, Jg. 12, Nr. 1, S. 1–47, 2000.
- [173] Okamoto, Y. und Nakagawa, S., "Effects of daytime light exposure on cognitive brain activity as measured by the ERP P300," *Physiology & behavior*, Jg. 138, S. 313–318, 2015.
- [174] Polich, J. und Kok, A., "Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review," *Biological psychology*, Jg. 41, Nr. 2, S. 103–146, 1995.
- [175] Okamoto, Y. und Nakagawa, S., "Effects of light wavelength on MEG ERD/ERS during a working memory task," *International Journal of Psychophysiology*, Jg. 104, S. 10–16, 2016.
- [176] Alkozei, A., Smith, R., Dailey, N. S., Bajaj, S. und Killgore, W. D. S., "Acute exposure to blue wavelength light during

- memory consolidation improves verbal memory performance," *PloS one*, Jg. 12, Nr. 9, e0184884, 2017.
- [177] Beaven, C. M. und Ekström, J., "A comparison of blue light and caffeine effects on cognitive function and alertness in humans," *PloS one*, Jg. 8, Nr. 10, e76707, 2013.
- [178] Revell, V. L., Arendt, J., Fogg, L. F. und Skene, D. J., "Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths," *Neuroscience letters*, Jg. 399, 1-2, S. 96–100, 2006.
- [179] Sahin, L. und Figueiro, M. G., "Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon," *Physiology & behavior*, Jg. 116-117, S. 1–7, 2013.
- [180] Mills, P. R., Tomkins, S. C. und Schlangen, L. J. M., "The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance," *Journal of circadian rhythms*, Jg. 5, Nr. 2, S. 2, 2007.
- [181] Keis, O., Helbig, H., Streb, J. und Hille, K., "Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance," *Trends in Neuroscience and Education*, Jg. 3, 3-4, S. 86–92, 2014.
- [182] Te Kulve, M., Schlangen, L., Schellen, L., Souman, J. L. und van Marken Lichtenbelt, W., "Correlated colour temperature of morning light influences alertness and body temperature," *Physiology & behavior*, Jg. 185, S. 1–13, 2018.
- [183] Choi, K., Shin, C., Kim, T., Chung, H. J. und Suk, H.-J., "Awakening effects of blue-enriched morning light exposure on university students' physiological and subjective responses," *Scientific reports*, Jg. 9, Nr. 1, S. 345, 2019.

- [184] Visser, E. K., Beersma, D. G. und Daan, S., "Melatonin suppression by light in humans is maximal when the nasal part of the retina is illuminated," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 14, Nr. 2, S. 116–121, 1999.
- [185] Rüger, M., Gordijn, M. C. M., Beersma, D. G. M., Vries, B. de und Daan, S., "Nasal versus temporal illumination of the human retina: effects on core body temperature, melatonin, and circadian phase," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 20, Nr. 1, S. 60–70, 2005.
- [186] Lasko, T. A., Kripke, D. F. und Elliot, J. A., "Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 14, Nr. 2, S. 122–125, 1999.
- [187] Smith, J. S., Kripke, D. F., Elliott, J. A. und Youngstedt, S. D., "Illumination of upper and middle visual fields produces equivalent suppression of melatonin in older volunteers," *Chronobiology international*, Jg. 19, Nr. 5, S. 883–891, 2002.
- [188] Glickman, G., Hanifin, J. P., Rollag, M. D., Wang, J., Cooper, H. und Brainard, G. C., "Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 18, Nr. 1, S. 71–79, 2003.
- [189] Dewan, K., Benloucif, S., Reid, K., Wolfe, L. F. und Zee, P. C., "Light-induced changes of the circadian clock of humans: increasing duration is more effective than increasing light intensity," *Sleep*, Jg. 34, Nr. 5, S. 593–599, 2011.

- [190] Chang, A.-M. *et al.*, "Human responses to bright light of different durations," *The Journal of physiology*, Jg. 590, Nr. 13, S. 3103–3112, 2012.
- [191] Leproult, R., "Transition from Dim to Bright Light in the Morning Induces an Immediate Elevation of Cortisol Levels," *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, Jg. 86, Nr. 1, S. 151–157, 2001.
- [192] Rüger, M., Gordijn, M. C. M., Beersma, D. G. M., Vries, B. de und Daan, S., "Weak relationships between suppression of melatonin and suppression of sleepiness/fatigue in response to light exposure," *Journal of Sleep Research*, Jg. 14, Nr. 3, S. 221–227, 2005.
- [193] Smolders, K. C. und Kort, Y. A. de, "Investigating daytime effects of correlated colour temperature on experiences, performance, and arousal," *Journal of Environmental Psychology*, Jg. 50, S. 80–93, 2017.
- [194] Huiberts, L. M., Smolders, K. C. H. J. und Kort, Y. A. W. de, "Seasonal and time-of-day variations in acute non-image forming effects of illuminance level on performance, physiology, and subjective well-being," *Chronobiology international*, Jg. 34, Nr. 7, S. 827–844, 2017.
- [195] Taillard, J., Capelli, A., Sagaspe, P., Anund, A., Akerstedt, T. und Philip, P., "In-car nocturnal blue light exposure improves motorway driving: a randomized controlled trial," *PloS one*, Jg. 7, Nr. 10, e46750, 2012.
- [196] Verster, J. C. und Roth, T., "Standard operation procedures for conducting the on-the-road driving test, and measurement of

- the standard deviation of lateral position (SDLP),” *International journal of general medicine*, Jg. 4, S. 359–371, 2011.
- [197] Weisgerber, D. M., Nikol, M. und Mistlberger, R. E., “Driving home from the night shift: a bright light intervention study,” *Sleep medicine*, Jg. 30, S. 171–179, 2017.
- [198] Schüler, S., Rothe, S., Betz, D., Schrauf, M. und Popp, R., “Integration of a Melanopic-Light-Unit in a Truck and Investigation of its Impact on Truck Drivers Under Real-Life Conditions,” in *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lightning: ISAL 2017* (Darmstädter Lichttechnik Volume 17), Khanh, T. Q., Hg., München: utzverlag GmbH, 2017.
- [199] Schüler, S., Betz, D. und Popp, R., “Integration of a melanopic-light-unit into a passenger car – initial results from a field study,” in *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lightning: ISAL 2019* (Darmstädter Lichttechnik Volume 18), Khanh, T. Q., Hg., München: utzverlag GmbH, 2019.
- [200] Reidenbach, H.-D., Hg. *Blendung durch optische Strahlungsquellen: Forschung Projekt F 2185*. Dortmund, Berlin, Dresden: BAuA, 2008.
- [201] Lok, R., Smolders, K. C. H. J., Beersma, D. G. M. und Kort, Y. A. W. de, “Light, Alertness, and Alerting Effects of White Light: A Literature Overview,” *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 33, Nr. 6, S. 589–601, 2018.
- [202] Dijk, D. J., Duffy, J. F. und Czeisler, C. A., “Circadian and sleep/wake dependent aspects of subjective alertness and cognitive performance,” *Journal of Sleep Research*, Jg. 1, Nr. 2, S. 112–117, 1992.

- [203] Lucas, R. J. *et al.*, "Measuring and using light in the melanopsin age," *Trends in Neurosciences*, Jg. 37, Nr. 1, S. 1–9, 2014.
- [204] CIE, "CIE S 026/E:2018 CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light," 2018, doi: 10.25039/S026.2018.
- [205] Spitschan, M., Stefani, O., Blattner, P., Gronfier, C., Lockley, S. W. und Lucas, R. J., "How to Report Light Exposure in Human Chronobiology and Sleep Research Experiments," *Clocks & sleep*, Jg. 1, Nr. 3, S. 280–289, 2019.
- [206] Schierz, C., "Zur Photometrie nichtvisueller Lichtwirkungen," 6. *Symposium „Licht und Gesundheit“*, S. 112–123, 2008.
- [207] George C. Brainard, Mark D. Rollag und John P. Hanifin, "Photic Regulation of Melatonin in Humans: Ocular and Neural Signal Transduction," *Journal of Biological Rhythms*, Jg. 12, Nr. 6, S. 537–546, 1997.
- [208] McIntyre, I. M., Norman, T. R., Burrows, G. D. und Armstrong, S. M., "Quantal melatonin suppression by exposure to low intensity light in man," *Life Sciences*, Jg. 45, Nr. 4, S. 327–332, 1989.
- [209] Sliney, D. H., "How light reaches the eye and its components," *International journal of toxicology*, Jg. 21, Nr. 6, S. 501–509, 2002.
- [210] Novotny, P., Paulick, P., Schwarz, M. J. und Plischke, H., "The Solid Angle of Light Sources and Its Impact on the Suppression of Melatonin in Humans," in *Human-Computer Interaction. Towards Intelligent and Implicit Interaction*, Hutchison, D. *et al.*, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 454–463.

- [211] Niemeyer, A., Rottmair, L., Neumann, C. und Möckel, C., "Influence of the perceived size of a light source on non-visual effects in humans," *Advanced Optical Technologies*, Jg. 9, Nr. 6, S. 385–393, 2020.
- [212] Atchison, D. A. und Thibos, L. N., "Optical models of the human eye," *Clinical & experimental optometry*, Jg. 99, Nr. 2, S. 99–106, 2016.
- [213] Watson, A. B. und Yellott, J. I., "A unified formula for light-adapted pupil size," *Journal of vision*, Jg. 12, Nr. 10, S. 12, 2012.
- [214] Spitschan, M., "Photoreceptor inputs to pupil control," *Journal of vision*, Jg. 19, Nr. 9, S. 5, 2019.
- [215] Leder, A., *Komfortgewinn für Passagiere auf Langstreckenflügen: Validierung chronobiologisch wirksamer Kabinenbeleuchtung zur Jetlag-Reduktion* (Springer eBook Collection). Wiesbaden: Springer Gabler, 2016.
- [216] infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, "Mobilität in Deutschland 2017 - Ergebnisbericht," 2018.
- [217] Statista Research Department. "Average minutes per day spent travelling to paid work or study by men and women in OECD countries plus China, India and South Africa, as of 2016." <https://www.statista.com/statistics/521886/travel-time-spent-work-study-countries/> (Zugriff am: 29. Mai. 2022).
- [218] Kunst, A. "Häufigkeit von Langstreckenflügen in Deutschland." <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/679904/umfrage/haeufigkeit-von-langstreckenfluegen-in-den-letzten-zwei-jahren-in-deutschland/> (Zugriff am: 31. Mai. 2022).

- [219] Thiffault, P. und Bergeron, J., "Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study," *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 35, Nr. 3, S. 381–391, 2003.
- [220] Körber, M., Cingel, A., Zimmermann, M. und Bengler, K., "Vigilance Decrement and Passive Fatigue Caused by Monotony in Automated Driving," *Procedia Manufacturing*, Jg. 3, S. 2403–2409, 2015.
- [221] McWilliams, T. und Ward, N., "Underload on the Road: Measuring Vigilance Decrements During Partially Automated Driving," *Frontiers in psychology*, Jg. 12, S. 631364, 2021.
- [222] Niemeyer, A. und Neumann, C., "Boosting Human Performance: Human Subject Research on Energizing Effects by Overhead Light Panels for Interior Lighting," in *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lightning: ISAL 2019* (Darmstädter Lichttechnik Volume 18), Khanh, T. Q., Hg., München: utzverlag GmbH, 2019, S. 419–428.
- [223] Rottmair, L., "Human Centric Lighting – Einfluss des Raumwinkels auf nicht-visuelle Lichtwirkung," Bachelorarbeit, Hochschule Landshut, Landshut, 2019.
- [224] Weng, M., Manzey, D., Petermann-Stock, I., Kastner, J. und Tontsch, F.-U., "Evaluation of biologically effective light in the vehicle interior," in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2018 Annual Conference*, Waard, D. de, Brookhuis, K., Coelho, D., Fairclough, S., Manzey, D. und Naumann, A., Hg., 2018.
- [225] Griefahn, B., Kunemund, C., Brode, P. und Mehnert, P., "Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-

- Eveningness-Questionnaires von Horne und Ostberg," *Somnologie*, Jg. 5, Nr. 2, S. 71–80, 2001.
- [226] Price, L., "CIE S 026 alpha-opic Toolbox," 2020, doi: 10.25039/S026.2018.tb.
- [227] Steyer, R., Schwenkmezger, P., Notz, P. und Eid, M., *Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)*. Hogrefe.
- [228] Niedling, M., *Zum Einfluss des Spektrums auf die Blendung: Untersuchungen zur Wirkung des kurzwelligen Strahlungsanteils auf die physiologische und psychologische Blendung* (Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik Band 13). Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2019.
- [229] Mueller, S. T. und Piper, B. J., "The Psychology Experiment Building Language (PEBL) and PEBL Test Battery," *Journal of neuroscience methods*, Jg. 222, S. 250–259, 2014.
- [230] Loh, S., Lamond, N., Dorrian, J., Roach, G. und Dawson, D., "The validity of psychomotor vigilance tasks of less than 10-minute duration," *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, Jg. 36, Nr. 2, S. 339–346, 2004.
- [231] Miller, G. A., "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information," *Psychological Review*, Jg. 63, Nr. 2, S. 81–97, 1956.
- [232] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (2020). Wien, Österreich: R Foundation for Statistical Computing. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.r-project.org/>

- [233] RStudio Team, *RStudio: Integrated Development Environment for R* (2020). Boston, MA: RStudio, PBC. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.rstudio.com/>
- [234] Field, A., Miles, J. und Field, Z., *Discovering statistics using R*. Los Angeles, CA, USA: Sage, 2014.
- [235] Dorrian, J., Rogers, N. L. und Dinges, D. F., "Psychomotor Vigilance Performance: Neurocognitive Assay Sensitive to Sleep Loss," in *Sleep Deprivation*, Kushida, C. A., Hg., CRC Press, 2004, S. 39–70.
- [236] Reifman, J., Kumar, K., Khitrov, M. Y., Liu, J. und Ramakrishnan, S., "PC-PVT 2.0: An updated platform for psychomotor vigilance task testing, analysis, prediction, and visualization," *Journal of neuroscience methods*, Jg. 304, S. 39–45, 2018.
- [237] Conway, A. R. A., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O. und Engle, R. W., "Working memory span tasks: A methodological review and user's guide," *Psychonomic Bulletin & Review*, Jg. 12, Nr. 5, S. 769–786, 2005.
- [238] Stone, J. M. und Towse, J. N., "A Working Memory Test Battery: Java-Based Collection of Seven Working Memory Tasks," *Journal of Open Research Software*, Jg. 3, Nr. 2, S. 92, 2015.
- [239] Foster, J. L., Shipstead, Z., Harrison, T. L., Hicks, K. L., Redick, T. S. und Engle, R. W., "Shortened complex span tasks can reliably measure working memory capacity," *Memory & cognition*, Jg. 43, Nr. 2, S. 226–236, 2015.
- [240] Brickenkamp, R., Schmidt-Atzert, L. und Liepmann, D., *Test d2 – Revision: Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest*, 1. Aufl. Hogrefe.

- [241] Broadbent, D. E. und Broadbent, M. H., "From detection to identification: response to multiple targets in rapid serial visual presentation," *Perception & psychophysics*, Jg. 42, Nr. 2, S. 105–113, 1987.
- [242] Knappe, G., Keinath, A. und Meinecke, C., "Empfehlungen für die Bestimmung der Spurhaltegüte im Kontext der Fahrsimulation," *MMI-Interaktiv*, Nr. 11, 2006.
- [243] Hargutt, V., "Das Lidschlussverhalten als Indikator für Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsprozesse bei Arbeitshandlungen," Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg, 2001.
- [244] Serdar, C. C., Cihan, M., Yücel, D. und Serdar, M. A., "Sample size, power and effect size revisited: simplified and practical approaches in pre-clinical, clinical and laboratory studies," *Biochemia medica*, Jg. 31, Nr. 1, S. 10502, 2021.
- [245] Audi. "Licht als Feel-Good-Manager." <https://www.audi-umweltstiftung.de/progress/de/lightening-the-mood.html> (Zugriff am: 12. Aug. 2022).

VI ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Blick in den Innenraum des Audi Urbansphere Concept [1].	2
Abbildung 2.1:	Schematische Darstellung der Wirkungskette nicht-visueller Lichteffekte mit Systemeingang, verarbeitendem System (Auge und Gehirn) sowie Systemausgang.	9
Abbildung 3.1:	Schematische Abbildung zweier Lichtquellen auf der Netzhaut. Zusätzlich ist die typischerweise verwendete Position zur Messung der Beleuchtungsstärke am Auge dargestellt.	58
Abbildung 3.2:	SPEOS Setup zur Simulation der retinalen Beleuchtungsstärke (übersetzt und ergänzt aus [211]).....	61
Abbildung 3.3:	Simulierte Beleuchtungsstärken des kleinen Lichtszenarios (0,05 sr; 365 lm): a) Beleuchtungsstärke an der Pupille, b) Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut.	62
Abbildung 3.4:	Simulierte Beleuchtungsstärken des großen Lichtszenarios (0,44 sr; 450 lm): a) Beleuchtungsstärke an der Pupille, b) Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut.	62
Abbildung 3.5:	Schematische Darstellung einer autonomen Fahrt in der Zukunft. Das bläuliche Licht	

	trägt durch seine aktivierende Wirkung zu einem produktiven Ambiente bei.....	66
Abbildung 4.1:	Versuchsumgebung mit Büroarbeitsplatz und überkopf Lichtpanel, welches das Szenario <i>große Leuchte</i> zeigt (aus [222]).....	77
Abbildung 4.2:	Maße der für die Szenarien klein und groß verwendeten Leuchtfläche inklusive Positionierung der kleinen Leuchtfläche.....	78
Abbildung 4.3:	Schematische Visualisierung der Sitzposition, in welcher die Probanden vor der Versuchsleuchte saßen	79
Abbildung 4.4:	Modifizierte Audi A8 Make-Up Leuchte mit ausgeklapptem Spiegel zur Maximierung der wahrgenommenen Leuchtfläche (aus [224])	80
Abbildung 4.5:	Spektraldiagramm der Studienleuchten (Nachtischlampe, kleine Leuchte, große Leuchte).....	82
Abbildung 4.6:	Versuchsablauf mit drei Testblöcken und einer monotonen Nebenaufgabe. Das gedimmte Hintergrundlicht ist zu Beginn und am Ende des Versuchs eingeschaltet. Dazwischen variiert die Beleuchtung je nach Versuchsbedingung (<i>Leuchte aus, kleine Leuchte</i> oder <i>große Leuchte</i>).....	87
Abbildung 4.7:	Mittlere KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95%	

	Konfidenzintervall. Je wacher, desto geringer fällt die Wertung aus.....	92
Abbildung 4.8:	Mittlere schläfrig/wach VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.....	94
Abbildung 4.9:	Mittlere MDBF Wertungen (Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.	96
Abbildung 4.10:	Mittelwerte der PVT Reaktionszeiten in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.....	98
Abbildung 4.11:	Mittelwerte der längsten, richtig wiedergegebenen FDST Zahlenfolgen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.....	100
Abbildung 4.12:	Boxplots der Blendbewertung in Abhängigkeit vom Lichtszenario. Das Kreuz symbolisiert den Mittelwert.....	102
Abbildung 4.13:	Ablauf des 60-minütigen Versuchs mit zwei Testblöcken und monotoner Nebenaufgabe. Je nach Versuchsbedingung wird nach 25 Minuten das Lichtpanel eingeschaltet.....	123

Abbildung 4.14:	Mittlere KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto geringer fällt die Wertung aus.	126
Abbildung 4.15:	Mittelwerte der CST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.	127
Abbildung 4.16:	Mittelwerte der Konzentrationsleistung in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.	128
Abbildung 4.17:	Manuelle Fahrt in einem Fahrsimulator (ohne lichttechnische Anpassungen)	144
Abbildung 4.18:	Schematische Seitenansicht der Versuchsumgebung im Fahrsimulator	145
Abbildung 4.19:	Ablauf eines Versuchstages im Fahrsimulator	151
Abbildung 4.20:	Mittlere KSS Wertungen (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.	154
Abbildung 4.21:	Verlauf des mittleren Melatoninspiegels (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.	155
Abbildung 4.22:	Verlauf der mittleren <i>2-back task</i> Trefferquote (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.	157

Abbildung 4.23:	Verlauf der mittleren Standardabweichung der lateralen Spurposition (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.....	158
Abbildung 4.24:	Boxplots der Blendbewertung in Abhängigkeit vom Lichtszenario. Das Kreuz symbolisiert den Mittelwert.....	159
Abbildung 5.1:	Human Centric Lighting Modell mit variabler Segmentierung, Farbtemperatur und Helligkeit [245]	180
Abbildung B.1:	Informationsblatt und Einverständniserklärung zur ersten Probandenstudie.....	235
Abbildung B.2:	Anleitung zur Generierung des Probandencodes und allgemeine demographische Fragen Informationsblatt und Einverständniserklärung zur ersten Probandenstudie	236
Abbildung B.3:	Vollständiger Fragebogenkatalog inklusive Anleitung zum Starten der Leistungstests für einen kompletten Versuchsdurchlauf (hier <i>große Leuchte</i>).....	256
Abbildung B.4:	Boxplot der KSS Wertungen pro Messblock und Messzeitpunkt je Block. Ein höherer Wert bedeutet „müder“. Die Länge der Whisker beträgt den 1,5-fachen Interquartilsabstand. Die Punkte sind Ausreißer.....	257

Abbildung B.5:	Boxplot der schläfrig/wach VAS Wertungen pro Messblock und Messzeitpunkt je Block. Ein höherer Wert bedeutet „wacher“.258
Abbildung B.6:	Boxplot der entspannt/unentspannt VAS Wertungen pro Messblock und Messzeitpunkt je Block. Ein höherer Wert bedeutet „unentspannter“.259
Abbildung B.7:	Boxplot der KSS Wertungen pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto geringer fällt die Wertung aus.260
Abbildung B.8:	Boxplot der schläfrig/wach VAS Wertungen pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.261
Abbildung B.9:	Boxplot der entspannt/unentspannt VAS Wertungen pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je entspannter, desto niedriger fällt die Wertung aus.262
Abbildung B.10:	Mittlere VAS Wertungen (entspannt/unentspannt) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je entspannter, desto höher niedriger fällt die Wertung aus.263
Abbildung B.11:	Boxplot der MDBF Wertungen (Kategorie „gute/schlechte Stimmung“) pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je besser die Stimmung, desto höher fällt die Wertung aus.264

Abbildung B.12: Mittlere MDBF Wertungen (Kategorie „gute/schlechte Stimmung“) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je besser die Stimmung, desto höher fällt die Wertung aus..... 265

Abbildung B.13: Boxplot der MDBF Wertungen (Kategorie „Ruhe/Unruhe“) pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je ruhiger, desto höher fällt die Wertung aus. 266

Abbildung B.14: Mittlere MDBF Wertungen (Kategorie „Ruhe/Unruhe“) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je ruhiger, desto höher fällt die Wertung aus. 267

Abbildung B.15: Boxplot der MDBF Wertungen (Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“) pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus. 268

Abbildung B.16: Boxplots der PVT Reaktionszeiten in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario..... 269

Abbildung B.17: Boxplots der FDST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario..... 271

Abbildung B.18: Mittelwerte der FDST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und

	LichtszENARIO. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.....	271
Abbildung B.19:	Boxplots der längsten, richtig wiedergegebenen FDST Zahlenfolgen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und LichtszENARIO	273
Abbildung C.20:	Boxplot der KSS Wertungen pro Messblock und Messzeitpunkt je Block. Ein höherer Wert bedeutet „müder“	279
Abbildung C.21:	Boxplots der KSS Wertungen pro LichtszENARIO und Messzeitpunkt. Je wacher, desto geringer fällt die Wertung aus.....	280
Abbildung C.22:	Boxplots der CST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und LichtszENARIO	281
Abbildung C.23:	Boxplots der Konzentrationsleistung in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und LichtszENARIO	282
Abbildung D.24:	Spektraldiagramm der im Fahrsimulator verwendeten Studienleuchten (Nachttischlampe, kleine Leuchte, große Leuchte).....	284
Abbildung D.25:	Boxplots der KSS Wertung in Abhängigkeit von Uhrzeit und LichtszENARIO	291
Abbildung D.26:	Boxplots der Melatonin Spiegel in Abhängigkeit von Uhrzeit und LichtszENARIO	293

Abbildung D.27: Boxplots der *2-back task* Trefferquote in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario 294

Abbildung D.28: Boxplots der Standardabweichung der lateralen Spurposition in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario 295

Abbildung D.29: Mittlere MDBF Wertungen (Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus. 296

Abbildung D.30: Boxplots der MDBF Wertungen (Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“) pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus. 297

Abbildung D.31: Verlauf der Mittelwerte der prozentual falsch getätigten *NoGo*-Reaktionen (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario. Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung..... 298

Abbildung D.32: Boxplots der prozentual falsch getätigten *NoGo*-Reaktionen in Abhängigkeit von Testbatterie bzw. Uhrzeit und Lichtszenario. Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung..... 299

Abbildung D.33: Verlauf der Mittelwerte der prozentual richtigen RSVP-Reaktionen (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und

Lichtszenario. Ein höherer Wert entspricht einer besseren Leistung.....300

Abbildung D.34: Boxplots der prozentual richtigen RSVP-Reaktionen in Abhängigkeit von Testbatterie bzw. Uhrzeit und Lichtszenario. Ein höherer Wert entspricht einer besseren Leistung.....301

Abbildung D.35: Mittelwertverlauf der Vigilanzuhr Miss-Quote (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario. Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.302

Abbildung D.36: Boxplots der Vigilanzuhr Miss-Quote in Abhängigkeit von Testbatterie bzw. Uhrzeit und Lichtszenario. Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.303

VII TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4.1:	Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur, photopigmentspezifische Bestrahlungsstärke & m-EDI der verwendeten Lichtquellen (nach [226])81
Tabelle 4.2:	Orthogonale Kontraste für den Faktor Lichtszenario90
Tabelle 4.3:	Nicht-orthogonale Kontraste für den Faktor Messzeitpunkt90
Tabelle 4.4:	Mittelwert und Standardabweichung der Blendbewertung (inverse de Boer Skala) in Abhängigkeit vom Lichtszenario101
Tabelle 4.5:	Orthogonale Kontraste für den Faktor Lichtszenario124
Tabelle 4.6:	Orthogonaler Kontrast für den Faktor Messzeitpunkt124
Tabelle B.1:	Mittelwert und Standardabweichung der KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messblock und Messzeitpunkt während eines Blocks. Ein höherer Wert bedeutet „müder“.257
Tabelle B.2:	Mittelwert und Standardabweichung der schläfrig/wach VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messblock und Messzeitpunkt während eines Blocks. Ein höherer Wert bedeutet „wacher“.258

Tabelle B.3:	Mittelwert und Standardabweichung der entspannt/unentspannt VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messblock und Messzeitpunkt während eines Blocks. Ein höherer Wert bedeutet „unentspannter“.....	259
Tabelle B.4:	Mittelwerte und Standardabweichungen der gemittelten KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario.....	260
Tabelle B.5:	Mittelwerte und Standardabweichungen der schläfrig/wach VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.	261
Tabelle B.6:	Mittelwerte und Standardabweichungen der entspann/unentspannt VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Ein höherer Wert bedeutet „unentspannter“.....	262
Tabelle B.7:	Mittelwerte und Standardabweichungen der MDBF Kategorie „gute/schlechte Stimmung“ in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je besser die Stimmung, desto höher fällt die Wertung aus.....	264
Tabelle B.8:	Mittelwerte und Standardabweichungen der MDBF Kategorie „Ruhe/Unruhe“ in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und	

	Lichtszenario. Je ruhiger, desto höher fällt die Wertung aus.....	266
Tabelle B.9:	Mittelwerte und Standardabweichungen der MDBF Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“ in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.	268
Tabelle B.10:	Mittelwerte und Standardabweichungen der PVT Reaktionszeiten in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Werte sind in ms angegeben.	269
Tabelle B.11:	Mittelwerte und Standardabweichungen der FDST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je ruhiger, desto höher fällt die Wertung aus.	270
Tabelle B.12:	Mittlere Länge und Standardabweichungen der längsten richtig wiedergegebenen FDST Zahlenfolge in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario.	273
Tabelle B.13:	Antwort auf die Frage „Wie empfinden Sie die Helligkeit der Stehleuchte?“	274
Tabelle B.14:	Antwort auf die Frage „Wie empfinden Sie die Lichtfarbe der Stehleuchte?“	274
Tabelle B.15:	Antwort auf die Frage „Wie wirkt das Licht der stehleuchte auf Sie?“ (angenehm/unangenehm)	275
Tabelle B.16:	Antwort auf die Frage „Wie wirkt das Licht der stehleuchte auf Sie?“ (gemütlich/ungemütlich).....	275

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle B.17:	Antwort auf die Frage „Wie wirkt das Licht der stehleuchte auf Sie?“ (aktivierend/ermüdend) 276
Tabelle B.18:	Antwort auf die Frage „Wie bewerten Sie die Größe der Stehleuchte?“ 276
Tabelle B.19:	Antwort auf die Frage „Wie bewerten Sie die Position der Stehleuchte?“ 277
Tabelle C.20:	Mittelwerte und Standardabweichungen der KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messblock und Messzeitpunkt während eines Blocks. Ein höherer Wert bedeutet „müder“ 279
Tabelle C.21:	Mittelwerte und Standardabweichungen der KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario 280
Tabelle C.22:	Mittelwerte und Standardabweichungen der CST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario 281
Tabelle C.23:	Mittelwerte und Standardabweichungen der Konzentrationsleistung in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario 282
Tabelle D.24:	Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur, photopigmentspezifische Bestrahlungsstärke & m-EDI der im Fahrsimulator verwendeten Lichtquellen (nach [226]) 284
Tabelle D.25:	Mittelwerte und Standardabweichungen der KSS Wertungen in Abhängigkeit von

	Uhrzeit und Lichtszenario. Ein höherer Wert bedeutet „müder“.....	290
Tabelle D.26:	Mittelwerte und Standardabweichungen der Melatoninspiegel in pg/ml in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.....	292
Tabelle D.27:	Mittelwerte und Standardabweichungen der <i>2-back task</i> Trefferquote in % in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.....	294
Tabelle D.28:	Mittelwerte und Standardabweichungen der Standardabweichung der lateralen Spurposition in m in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.....	295
Tabelle D.29:	Mittelwerte und Standardabweichungen der MDBF Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“ in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.	296
Tabelle D.30:	Mittelwerte und Standardabweichungen der prozentual falsch getätigten <i>NoGo</i> -Reaktionen in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario (in %). Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.	298
Tabelle D.31:	Mittelwerte und Standardabweichungen der prozentual richtig getätigten <i>RSVP</i> -Reaktionen in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario (in %). Ein höherer Wert entspricht einer besseren Leistung.	300

Tabelle D.32: Mittelwerte und Standardabweichungen der Vigilanzuhr Miss-Quote in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario (in %). Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.....302

VIII ANHANG

Anhang A: ABKÜRZUNGEN

AV	abhängige Variable
ANOVA	analyses of variance
CST	complex span task
DMH	dorsomedialer Hypothalamus
EDI	equivalent daylight illuminance
EEG	Elektroenzephalografie
ELISA	enzyme-linked immunosorbent assay
FDST	forward digit span task
fMRI	functional magnetic resonance imaging
IGL	intergeniculate leaflet
ipRGC	intrinsically photosensitive retinal ganglion cell
ISI	Interstimulusintervall
KSS	Karolinka Sleepiness Scale
LC	locus caeruleus

LHb	lateral habenula
LMM	linear mixed model
MCTQ	Munich ChronoType Questionnaire
MEQ	Morningness-Eveningness Questionnaire
OPN	olivary pretectal nucleus
PEBL	Psychology Experiment Building Language
PG	pineal gland
PVN	paraventricular nucleus
PVT	psychomotor vigilance task
RHT	retinohypothalamischer Trakt
RIA	Radioimmunassay
RSVP	rapid serial visual presentation
SAD	seasonal affective disorder
SCN	suprachiasmatic nucleus
UV	unabhängige Variable
VAS	visuelle Analogskala
VLPO	ventrolateral preoptic nucleus

**Anhang B: ERGÄNZUNGEN ZUR
ERSTEN PROBANDENSTUDIE**

B.1 VERSUCHSMATERIAL UND FRAGEBÖGEN

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Informationsblatt und Einverständniserklärung zur Probandenstudie „Human Centric Lighting“

Sehr geehrte(r) VersuchsteilnehmerIn,

vielen Dank für Ihr Interesse an unserer Studie „Human Centric Lighting“. Im Rahmen dieser Studie wollen wir die nicht visuelle Wirkung von Licht untersuchen. Dabei soll analysiert werden, inwiefern es möglich ist Menschen durch gezielte Beleuchtung mit kaltweißem Licht zu vitalisieren und ihre kognitive Leistungsbereitschaft zu erhöhen.

Dazu möchten wir Probanden in einer definierten Versuchsumgebung (Labor) verschiedene Beleuchtungsszenarien präsentieren. Hierbei soll während der Versuchsdurchführung die Reaktion der Probanden auf die Beleuchtung gemessen werden. Insgesamt sollen drei Szenarien an jeweils unterschiedlichen Tagen (morgens / vormittags) getestet werden, wobei ein Szenario 90 Minuten Zeit in Anspruch nimmt. Die Versuchstage können über mehrere Wochen verteilt werden. Zwischen den Versuchstagen muss mindestens ein Tag Pause liegen.

Geplante Messgrößen

Da es sich bei der nicht visuellen Wirkung von Licht meist um geringe, eher unterbewusste Effekte handelt, ist es dringend notwendig neben subjektiven Daten auch objektive Daten zu erheben. Zur Erfassung Ihrer subjektiven Müdigkeit / Wachheit kommen die Karolinska Sleepiness Scale und visuelle Analogskalen zum Einsatz. Weiterhin soll mittels Fragebögen Ihr Befinden und Ihre Wahrnehmung der Beleuchtung analysiert werden. Zur Erfassung von objektiven Daten werden ein Reaktionszeit- sowie ein Merkfähigkeitstest eingesetzt.

Um aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse generieren zu können, möchten wir Sie bitten vor Versuchstagen Ihre übliche Bettgezeit (± 30 Minuten) beizubehalten, falls dies möglich ist. Im Hinblick auf Ihren Koffeinkonsum (z.B. Kaffee oder Cola) möchten wir Sie bitten sich an Versuchstagen vor der Versuchsdurchführung an Ihrem üblichen Alltag zu orientieren.

Umgang mit Ihren Daten

Durch die Verwendung eines persönlichen Probandencodes (wird am ersten Versuchstag erstellt) können wir eine vollständige Anonymität der zu erhebenden Daten gewährleisten. Die erhobenen Daten werden nur in Zusammenhang mit Ihrem Probandencode aufbewahrt und können nicht in Verbindung mit Ihrem Namen oder Ihrer E-Mail-Adresse gesetzt werden. Alle Daten werden als vertraulich klassifiziert und nur auf verschlüsselten Datenträgern gespeichert. Die erhobenen Daten sollen ausschließlich zur Beantwortung unserer Forschungsfragen verwendet werden und werden anschließend gelöscht. Ergebnisse werden nur zusammengefasst präsentiert (5+ Probanden je Gruppe), sodass auch hier kein Rückschluss auf Ihre Person möglich ist.

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht

Koordination: Arvid Niemeyer

Weitere Anmerkungen

Die Teilnahme an dieser Studie ist selbstverständlich freiwillig. Sie haben jederzeit die Möglichkeit die Studie ohne Angabe von Gründen abubrechen oder der Speicherung und Auswertung aller oder einzelner Messparameter zu widersprechen, ohne dass daraus ein Nachteil für Sie entsteht. Wenn Sie Fragen zu Inhalten und zum Ablauf der Studie haben kontaktieren Sie bitte den Versuchskordinator.

Inhalte und Ablauf der Probandenstudie sind mit der Abteilung für Mitarbeiterbefragungen und dem Betriebsrat abgestimmt.

Einverständnis

Mit Ihrer Unterschrift bestätigen Sie, dass Sie das Informationsblatt vollständig gelesen haben und mit Rahmenbedingungen der Studie sowie dem Umgang Ihrer Daten einverstanden sind.

Datum und Unterschrift
des Probanden

Datum und Unterschrift
des Versuchskordinators

Name in Druckbuchstaben

Name in Druckbuchstaben

Abbildung B.1: Informationsblatt und Einverständniserklärung zur ersten Probandenstudie

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode und demographische Fragen

Erstellung Ihres Probandencodes

Um Ihre Daten anonym und vertraulich behandeln zu können, bitten wir Sie im Folgenden einen persönlichen Probandencode zu erstellen. So können wir gewährleisten, dass anhand der während des Versuchs erhobenen Daten keine Rückschlüsse auf Ihre Person möglich sind. Dazu bitten wir Sie die folgenden drei Fragen zu beantworten und die jeweiligen Buchstaben und Zahlen zu einem Code zusammenzusetzen.

1. Die ersten zwei Buchstaben des Vornamens Ihrer Mutter (falls unbekannt: KA)
2. Die ersten zwei Buchstaben des Vornamens Ihres Vaters (falls unbekannt: KA)
3. Die ersten zwei Ziffern Ihres Geburtstags (z.B. 07, wenn Sie am 07.02.1985 geboren sind)

Wenn Sie die Antworten der drei Fragen aneinanderreihen, dann ergibt sich Ihr persönlicher Probandencode (z.B. TI-AN-07 für Tina, Andreas, 07.02.1985).

Bitte tragen Sie diesen hier ein:

_____ - _____ - _____

Demographische Fragen

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen zu Ihrer Person:

Alter: _____ Jahre

Geschlecht: _____ (m/w)

Sehhilfe: _____ (keine/Brille/Kontaktlinsen)

Abbildung B.2: Anleitung zur Generierung des Probandencodes und allgemeine demographische Fragen Informationsblatt und Einverständniserklärung zur ersten Probandenstudie

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Lernphase
------------------------------	--------------------------------------	--

Fragen zur Schläfrigkeit

Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Welche der folgenden Aussagen trifft am besten auf Ihr derzeitiges Schläfrigkeitsgefühl zu? Bitte kreuzen Sie nur eine Aussage an.	
<input type="checkbox"/>	1 – extrem wach
<input type="checkbox"/>	2 – sehr wach
<input type="checkbox"/>	3 – wach
<input type="checkbox"/>	4 – eher wach
<input type="checkbox"/>	5 – weder wach noch schläfrig
<input type="checkbox"/>	6 – erste Anzeichen von Schläfrigkeit
<input type="checkbox"/>	7 – schläfrig, aber keine Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	8 – schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	9 – extrem schläfrig, große Mühe wach zu bleiben

Visuelle Analogskala

Wie entspannt oder angespannt fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr entspannt	sehr angespannt

Wie schläfrig oder wach fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr schläfrig	sehr wach

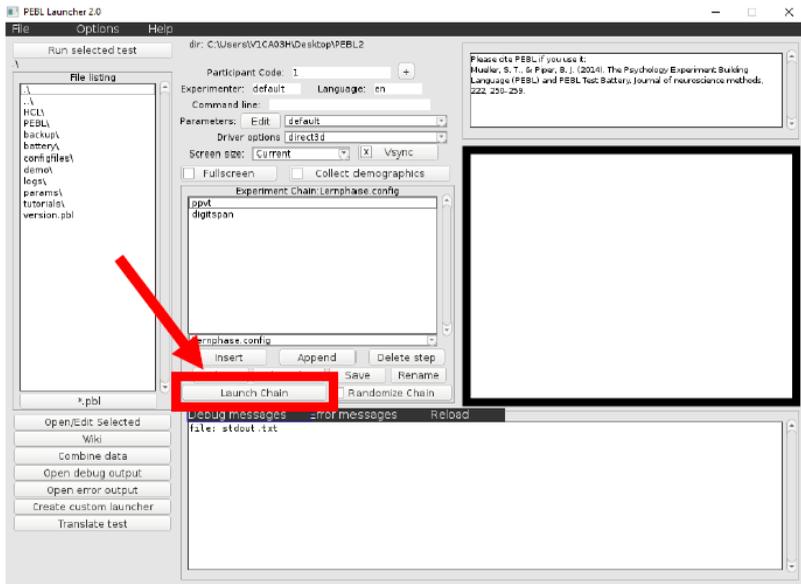
Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
 Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Lernphase
------------------------------	--------------------------------------	--

Bitte beginnen Sie mit der Durchführung der automatisierten Tests auf dem Computer.

Die Tests starten, indem Sie auf „Launch Chain“ in PEBL 2.0 klicken. Folgen Sie anschließend den Aufforderungen auf dem Bildschirm.

Nach Beendigung der zwei Tests fahren Sie bitte mit den Fragebögen fort.



ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Lernphase
------------------------------	--------------------------------------	--

Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)

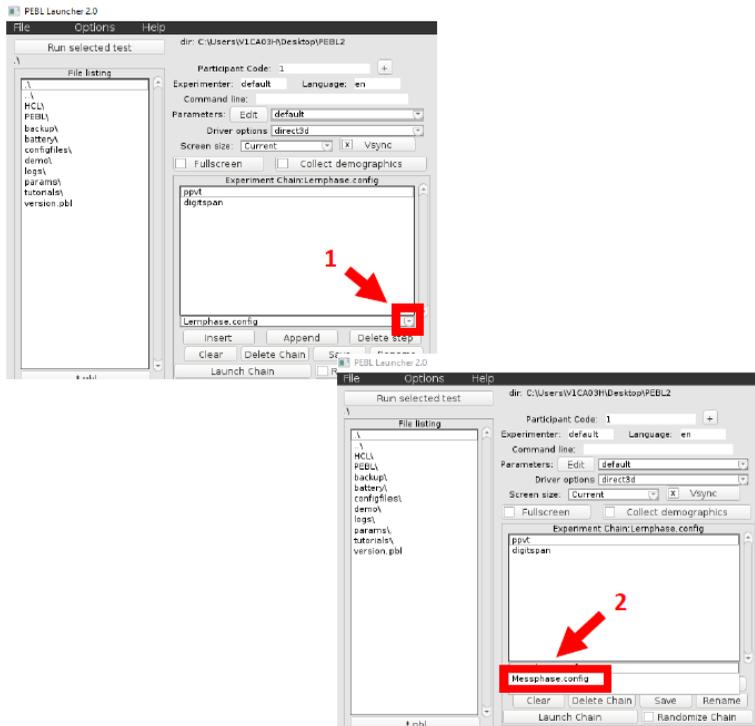
Im Moment fühle ich mich	überhaupt nicht				sehr
	1	2	3	4	5
1. zufrieden	<input type="checkbox"/>				
2. ausgeruht	<input type="checkbox"/>				
3. ruhelos	<input type="checkbox"/>				
4. schlecht	<input type="checkbox"/>				
5. schlapp	<input type="checkbox"/>				
6. gelassen	<input type="checkbox"/>				
7. müde	<input type="checkbox"/>				
8. gut	<input type="checkbox"/>				
9. unruhig	<input type="checkbox"/>				
10. munter	<input type="checkbox"/>				
11. unwohl	<input type="checkbox"/>				
12. entspannt	<input type="checkbox"/>				
13. schläfrig	<input type="checkbox"/>				
14. wach	<input type="checkbox"/>				
15. frisch	<input type="checkbox"/>				
16. ermattet	<input type="checkbox"/>				

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
 Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. 81): Lernphase
------------------------------	--------------------------------------	--

Wechsel zu Messmodus und Test der Nebenaufgabe

Wechseln Sie in PEBL 2.0 in den Messmodus, indem Sie zuerst das unten abgebildete Drop Down Menü öffnen (Schritt 1) und anschließend auf „Messphase.config“ klicken (Schritt 2).



Öffnen Sie das Firefox Fenster über die Taskleiste und machen Sie sich mit dem Web Player vertraut (Play/Pause, Vollbild an/aus).

Minimieren Sie Firefox anschließend wieder.

Die Lernphase ist beendet. Geben Sie der Versuchsleitung bitte Bescheid, dass Sie fertig sind und warten Sie auf weitere Anweisungen. Bei Fragen können Sie sich an die Versuchsleitung wenden.

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 1
------------------------------	--------------------------------------	--

Fragen zur Schläfrigkeit

Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Welche der folgenden Aussagen trifft am besten auf Ihr derzeitiges Schläfrigkeitsgefühl zu? Bitte kreuzen Sie nur eine Aussage an.	
<input type="checkbox"/>	1 – extrem wach
<input type="checkbox"/>	2 – sehr wach
<input type="checkbox"/>	3 – wach
<input type="checkbox"/>	4 – eher wach
<input type="checkbox"/>	5 – weder wach noch schläfrig
<input type="checkbox"/>	6 – erste Anzeichen von Schläfrigkeit
<input type="checkbox"/>	7 – schläfrig, aber keine Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	8 – schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	9 – extrem schläfrig, große Mühe wach zu bleiben

Visuelle Analogskala

Wie entspannt oder angespannt fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr entspannt	sehr angespannt

Wie schläfrig oder wach fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr schläfrig	sehr wach

Da

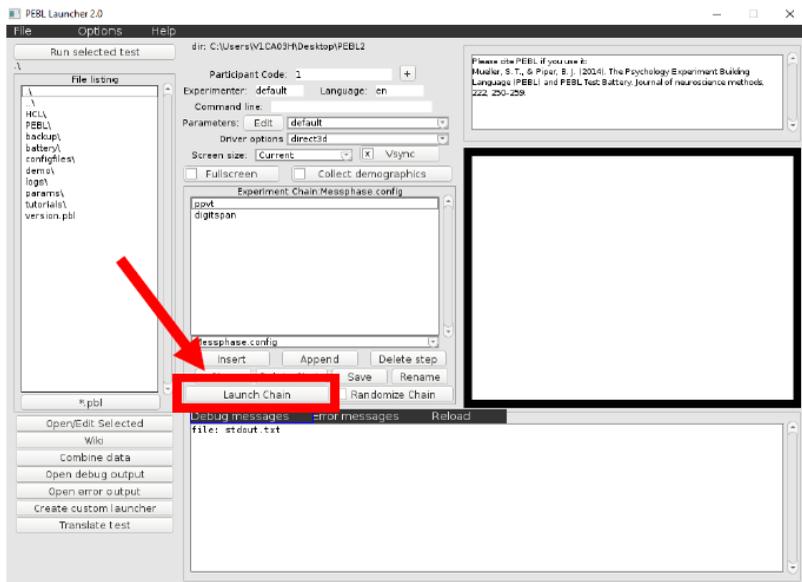
Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
 Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 1
------------------------------	--------------------------------------	--

Bitte beginnen Sie mit der Durchführung der automatisierten Tests auf dem Computer.

Die Tests starten, indem Sie auf „Launch Chain“ in PEBL 2.0 klicken. Folgen Sie anschließend den Aufforderungen auf dem Bildschirm.

Nach Beendigung der zwei Tests fahren Sie bitte mit den Fragebögen fort.



ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 1
------------------------------	--------------------------------------	--

Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)

Im Moment fühle ich mich	überhaupt nicht					sehr
	1	2	3	4	5	
1. zufrieden	<input type="checkbox"/>					
2. ausgeruht	<input type="checkbox"/>					
3. ruhelos	<input type="checkbox"/>					
4. schlecht	<input type="checkbox"/>					
5. schlapp	<input type="checkbox"/>					
6. gelassen	<input type="checkbox"/>					
7. müde	<input type="checkbox"/>					
8. gut	<input type="checkbox"/>					
9. unruhig	<input type="checkbox"/>					
10. munter	<input type="checkbox"/>					
11. unwohl	<input type="checkbox"/>					
12. entspannt	<input type="checkbox"/>					
13. schläfrig	<input type="checkbox"/>					
14. wach	<input type="checkbox"/>					
15. frisch	<input type="checkbox"/>					
16. ermattet	<input type="checkbox"/>					

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probendecode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 1
-----------------------------	--------------------------------------	--

Fragen zur Schläfrigkeit

Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Welche der folgenden Aussagen trifft am besten auf Ihr derzeitiges Schläfrigkeitsgefühl zu? Bitte kreuzen Sie nur eine Aussage an.	
<input type="checkbox"/>	1 – extrem wach
<input type="checkbox"/>	2 – sehr wach
<input type="checkbox"/>	3 – wach
<input type="checkbox"/>	4 – eher wach
<input type="checkbox"/>	5 – weder wach noch schläfrig
<input type="checkbox"/>	6 – erste Anzeichen von Schläfrigkeit
<input type="checkbox"/>	7 – schläfrig, aber keine Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	8 – schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	9 – extrem schläfrig, große Mühe wach zu bleiben

Visuelle Analogskala

Wie entspannt oder angespannt fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr entspannt	sehr angespannt

Wie schläfrig oder wach fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr schläfrig	sehr wach

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. 81): Block 1
------------------------------	--------------------------------------	--

Die erste Versuchsbatterie ist abgeschlossen. Geben Sie der Versuchsleitung bitte Bescheid, dass Sie fertig sind und warten Sie auf weitere Anweisungen.

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z. B. TIAN07):	Versuchstag (z. B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z. B. 01): Block 2
-------------------------------	---------------------------------------	---

Fragen zur Schläfrigkeit

Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Welche der folgenden Aussagen trifft am besten auf Ihr derzeitiges Schläfrigkeitsgefühl zu? Bitte kreuzen Sie nur eine Aussage an.	
<input type="checkbox"/>	1 – extrem wach
<input type="checkbox"/>	2 – sehr wach
<input type="checkbox"/>	3 – wach
<input type="checkbox"/>	4 – eher wach
<input type="checkbox"/>	5 – weder wach noch schläfrig
<input type="checkbox"/>	6 – erste Anzeichen von Schläfrigkeit
<input type="checkbox"/>	7 – schläfrig, aber keine Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	8 – schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	9 – extrem schläfrig, große Mühe wach zu bleiben

Visuelle Analogskala

Wie entspannt oder angespannt fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr entspannt	sehr angespannt

Wie schläfrig oder wach fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr schläfrig	sehr wach

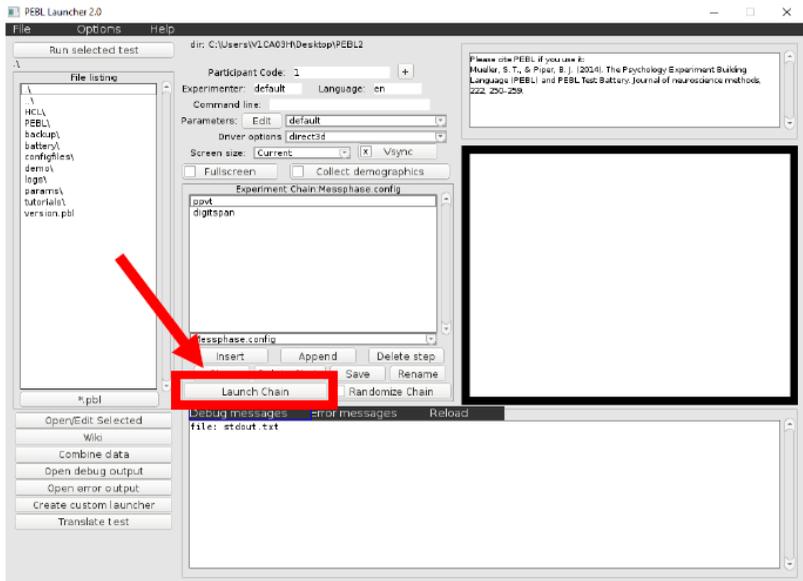
Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
 Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. 81): Block 2
------------------------------	--------------------------------------	--

Bitte beginnen Sie mit der Durchführung der automatisierten Tests auf dem Computer.

Die Tests starten, indem Sie auf „Launch Chain“ in PEBL 2.0 klicken. Folgen Sie anschließend den Aufforderungen auf dem Bildschirm.

Nach Beendigung der zwei Tests fahren Sie bitte mit den Fragebögen fort.



ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 2
------------------------------	--------------------------------------	--

Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)

Im Moment fühle ich mich	überhaupt nicht					sehr
	1	2	3	4	5	
1. zufrieden	<input type="checkbox"/>					
2. ausgeruht	<input type="checkbox"/>					
3. ruhelos	<input type="checkbox"/>					
4. schlecht	<input type="checkbox"/>					
5. schlapp	<input type="checkbox"/>					
6. gelassen	<input type="checkbox"/>					
7. müde	<input type="checkbox"/>					
8. gut	<input type="checkbox"/>					
9. unruhig	<input type="checkbox"/>					
10. munter	<input type="checkbox"/>					
11. unwohl	<input type="checkbox"/>					
12. entspannt	<input type="checkbox"/>					
13. schläfrig	<input type="checkbox"/>					
14. wach	<input type="checkbox"/>					
15. frisch	<input type="checkbox"/>					
16. ermattet	<input type="checkbox"/>					

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 2
------------------------------	--------------------------------------	--

Fragen zu Wirkung und Eigenschaften der Beleuchtung

Wie empfinden Sie die Helligkeit des Stehleuchte?						
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
viel zu dunkel	zu dunkel	etwas zu dunkel	genau richtig	etwas zu hell	zu hell	viel zu hell

Nehmen Sie Blendung durch die Stehleuchte wahr?	
<input type="checkbox"/>	9 - unerträglich
<input type="checkbox"/>	8
<input type="checkbox"/>	7 - störend
<input type="checkbox"/>	6
<input type="checkbox"/>	5 – gerade akzeptabel
<input type="checkbox"/>	4
<input type="checkbox"/>	3 – zufriedenstellend
<input type="checkbox"/>	2
<input type="checkbox"/>	1 – unbemerktbar

Wie empfinden Sie die Lichtfarbe der Stehleuchte?						
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
viel zu kalt	zu kalt	etwas zu kalt	genau richtig	etwas zu warm	zu warm	viel zu warm

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
 Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z. B. TIAN07):	Versuchstag (z. B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z. B. B1): Block 2
-------------------------------	---------------------------------------	---

Wie wirkt das Licht der Stehleuchte auf Sie?						
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
sehr an- genehm	angenehm	etwas an- genehm	neutral	etwas un- angenehm	un- angenehm	sehr un- angenehm
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
sehr gemütlich	gemütlich	etwas gemütlich	neutral	etwas un- gemütlich	un-gemütlich	sehr un- gemütlich
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
sehr aktivierend	aktivierend	etwas aktivierend	neutral	etwas ermüdend	ermüdend	sehr ermüdend

Wie bewerten Sie die Größe der Leuchtfläche der Stehleuchte?						
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
viel zu groß	zu groß	etwas zu groß	genau richtig	etwas zu klein	zu klein	viel zu klein

Wie bewerten Sie die Position der Leuchtfläche der Stehleuchte?						
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
viel zu niedrig	zu niedrig	etwas zu niedrig	genau richtig	etwas zu hoch	zu hoch	viel zu hoch

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 2
------------------------------	--------------------------------------	--

Fragen zur Schläfrigkeit

Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Welche der folgenden Aussagen trifft am besten auf Ihr derzeitiges Schläfrigkeitsgefühl zu? Bitte kreuzen Sie nur eine Aussage an.	
<input type="checkbox"/>	1 – extrem wach
<input type="checkbox"/>	2 – sehr wach
<input type="checkbox"/>	3 – wach
<input type="checkbox"/>	4 – eher wach
<input type="checkbox"/>	5 – weder wach noch schläfrig
<input type="checkbox"/>	6 – erste Anzeichen von Schläfrigkeit
<input type="checkbox"/>	7 – schläfrig, aber keine Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	8 – schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	9 – extrem schläfrig, große Mühe wach zu bleiben

Visuelle Analogskala

Wie entspannt oder angespannt fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr entspannt	sehr angespannt

Wie schläfrig oder wach fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr schläfrig	sehr wach

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 2
------------------------------	--------------------------------------	--

Die zweite Versuchsbatterie ist abgeschlossen. Geben Sie der Versuchsleitung bitte Bescheid, dass Sie fertig sind und warten Sie auf weitere Anweisungen.

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht

Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 3
------------------------------	--------------------------------------	--

Fragen zur Schläfrigkeit

Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Welche der folgenden Aussagen trifft am besten auf Ihr derzeitiges Schläfrigkeitsgefühl zu? Bitte kreuzen Sie nur eine Aussage an.	
<input type="checkbox"/>	1 – extrem wach
<input type="checkbox"/>	2 – sehr wach
<input type="checkbox"/>	3 – wach
<input type="checkbox"/>	4 – eher wach
<input type="checkbox"/>	5 – weder wach noch schläfrig
<input type="checkbox"/>	6 – erste Anzeichen von Schläfrigkeit
<input type="checkbox"/>	7 – schläfrig, aber keine Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	8 – schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	9 – extrem schläfrig, große Mühe wach zu bleiben

Visuelle Analogskala

Wie entspannt oder angespannt fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr entspannt	sehr angespannt

Wie schläfrig oder wach fühlen Sie sich momentan? Bitte setzen Sie ein Kreuz auf der unten gezeigten Skala.	

sehr schläfrig	sehr wach

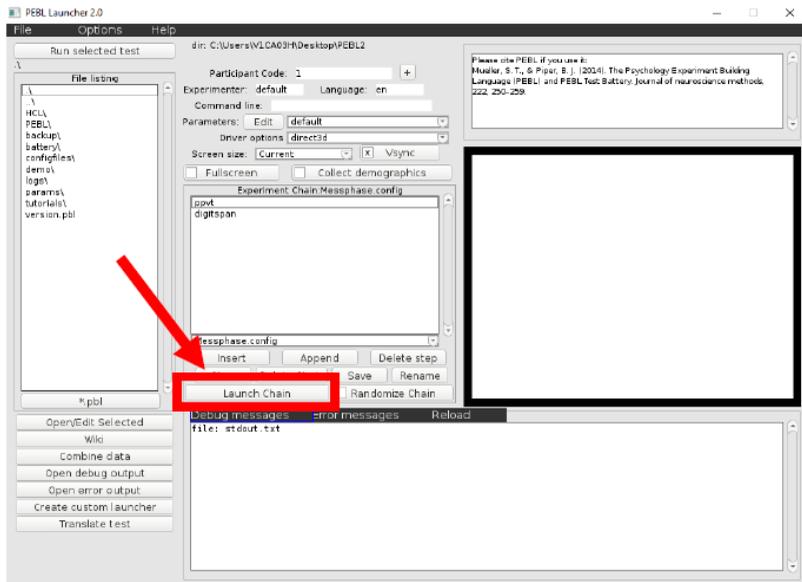
Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
 Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. 83): Block 3
------------------------------	--------------------------------------	--

Bitte beginnen Sie mit der Durchführung der automatisierten Tests auf dem Computer.

Die Tests starten, indem Sie auf „Launch Chain“ in PEBL 2.0 klicken. Folgen Sie anschließend den Aufforderungen auf dem Bildschirm.

Nach Beendigung der zwei Tests fahren Sie bitte mit den Fragebögen fort.



ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 3
------------------------------	--------------------------------------	--

Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)

Im Moment fühle ich mich	überhaupt nicht				sehr
	1	2	3	4	5
1. zufrieden	<input type="checkbox"/>				
2. ausgeruht	<input type="checkbox"/>				
3. ruhelos	<input type="checkbox"/>				
4. schlecht	<input type="checkbox"/>				
5. schlapp	<input type="checkbox"/>				
6. gelassen	<input type="checkbox"/>				
7. müde	<input type="checkbox"/>				
8. gut	<input type="checkbox"/>				
9. unruhig	<input type="checkbox"/>				
10. munter	<input type="checkbox"/>				
11. unwohl	<input type="checkbox"/>				
12. entspannt	<input type="checkbox"/>				
13. schläfrig	<input type="checkbox"/>				
14. wach	<input type="checkbox"/>				
15. frisch	<input type="checkbox"/>				
16. ermattet	<input type="checkbox"/>				

ANHANG

Human Centric Lighting – Probandenstudie zur nicht visuellen Wirkung von Licht
Koordination: Arvid Niemeyer

Probandencode (z.B. TIAN07):	Versuchstag (z.B. baseline): groß	Versuchsbatterie (z.B. B1): Block 3
------------------------------	--------------------------------------	--

Abschlussfragebogen

Hatten Sie das Gefühl durch die Stehleuchte wacher geworden zu sein?		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ja	ein bisschen	nein

Hatten Sie das Gefühl durch die Stehleuchte leistungsfähiger geworden zu sein?		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ja	ein bisschen	nein

Hätten Sie eine höhere Helligkeit der Stehleuchte für einen größeren leistungssteigernden Effekt akzeptiert?		
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ja	ein bisschen	nein

Haben Sie eine allgemeine Anmerkung?		

Die dritte Versuchsbatterie ist abgeschlossen. Geben Sie der Versuchsleitung bitte Bescheid, dass Sie fertig sind und warten Sie auf weitere Anweisungen.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Studie zur Untersuchung der nicht visuellen Lichtwirkung!

Abbildung B.3: Vollständiger Fragebogenkatalog inklusive Anleitung zum Starten der Leistungstests für einen kompletten Versuchsdurchlauf (hier *große Leuchte*)

B.2 ERGÄNZENDE ERGEBNISSE

B.2.1 KSS WERTUNGEN ZU BEGINN UND ENDE EINES MESSBLOCKS

Tabelle B.1: Mittelwert und Standardabweichung der KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messblock und Messzeitpunkt während eines Blocks. Ein höherer Wert bedeutet „müder“.

Messzeitpunkt	Block 1		Block 2		Block 3		alle Blöcke	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Blockanfang (a)	3,41	1,25	4,24	1,57	4,42	1,68	4,02	1,57
Blockende (b)	3,68	1,32	4,18	1,58	4,32	1,55	4,06	1,51

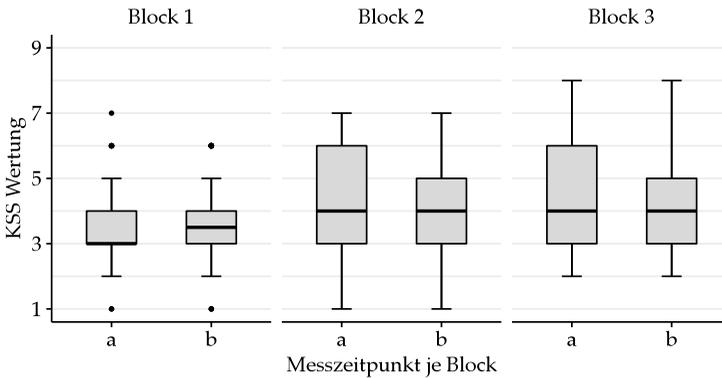


Abbildung B.4: Boxplot der KSS Wertungen pro Messblock und Messzeitpunkt je Block. Ein höherer Wert bedeutet „müder“. Die Länge der Whisker beträgt den 1,5-fachen Interquartilsabstand. Die Punkte sind Ausreißer.

Die inferenzstatistische Untersuchung mittels LMM konnte keinen signifikanten Unterschied zwischen KSS Wertungen feststellen, welche am Anfang oder am Ende eines Messblocks erhoben wurden, $\chi^2(1) = 0,36, p = 0,71$.

B.2.2 SCHLÄFRIG/WACH VAS WERTUNGEN ZU BEGINN UND ENDE EINES MESSBLOCKS

Tabelle B.2: Mittelwert und Standardabweichung der schläfrig/wach VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messblock und Messzeitpunkt während eines Blocks. Ein höherer Wert bedeutet „wacher“.

Messzeitpunkt	Block 1		Block 2		Block 3		alle Blöcke	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Blockanfang (a)	10,40	3,15	8,85	3,44	8,58	3,62	9,28	3,49
Blockende (b)	9,62	3,22	8,94	3,52	8,71	3,47	9,09	3,44

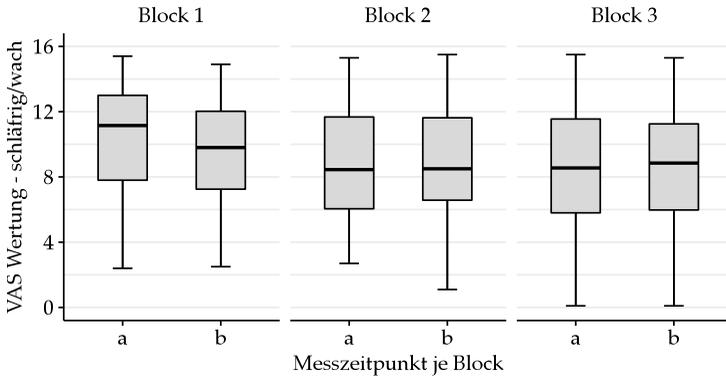


Abbildung B.5: Boxplot der schläfrig/wach VAS Wertungen pro Messblock und Messzeitpunkt je Block. Ein höherer Wert bedeutet „wacher“.

Die inferenzstatistische Untersuchung mittels LMM konnte keinen signifikanten Unterschied zwischen VAS Wertungen feststellen, welche am Anfang oder am Ende eines Messblocks erhoben wurden, $\chi^2(1) = 0,86, p = 0,35$.

B.2.3 ENTSPANNT/UNENTSPANNT VAS WERTUNGEN ZU BEGINN UND ENDE EINES MESSBLOCKS

Tabelle B.3: Mittelwert und Standardabweichung der entspannt/unentspannt VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messblock und Messzeitpunkt während eines Blocks. Ein höherer Wert bedeutet „unentspannter“.

Messzeitpunkt	Block 1		Block 2		Block 3		alle Blöcke	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Blockanfang (a)	3,92	2,71	2,88	2,42	2,97	2,58	3,25	2,61
Blockende (b)	4,31	2,82	3,45	2,54	3,22	2,59	3,66	2,69

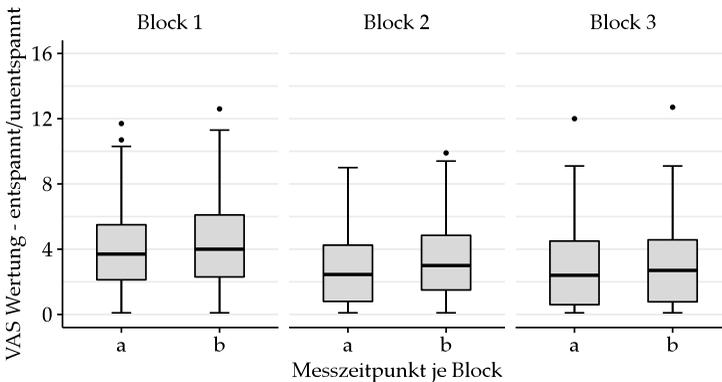


Abbildung B.6: Boxplot der entspannt/unentspannt VAS Wertungen pro Messblock und Messzeitpunkt je Block. Ein höherer Wert bedeutet „unentspannter“.

Mittels Kontrastanalyse konnte festgestellt werden, dass der zu Beginn eines Messblocks ermittelte entspannt/unentspannt VAS Wert signifikant geringer ausfällt, als am Ende eines Messblocks, $b = -0,29$, $t(31) = -2,48$, $p = 0,02$, $r = 0,40$. Dies deutet darauf hin, dass die ausgewählten Leistungstests unentspannend auf die Probanden wirkten.

B.2.4 WEITERE KSS ERGEBNISSE

Tabelle B.4: Mittelwerte und Standardabweichungen der gemittelten KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Block 1	3,41	1,09	3,59	1,24	3,64	1,51	3,55	1,29
Block 2	5,02	1,42	3,64	1,40	3,97	1,56	4,21	1,57
Block 3	5,00	1,54	4,03	1,61	4,08	1,52	4,37	1,62
Blöcke gesamt	4,47	1,56	3,76	1,43	3,90	1,53		

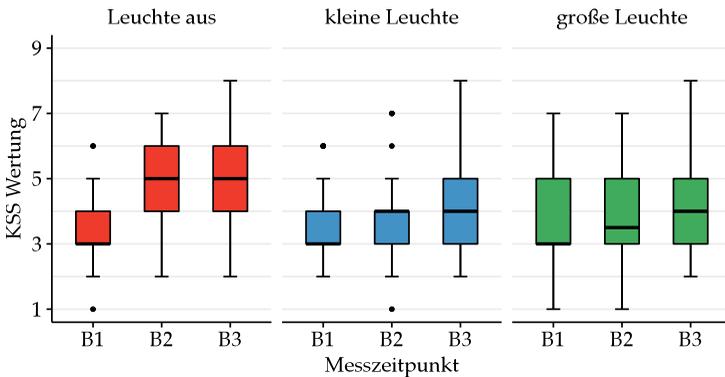


Abbildung B.7: Boxplot der KSS Wertungen pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto geringer fällt die Wertung aus.

B.2.5 WEITERE SCHLÄFRIG/WACH VAS ERGEBNISSE

Tabelle B.5: Mittelwerte und Standardabweichungen der schläfrig/wach VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Block 1	10,22	2,95	10,04	3,20	9,75	3,46	10,01	3,20
Block 2	7,37	3,07	9,81	3,41	9,50	3,56	8,90	3,51
Block 3	9,28	3,26	9,28	3,29	9,17	3,80	8,65	3,54
Blöcke gesamt	8,36	3,35	9,71	3,30	9,48	3,60		

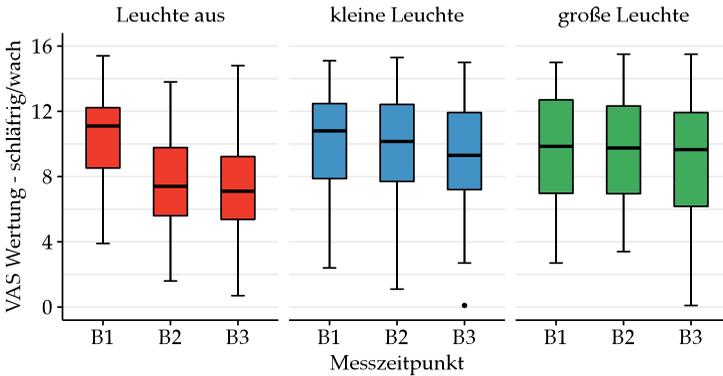


Abbildung B.8: Boxplot der schläfrig/wach VAS Wertungen pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

B.2.6 WEITERE ENTSPANNT/UNENTSPANNT VAS ERGEBNISSE

Tabelle B.6: Mittelwerte und Standardabweichungen der entspann/unentspannt VAS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Ein höherer Wert bedeutet „unentspannter“.

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Block 1	3,98	3,10	4,34	2,84	4,02	2,34	4,11	2,77
Block 2	3,02	2,48	3,50	2,71	2,98	2,26	3,17	2,49
Block 3	3,08	2,77	3,31	2,86	2,89	2,05	3,09	2,58
Blöcke gesamt	3,36	2,82	3,71	2,82	3,29	2,27		

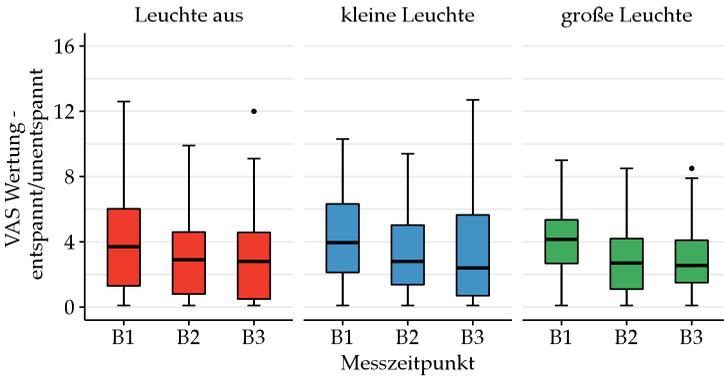


Abbildung B.9: Boxplot der entspannt/unentspannt VAS Wertungen pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je entspannter, desto niedriger fällt die Wertung aus.

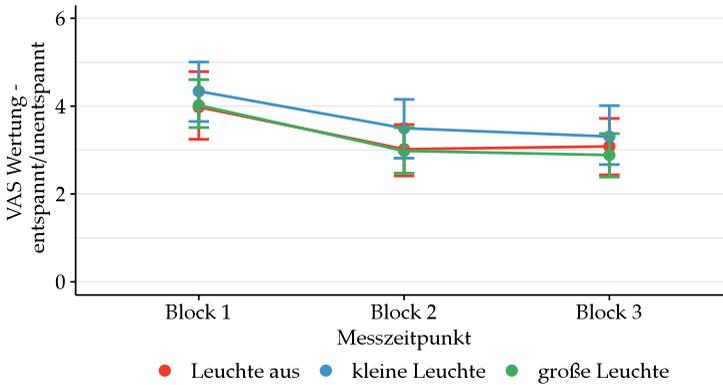


Abbildung B.10: Mittlere VAS Wertungen (entspannt/unentspannt) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je entspannter, desto höher niedriger fällt die Wertung aus.

Die inferenzstatistische Analyse mittels LMM zeigte einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Messzeitpunkt auf die entspannt/unentspannt VAS Wertung, $\chi^2(2) = 28,03, p < 0,001$. Der Haupteffekt Lichtszenario, $\chi^2(2) = 4,80, p = 0,09$, sowie die Interaktion zwischen Messzeitpunkt und Lichtszenario sind nicht signifikant, $\chi^2(2) = 0,42, p = 0,98$. Hinsichtlich des Messzeitpunkts konnte durch die Kontrastanalyse ein signifikanter Unterschied zwischen den Wertungen vor und nach der monotonen Nebenaufgabe nachgewiesen werden, $b = 0,33, t(62) = 5,49, p < 0,001$. Die Effektgröße stellt mit $r = 0,57$ einen großen Effekt dar, welcher sich mit der entspannenden Wirkung der monotonen Nebenaufgabe erklären lässt. Weitere signifikante Unterschiede konnten nicht beobachtet werden.

B.2.7 WEITERE MDBF ERGEBNISSE (GUTE/SCHLECHTE STIMMUNG)

Tabelle B.7: Mittelwerte und Standardabweichungen der MDBF Kategorie „gute/schlechte Stimmung“ in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je besser die Stimmung, desto höher fällt die Wertung aus.

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Block 1	16,88	2,08	16,59	2,34	16,75	2,63	16,74	2,34
Block 2	16,88	2,43	17,31	1,93	16,94	2,17	17,04	2,17
Block 3	16,88	2,39	17,19	1,87	17,19	1,89	17,08	2,05
Blöcke gesamt	16,88	2,28	17,03	2,06	16,96	2,23		

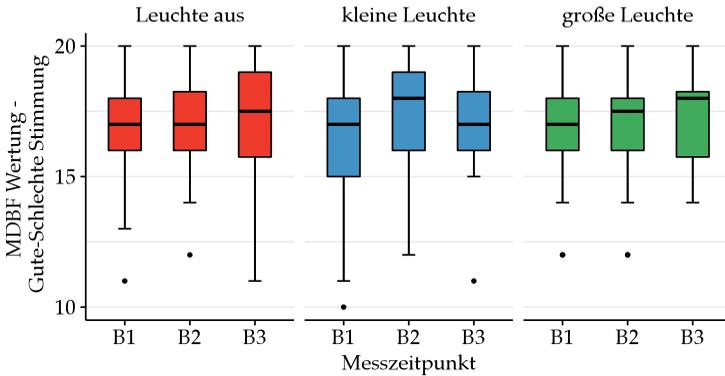


Abbildung B.11: Boxplot der MDBF Wertungen (Kategorie „gute/schlechte Stimmung“) pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je besser die Stimmung, desto höher fällt die Wertung aus.

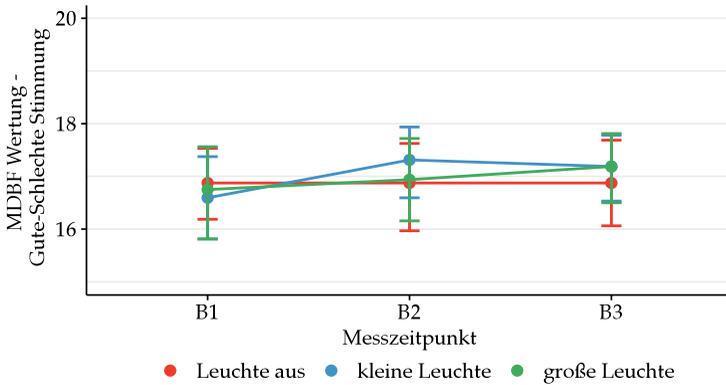


Abbildung B.12: Mittlere MDBF Wertungen (Kategorie „gute/schlechte Stimmung“) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je besser die Stimmung, desto höher fällt die Wertung aus.

Bei der inferenzstatistischen Untersuchung der Kategorie „gute/schlechte Stimmung“ des MDBF konnte weder für die Haupteffekte Messzeitpunkt, $\chi^2(2) = 3,54, p = 0,17$, oder Lichtszenario, $\chi^2(2) = 0,62, p = 0,73$, noch für die Interaktion der beiden Haupteffekte, $\chi^2(4) = 3,06, p = 0,55$, ein signifikanter Effekt nachgewiesen werden.

B.2.8 WEITERE MDBF ERGEBNISSE (RUHE/UNRUHE)

Tabelle B.8: Mittelwerte und Standardabweichungen der MDBF Kategorie „Ruhe/Unruhe“ in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je ruhiger, desto höher fällt die Wertung aus.

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Block 1	15,81	2,86	15,19	2,80	15,84	2,44	15,61	2,69
Block 2	16,12	2,18	16,28	2,52	16,69	2,09	16,36	2,26
Block 3	16,25	2,71	16,75	2,40	16,72	2,11	16,57	2,41
Blöcke gesamt	16,06	2,58	16,07	2,63	16,42	2,23		

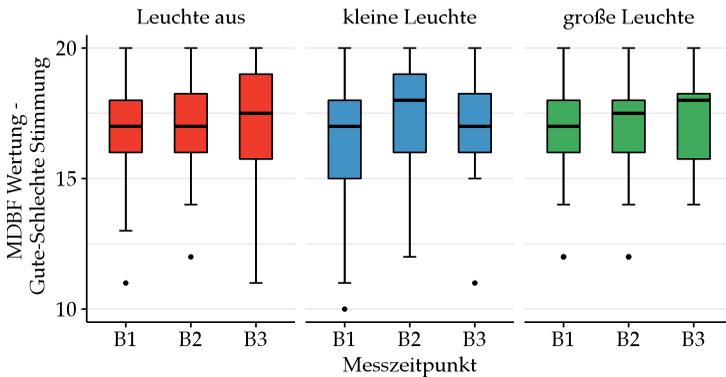


Abbildung B.13: Boxplot der MDBF Wertungen (Kategorie „Ruhe/Unruhe“) pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je ruhiger, desto höher fällt die Wertung aus.

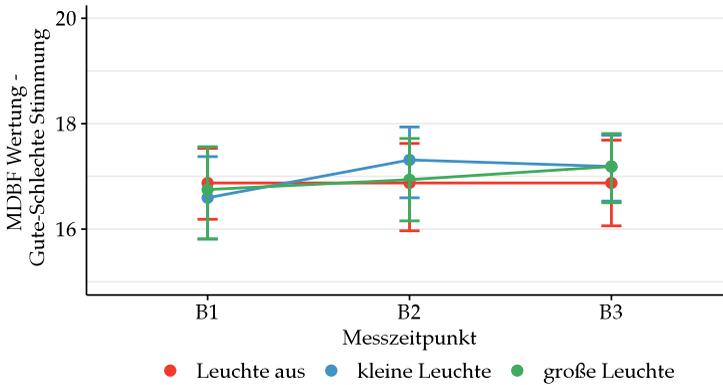


Abbildung B.14: Mittlere MDBF Wertungen (Kategorie „Ruhe/Unruhe“) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je ruhiger, desto höher fällt die Wertung aus.

Bei der inferenzstatistischen Untersuchung der Kategorie „Ruhe-Unruhe“ des MDBF konnte ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Messzeitpunkt beobachtet werden, $\chi^2(2) = 18,09, p < 0,001$. Der Haupteffekt Lichtszenario und die Interaktion zeigten keine signifikanten Unterschiede, $\chi^2(2) = 3,01, p = 0,22$ bzw. $\chi^2(4) = 4,47, p = 0,34$. Die anschließende Untersuchung mittels hypothesengeleiteter Kontraste zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den MDBF Wertungen nach und vor der monotonen Nebenaufgabe, $b = -0,75, t(62) = -3,22, p = 0,002$. Die Größe des Effekts liegt bei $r = 0,38$ und stellt somit einen mittleren Effekt dar, welcher sich vermutlich auf die beruhigende Wirkung der Nebenaufgabe zurückführen lässt. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Messzeitpunkten nach der monotonen Nebenaufgabe konnte nicht festgestellt werden.

B.2.9 WEITERE MDBF ERGEBNISSE (WACHHEIT/MÜDIGKEIT)

Tabelle B.9: Mittelwerte und Standardabweichungen der MDBF Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“ in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Block 1	29,66	5,57	29,90	6,10	28,97	6,94	29,51	6,17
Block 2	25,31	5,82	29,59	6,40	28,94	5,97	27,95	6,30
Block 3	25,62	6,06	29,50	6,00	29,12	6,22	28,08	6,26
Blöcke gesamt	26,86	6,09	29,67	6,09	29,01	6,32		

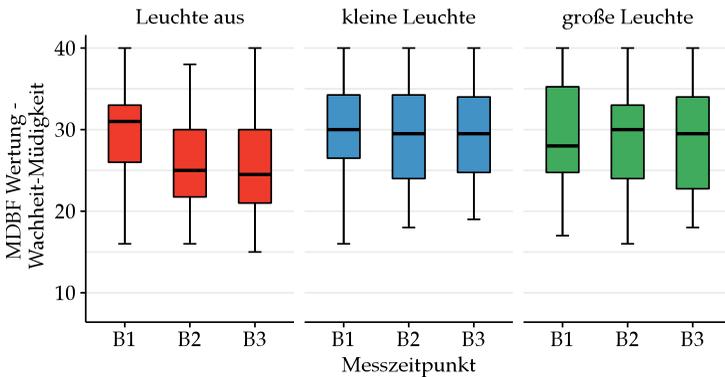


Abbildung B.15: Boxplot der MDBF Wertungen (Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“) pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

B.2.10 WEITERE PVT ERGEBNISSE

Tabelle B.10: Mittelwerte und Standardabweichungen der PVT Reaktionszeiten in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Werte sind in ms angegeben.

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Block 1	340,52	50,25	340,28	52,27	338,89	53,33	339,90	51,96
Block 2	348,26	52,44	342,46	51,68	344,41	52,95	345,01	52,39
Block 3	348,44	51,85	343,73	51,79	339,03	53,26	343,75	52,42
Blöcke gesamt	345,73	51,63	342,15	51,92	340,78	53,23		

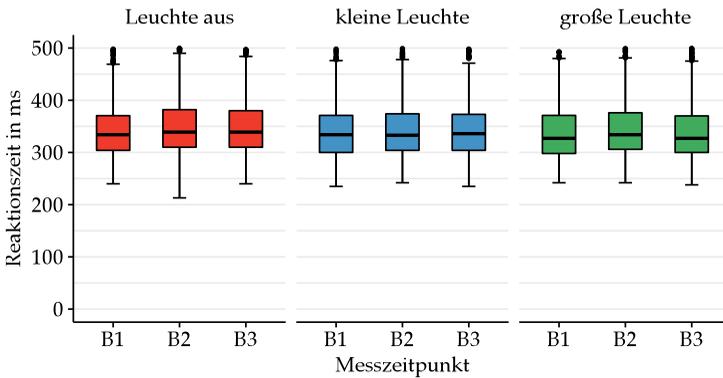


Abbildung B.16: Boxplots der PVT Reaktionszeiten in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

B.2.11 WEITERE FDST ERGEBNISSE (MAXIMALE PUNKTZAHL)

Nachfolgend werden die Ergebnisse der zweiten Methode zur Auswertung der FDST Gedächtnisleistung präsentiert. Basierend auf der Millerschen Zahl (vgl. [231]), welche besagt, dass ein Mensch gleichzeitig nur fünf bis neun Informationseinheiten im Kurzzeitgedächtnis behalten kann, wird die Anzahl der richtig wiedergegebenen Zahlenfolgen ab einer Länge von fünf Ziffern analysiert. Bei zwei Versuchen pro Schwierigkeitsgrad können maximal zehn Zahlenfolgen richtig wiedergegeben werden, sodass die maximal erreichbare Punktzahl bei zehn liegt. Tabelle B.11 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der erreichten FDST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario.

Tabelle B.11: Mittelwerte und Standardabweichungen der FDST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je ruhiger, desto höher fällt die Wertung aus.

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Block 1	5,59	1,56	5,31	2,16	5,72	2,23	5,54	1,99
Block 2	5,66	1,93	6,25	1,90	6,31	1,96	6,07	1,93
Block 3	6,38	1,54	6,28	1,42	6,50	1,87	6,39	1,61
Blöcke gesamt	5,88	1,71	5,95	1,89	6,18	2,03	/	/

In Abbildung B.17 sind die FDST Punktzahlen als Boxplot dargestellt, während der vom Lichtszenario abhängige Verlauf der mittleren Punktzahl eines Versuchstages in Abbildung B.18 visualisiert wird.

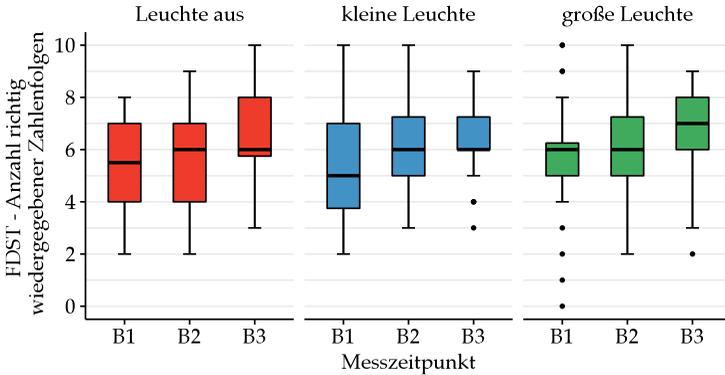


Abbildung B.17: Boxplots der FDST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

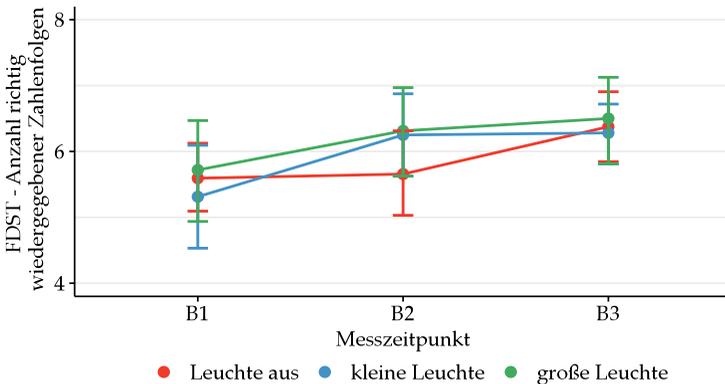


Abbildung B.18: Mittelwerte der FDST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken repräsentieren das 95% Konfidenzintervall.

Mittels LMM Analyse konnte ein signifikanter Einfluss des Hauptfaktors Messzeitpunkt auf die FDST Punktzahl beobachtet werden,

$\chi^2(2) = 15,17, p < 0,001$. Der Hauptfaktor Lichtszenario hatte keinen signifikanten Einfluss, $\chi^2(2) = 2,15, p = 0,34$. Gleiches gilt für die Interaktion aus Messzeitpunkt und Lichtszenario, $\chi^2(4) = 3,26, p = 0,52$. Die Untersuchung mit Hilfe der hypothesengeleiteten Kontraste zeigte, dass sich die Probanden beim ersten Messzeitpunkt signifikant weniger merken konnte, als während des zweiten Messzeitpunkts, $b = -0,53, t(62) = -2,45, p = 0,02, r = 0,30$. Vom zweiten zum dritten Messzeitpunkt stieg die Gedächtnisleistung jedoch nicht signifikant, $b = 0,31, t(62) = 1,44, p = 0,16$.

B.2.12 WEITERE FDST ERGEBNISSE (LÄNGSTE ZAHLENFOLGE)

Tabelle B.12: Mittlere Länge und Standardabweichungen der längsten richtig wiedergegebenen FDST Zahlenfolge in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario.

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Block 1	7,31	0,90	7,34	1,26	7,25	1,24	7,30	1,13
Block 2	7,47	1,22	7,62	1,04	7,62	1,04	7,57	1,09
Block 3	7,88	0,91	7,75	0,95	7,81	1,00	7,81	0,94
Blöcke gesamt	7,55	1,03	7,57	1,09	7,56	1,11		

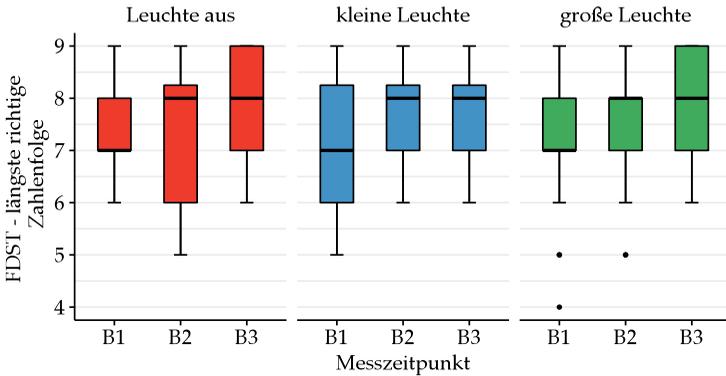


Abbildung B.19: Boxplots der längsten, richtig wiedergegebenen FDST Zahlenfolgen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

B.2.13 WEITERE ERGEBNISSE ZUR LICHTQUALITÄT

Tabelle B.13: Antwort auf die Frage „Wie empfinden Sie die Helligkeit der Stehleuchte?“

Antwort	Häufigkeit kleine Leuchte		Häufigkeit große Leuchte	
	absolut	relativ	absolut	relativ
viel zu dunkel	0	0,00%	0	0,00%
zu dunkel	2	6,67%	2	6,25%
etwas zu dunkel	3	10,00%	4	12,50%
genau richtig	7	23,33%	14	43,75%
etwas zu hell	13	43,33%	8	25,00%
zu hell	5	16,67%	4	12,50%
viel zu hell	0	0,00%	0	0,00%
<i>gesamt</i>	30	100,00%	32	100,00%

Tabelle B.14: Antwort auf die Frage „Wie empfinden Sie die Lichtfarbe der Stehleuchte?“

Antwort	Häufigkeit kleine Leuchte		Häufigkeit große Leuchte	
	absolut	relativ	absolut	relativ
viel zu kalt	1	3,23%	1	3,13%
zu kalt	4	12,90%	4	12,50%
etwas zu kalt	11	35,48%	11	34,38%
genau richtig	14	45,16%	14	43,75%
etwas zu warm	1	3,23%	2	6,25%
zu warm	0	0,00%	0	0,00%
viel zu warm	0	0,00%	0	0,00%
<i>gesamt</i>	31	100,00%	32	100,00%

ANHANG

Tabelle B.15: Antwort auf die Frage „Wie wirkt das Licht der stehleuchte auf Sie?“ (angenehm/unangenehm)

Antwort	Häufigkeit kleine Leuchte		Häufigkeit große Leuchte	
	absolut	relativ	absolut	relativ
sehr angenehm	1	3,33%	0	0,00%
angenehm	5	16,67%	5	16,13%
etwas angenehm	3	10,00%	8	25,81%
neutral	6	20,00%	10	32,26%
etwas unangenehm	10	33,55%	7	22,58%
unangenehm	5	16,67%	1	3,23%
sehr unangenehm	0	0,00%	0	0,00%
<i>gesamt</i>	30	100,00%	31	100,00%

Tabelle B.16: Antwort auf die Frage „Wie wirkt das Licht der stehleuchte auf Sie?“ (gemütlich/ungemütlich)

Antwort	Häufigkeit kleine Leuchte		Häufigkeit große Leuchte	
	absolut	relativ	absolut	relativ
sehr gemütlich	1	3,33%	0	0,00%
gemütlich	1	3,33%	1	3,23%
etwas gemütlich	1	3,33%	5	16,13%
neutral	6	20,00%	5	16,13%
etwas ungemütlich	14	46,67%	16	51,61%
ungemütlich	6	20,00%	4	12,90%
sehr ungemütlich	1	3,33%	0	0,00%
<i>gesamt</i>	30	100,00%	31	100,00%

ANHANG

Tabelle B.17: Antwort auf die Frage „Wie wirkt das Licht der stehleuchte auf Sie?“ (aktivierend/ermüdend)

Antwort	Häufigkeit kleine Leuchte		Häufigkeit große Leuchte	
	absolut	relativ	absolut	relativ
sehr aktivierend	1	3,33%	1	3,23%
aktivierend	5	16,67%	5	16,13%
etwas aktivierend	12	40,00%	16	51,61%
neutral	11	36,67%	6	19,35%
etwas ermüdend	1	3,33%	3	9,68%
ermüdend	0	0,00%	0	0,00%
sehr ermüdend	0	0,00%	0	0,00%
<i>gesamt</i>	30	100,00%	31	100,00%

Tabelle B.18: Antwort auf die Frage „Wie bewerten Sie die Größe der Stehleuchte?“

Antwort	Häufigkeit kleine Leuchte		Häufigkeit große Leuchte	
	absolut	relativ	absolut	relativ
viel zu groß	0	0,00%	0	0,00%
zu groß	0	0,00%	1	3,23%
etwas zu groß	0	0,00%	6	19,35%
genau richtig	9	29,03%	17	54,84%
etwas zu klein	14	45,16%	5	16,13%
zu klein	7	22,58%	2	6,45%
viel zu klein	1	3,23%	0	0,00%
<i>gesamt</i>	31	100,00%	31	100,00%

Tabelle B.19: Antwort auf die Frage „Wie bewerten Sie die Position der Stehleuchte?“

Antwort	Häufigkeit kleine Leuchte		Häufigkeit große Leuchte	
	absolut	relativ	absolut	relativ
viel zu niedrig	1	3,23%	0	0,00%
zu niedrig	5	16,13%	5	16,13%
etwas zu niedrig	11	35,48%	10	32,26%
genau richtig	10	32,26%	13	41,94%
etwas zu hoch	2	6,45%	3	9,68%
zu hoch	2	6,45%	0	0,00%
viel zu hoch	0	0,00%	0	0,00%
<i>gesamt</i>	31	100,00%	31	100,00%

Anhang C: ERGÄNZUNGEN ZUR ZWEITEN PROBANDENSTUDIE

C.1 KSS WERTUNGEN ZU BEGINN UND ENDE EINES MESSBLOCKS

Tabelle C.20: Mittelwerte und Standardabweichungen der KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messblock und Messzeitpunkt während eines Blocks. Ein höherer Wert bedeutet „müder“.

Messzeitpunkt	Block 1		Block 2		alle Blöcke	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Blockanfang (a)	6,25	1,77	5,89	1,86	6,07	1,81
Blockende (b)	6,43	1,64	6,25	1,65	6,33	1,64

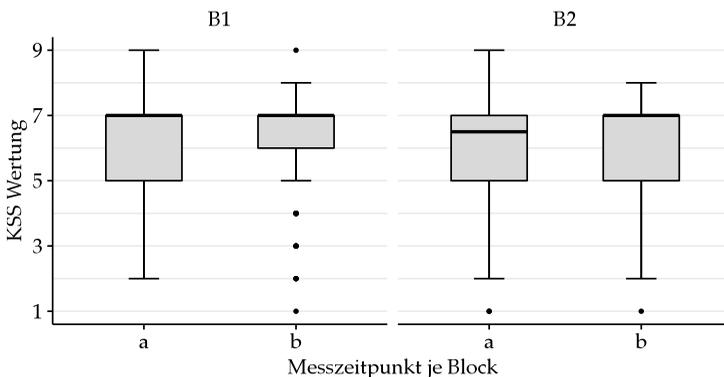


Abbildung C.20: Boxplot der KSS Wertungen pro Messblock und Messzeitpunkt je Block. Ein höherer Wert bedeutet „müder“.

Die inferenzstatistische Untersuchung mittels LMM konnte keinen signifikanten Unterschied zwischen KSS Wertungen feststellen, welche am Anfang oder am Ende eines Messblocks erhoben wurden, $\chi^2(1) = 2,66, p = 0,10$.

C.2 WEITERE KSS ERGEBNISSE

Tabelle C.21: Mittelwerte und Standardabweichungen der KSS Wertungen in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Block 1	6,04	1,65	6,70	1,69	6,28	1,73	6,34	1,70
Block 2	5,41	1,73	6,39	1,78	6,41	1,61	6,07	1,76
Blöcke gesamt	5,72	1,71	6,55	1,74	6,34	1,66		

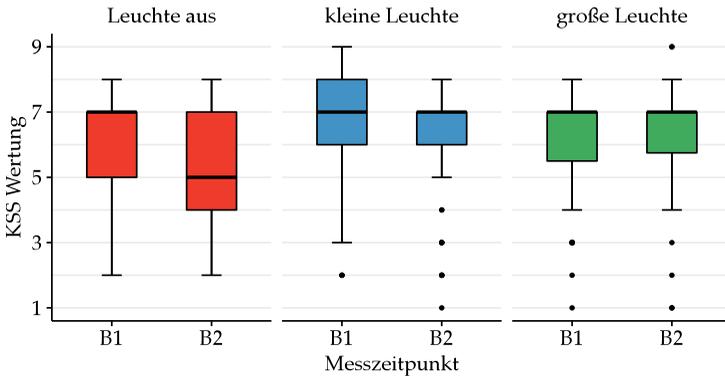


Abbildung C.21: Boxplots der KSS Wertungen pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto geringer fällt die Wertung aus.

C.3 WEITERE CST ERGEBNISSE

Tabelle C.22: Mittelwerte und Standardabweichungen der CST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Block 1	8,47	2,39	8,30	2,49	7,90	2,52	8,22	2,45
Block 2	8,77	2,16	8,90	1,65	8,77	2,18	8,81	1,99
Blöcke gesamt	8,62	2,26	8,60	2,12	8,33	2,38	/	/

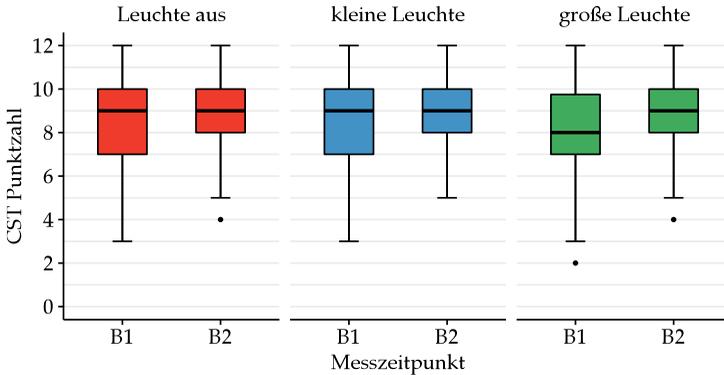


Abbildung C.22: Boxplots der CST Punktzahl in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

C.4 WEITERE D-2R TEST ERGEBNISSE

Tabelle C.23: Mittelwerte und Standardabweichungen der Konzentrationsleistung in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

Messzeitpunkt	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Block 1	104,00	9,87	102,97	11,53	101,78	8,81	102,91	10,06
Block 2	107,84	10,11	108,84	10,23	107,75	9,78	108,15	9,95
Blöcke gesamt	105,91	10,10	105,91	11,21	104,77	9,71		

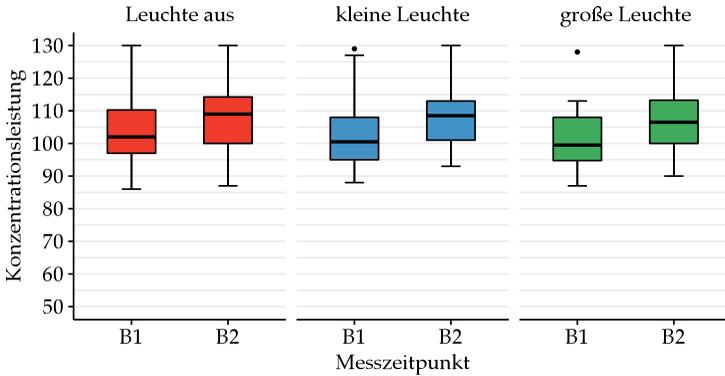


Abbildung C.23: Boxplots der Konzentrationsleistung in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario

Anhang D: ERGÄNZUNGEN ZUR DRITTEN PROBANDENSTUDIE

D.1 SPEKTRALE VERMESSUNG

Nachfolgend sind die lichttechnischen Eigenschaften der in der dritten Studie verwendeten Lichtquellen zu sehen (Tabelle D.17 und Abbildung D.24). Aufgrund der geringen Bestrahlungsstärke der Nachttischleuchte konnten mit Hilfe des verwendeten Spektrometers keine wellenlängenspezifischen Datenpunkte gemessen werden, sodass die Daten abseits der Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur fehlen. Da die Beleuchtungsstärke der Nachttischleuchte jedoch circa halb so groß ausfiel wie in den anderen beiden Studien und es sich um ein und dieselbe Leuchte handelt, ist zu erwarten, dass die fehlenden Werte ebenfalls circa halb so groß wie die Werte aus den Vorgängerstudien sind.

Tabelle D.24: Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur, photopigmentspezifische Bestrahlungsstärke & m-EDI der im Fahrsimulator verwendeten Lichtquellen (nach [226])

Größe	Einheit	Lichtquelle		
		Nachttischlampe	kleine Leuchte	große Leuchte
Beleuchtungsstärke	lx	5,35	200,54	201,73
Farbtemperatur	K	2178	6463	6579
<i>S-cone-opic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	-	147,92	166,51
<i>M-cone-opic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	-	290,10	289,98
<i>L-cone-opic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	-	323,45	328,52
<i>Rhodopic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	-	281,67	288,06
<i>Melanopic irradiance</i>	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	-	256,84	267,98

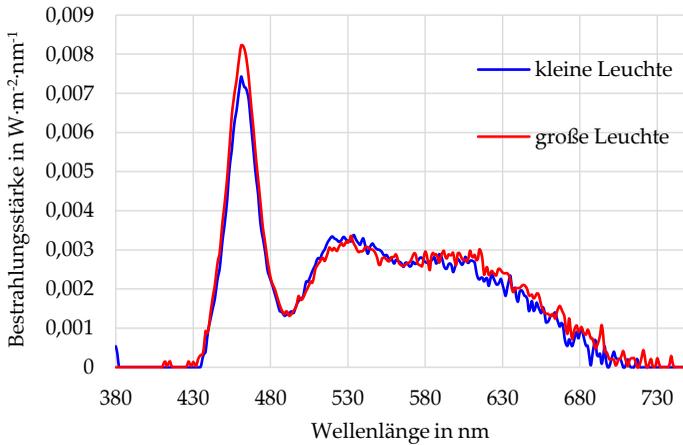


Abbildung D.24: Spektraldiagramm der im Fahrsimulator verwendeten Studienleuchten (Nachttischlampe, kleine Leuchte, große Leuchte)

D.2 VORGABEN AN DIE PROBANDEN

Lieber Testfahrer,

nachfolgend finden Sie einige Informationen und Vorgaben zum Ablauf der Probandenstudie.

Ziel der Studie

Im Rahmen der Studie wird die Auswirkung eines neuen Lichtkonzeptes auf den Zustand und auf die Leistung geprüft. Hierfür werden Sie als Testfahrer an drei Terminen morgens in der Fahrsimulation fahren und verschiedene Aufgaben bearbeiten. Der Ablauf ist an allen drei Frühterminen gleich, der einzige Unterschied ist die Beleuchtung. Dazu kommt ein kurzer Einführungstermin, der tagsüber stattfindet. An diesem Termin lernen Sie die verschiedenen Aufgaben kennen und Sie können sich mit der Fahrsimulation vertraut machen.

Um sicherstellen zu können, dass etwaige Unterschiede zwischen den Tagen tatsächlich auf das Licht zurück zu führen sind, sollen Sie an den Tagen direkt vor den Versuchsterminen einen möglichst regelmäßigen Tagesablauf einhalten. Außerdem ist es wichtig, dass Sie an den Versuchsterminen **keine Brille** tragen. **Kontaktlinsen** sind dagegen kein Problem.

Ablauf der Studie

Die Studie besteht aus vier Terminen:

Ein kurzer Einführungstermin der tagsüber stattfindet. Die Dauer ist ca. 30 Minuten. An dem Termin lernen Sie in die Aufgaben lernen und können sich mit der Fahrsimulation vertraut machen.

Drei längere Frühtermine: Beginn bei diesen Terminen ist immer um 6:00 Uhr morgens. Die Dauer ist jeweils ca. 3 Stunden. Während der Termine bearbeiten Sie mehrfach verschiedenen Leistungstests, außerdem fahren Sie in der Fahrsimulation.

Zusätzlich bitten wir Sie jeweils an den beiden Tagen vor den Frühterminen einen Fragebogen zu Ihrem Tagesablauf auszufüllen. Sie können das **Tagebuch an den insgesamt 6 Tagen** online über einen Link ausfüllen. Der Fragebogen dauert jeweils maximal 10 Minuten. Der Fragebogen ist ähnlich wie die Vorabbefragung als Online-Fragebogen verfügbar. Falls es Ihnen lieber ist, können Sie den Fragebogen von uns auch in einer Papierversion erhalten, die Sie dann bitte ausgefüllt zu den Versuchsterminen mitbringen.

Insgesamt beträgt die Versuchsdauer am WIVW somit ca. 9.5 Stunden. Die **Frühtermine** beginnen immer um **6:00 Uhr morgens**. Bitte versuchen Sie pünktlich - am besten fünf vor 6:00 Uhr - am WIVW zu sein. Bitte setzen Sie an diesen Tagen sobald Sie das Haus verlassen eine **Sonnenbrille** auf. Bitte tun Sie das auch dann, wenn es noch nicht ganz hell ist oder das Wetter schlecht sein sollte.

Der Versuch findet in der **XXX Str. XX in XXXXX** statt. Das ist ca. 400 Meter von unserem Hauptgebäude entfernt. An den Tagen mit den Frühterminen kommen Sie mit dem **Taxi** ans WIVW und Sie werden auch wieder mit dem Taxi nach Hause gebracht. Die Kosten für das Taxi werden vom WIVW getragen. Bei ihrer Ankunft erhalten sie ein Taxigutschein für diese Fahrt sowie einen weiteren für die Rückfahrt am Abend. Bitte fahren Sie mit dem Taxi rechtzeitig los, so dass Sie pünktlich am WIVW sind.

Bitte gehen Sie am **Abend vor den Frühterminen** so gegen **23:00 Uhr zu Bett**. Stehen Sie dann morgens gegen 5:00 Uhr auf, so dass Sie pünktlich gegen 6:00 Uhr am WIVW sein können. Am einfachsten ist es, wenn Sie das Taxi, dass Sie ans WIVW bringen wird, bereits am Vorabend bestellen. Die Telefonnummer ist: xxxx-xxxxx.

Falls Sie möchten, können Sie vor den Frühterminen gerne zu Hause **frühstücken**. Bitte nehmen Sie an diesen Terminen aber **keine koffeinhaltigen** oder anderweitig aktivierenden Nahrungsmittel zu sich. Trinken Sie also **keinen Kaffee, keinen schwarzen Tee, keine Cola** und essen Sie bitte auch **keine Schokolade**.

Außerdem bitten wir Sie jeweils an zwei Tagen direkt vor den Frühterminen soweit möglich die folgenden Punkte zu beachten:

Bitte halten Sie einen möglichst **regelmäßigen Tagesablauf** ein. Hierbei ist insbesondere wichtig, dass Sie möglichst jeden Tag zu ähnlichen Zeiten ins Bett gehen und aufstehen. Vermeiden Sie nach Möglichkeit Nickerchen während des Tages. Bitte nehmen Sie **keine Medikamente** ein. Über die Einnahme dringend benötigter

Medikamente bitten wir Sie, uns zu informieren. Bitte nehmen Sie **keine Drogen** zu sich.

Alle Frühtermine haben denselben Aufbau:

- Vorbefragung
- Dunkelgewöhnung: Damit sich Ihr Körper an die Dunkelheit gewöhnt, verbringen Sie ca. 30 Minuten in einem fast vollständig abgedunkelten Raum.
- Bearbeiten verschiedener Leistungstests: Mehrmals pro Termin bearbeiten verschiedene Leistungstests. Die Aufgaben lernen Sie im Einführungstermin kennen.
- Fahrten in der Fahrsimulation: Pro Termin fahren Sie mehrfach eine monotone Autobahnstrecke im Simulator.
- Befragungen während des Versuchs: Mehrfach beantworten Sie während des Versuchs Fragen zu Ihrem aktuellen Zustand, z.B. wie müde Sie gerade sind.
- Nach Abschluss des Versuchs werden Sie dann mit dem Taxi nach Hause gebracht.

Zusätzlich zu Ihrem Verhalten während der Versuchsfahrten und zu den Leistungstests wird noch ein physiologisches Maß bestimmt, das Rückschlüsse auf Ihre Wachheit zulässt, der **Melatoninspiegel**. Melatonin ist ein Hormon, dessen Konzentration sich im Verlauf eines

Tages ändert (nachts höher als tagsüber) und das in Zusammenhang mit Müdigkeit steht. Während der Zeit, die Sie am WIVW verbringen, werden Sie wiederholt Speichelproben abgeben (insgesamt 7 pro Frühtermin). Diese werden anonymisiert an ein Labor geschickt, das dann den Melatoninspiegel im Speichel bestimmt. Für die Speichelproben erhalten Sie ein verschließbares Plastikröhrchen, in dem sich ein Stück Watte befindet. Für die Probe nehmen Sie das Wattestück in den Mund und kauen dann ca. 2 Minuten darauf herum. Anschließend kommt das Wattestück wieder in das Plastikröhrchen, das verschlossen wird. Die Prozedur ist vollkommen ungefährlich und schmerzfrei.

Um sicherzustellen, dass bei der Abgabe der Melatoninproben keine erhöhte Ansteckungsgefahr besteht, haben wir für die Studie ein spezielles Hygienekonzept erstellt.

D.3 ERGÄNZENDE ERGEBNISSE

D.3.1 WEITERE KSS ERGEBNISSE

Tabelle D.25: Mittelwerte und Standardabweichungen der KSS Wertungen in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario. Ein höherer Wert bedeutet „müder“.

Uhrzeit	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
06:30	4,41	1,73	4,94	2,01	5,18	1,81	4,84	1,85
06:55	4,24	1,48	4,53	1,74	4,65	1,37	4,47	1,51
07:23	5,71	1,86	5,53	1,50	5,47	1,77	5,57	1,69
07:45	5,47	1,94	5,53	1,62	5,35	1,46	5,45	1,65
08:08	5,59	2,27	5,65	1,69	6,06	1,60	5,76	1,85
08:30	5,18	2,10	5,18	1,85	4,88	1,54	5,08	1,81
alle Uhrzeiten	5,10	1,95	5,23	1,75	5,26	1,62		

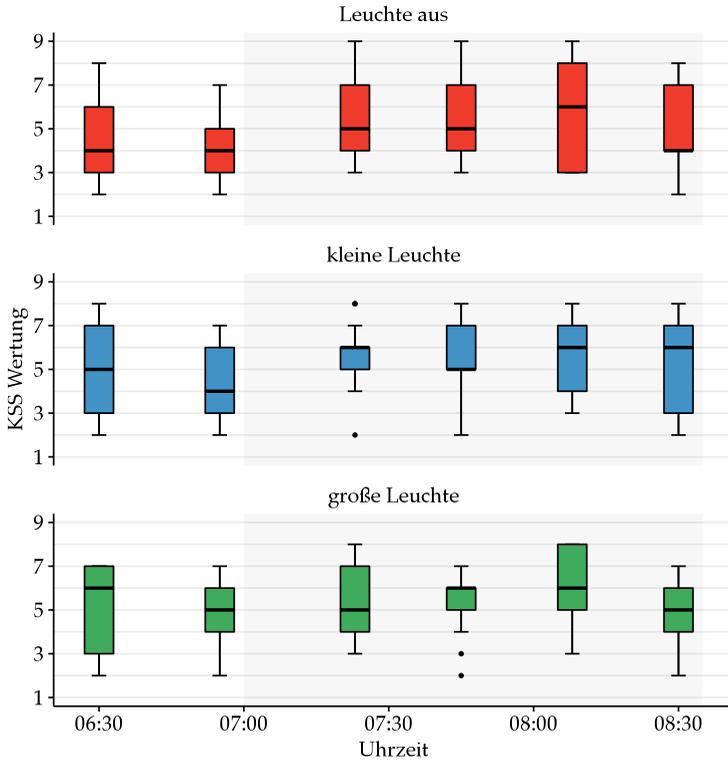


Abbildung D.25: Boxplots der KSS Wertung in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario

D.3.2 WEITERE MELATONIN ERGEBNISSE

Tabelle D.26: Mittelwerte und Standardabweichungen der Melatoninspiegel in **pg/ml** in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.

Uhrzeit	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
06:30	7,69	5,56	6,82	3,97	7,68	4,29	7,40	4,58
06:55	6,50	4,73	4,78	3,27	7,20	5,00	6,15	4,44
07:23	5,11	3,70	4,51	3,08	4,68	3,74	4,77	3,46
07:45	3,94	2,72	2,93	1,61	4,07	3,22	3,65	2,61
08:08	3,21	2,77	2,38	1,55	3,16	2,95	2,92	2,48
08:30	2,91	2,67	2,11	1,11	2,81	2,28	2,61	2,12
alle Uhrzeiten	4,90	3,07	3,92	3,07	4,92	4,06	/	/

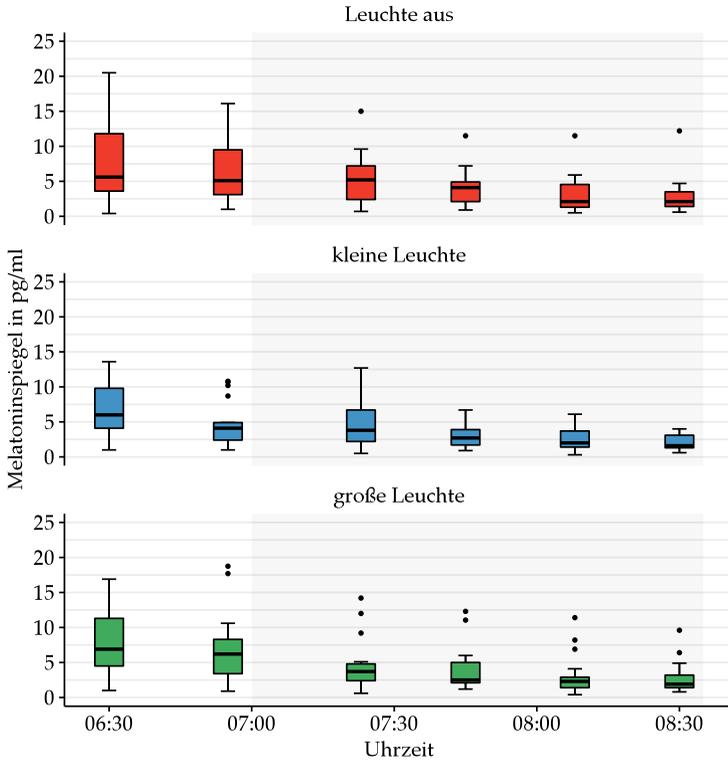


Abbildung D.26: Boxplots der Melatoninspiegel in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario

D.3.3 WEITERE 2-BACK TASK ERGEBNISSE

Tabelle D.27: Mittelwerte und Standardabweichungen der *2-back task* Trefferquote in % in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.

Uhrzeit	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
06:30	86,09	13,94	87,07	14,10	86,65	8,04	86,59	12,15
07:23	84,00	11,36	81,95	15,68	80,77	12,72	82,20	13,26
08:08	83,96	13,71	83,55	11,72	84,09	11,18	83,87	12,01
alle Uhrzeiten	84,72	12,88	84,16	13,90	83,84	10,88		

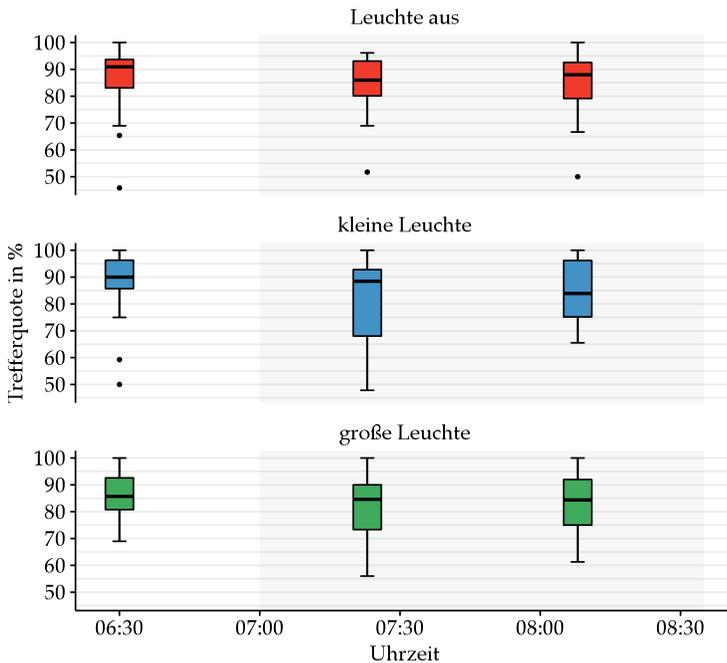


Abbildung D.27: Boxplots der *2-back task* Trefferquote in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario

D.3.4 WEITERE ERGEBNISSE ZUR FAHRLEISTUNG

Tabelle D.28: Mittelwerte und Standardabweichungen der Standardabweichung der lateralen Spurposition in m in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario.

Uhrzeit	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
07:00	0,38	0,13	0,41	0,11	0,41	0,13	0,40	0,12
07:45	0,41	0,14	0,43	0,13	0,43	0,12	0,42	0,13
alle Uhrzeiten	0,40	0,13	0,42	0,12	0,42	0,12		

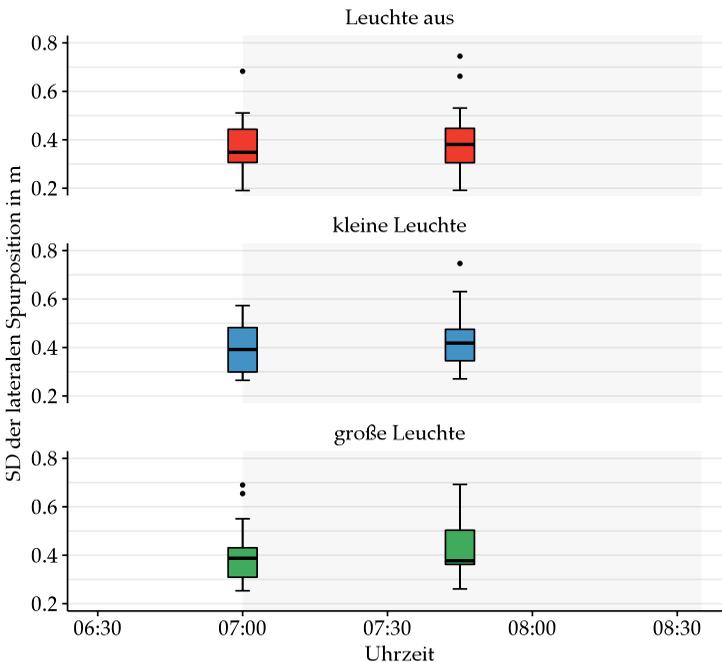


Abbildung D.28: Boxplots der Standardabweichung der lateralen Spurposition in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario

D.3.5 MDBF ERGEBNISSE (WACHHEIT/MÜDIGKEIT)

Tabelle D.29: Mittelwerte und Standardabweichungen der MDBF Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“ in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

Uhrzeit	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
06:30	27,06	4,79	27,00	5,76	26,29	6,13	26,78	5,49
06:55	26,59	6,65	26,53	5,64	25,47	6,33	26,20	6,12
08:30	25,12	8,01	24,29	7,58	25,35	6,42	24,92	7,24
alle Uhrzeiten	26,25	6,54	25,94	6,37	25,71	6,18		

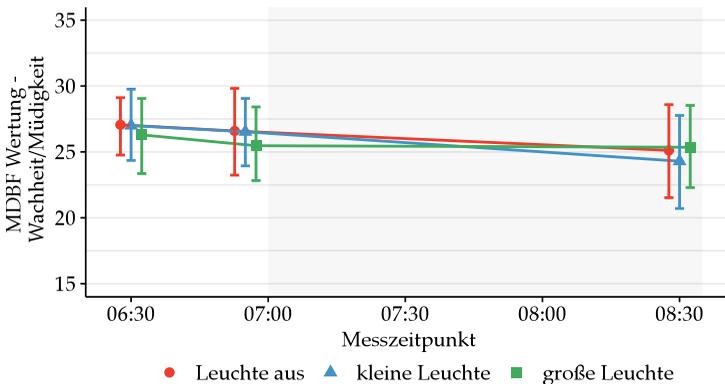


Abbildung D.29: Mittlere MDBF Wertungen (Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Lichtszenario. Die Fehlerbalken beschreiben das 95% Konfidenzintervall. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

Die inferenzstatistische Analyse der Wachheit/Müdigkeit mittels MDBF zeigte keinen signifikanten Haupteffekt der Faktoren Testbatterie bzw. Uhrzeit, $\chi^2(2) = 2,15$, $p = 0,34$, oder Lichtszenario,

$\chi^2(2) = 0,53, p = 0,77$. Gleiches gilt für den Interaktionseffekt der Faktoren Uhrzeit und Lichtszenario, $\chi^2(4) = 1,56, p = 0,82$.

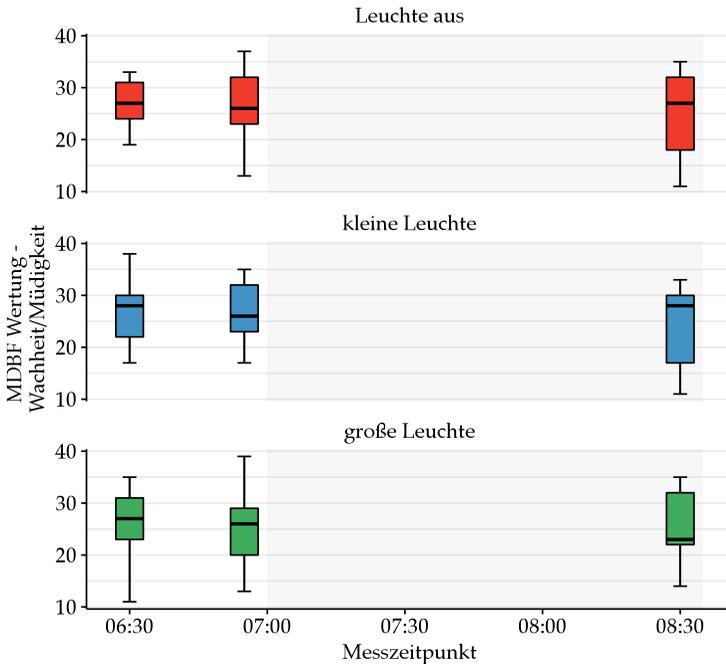


Abbildung D.30: Boxplots der MDBF Wertungen (Kategorie „Wachheit/Müdigkeit“) pro Lichtszenario und Messzeitpunkt. Je wacher, desto höher fällt die Wertung aus.

D.3.6 GO-NOGO TASK ERGEBNISSE

Tabelle D.30: Mittelwerte und Standardabweichungen der prozentual falsch getätigten *NoGo*-Reaktionen in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario (in %). Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.

Uhrzeit	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
06:30	9,18	8,20	7,80	6,20	7,43	5,06	8,14	6,53
07:23	16,20	12,16	18,46	12,53	17,74	9,81	17,47	11,37
08:08	19,36	12,49	20,18	12,60	17,10	10,30	18,89	11,68
alle Uhrzeiten	14,91	11,71	15,49	12,00	14,09	9,78		

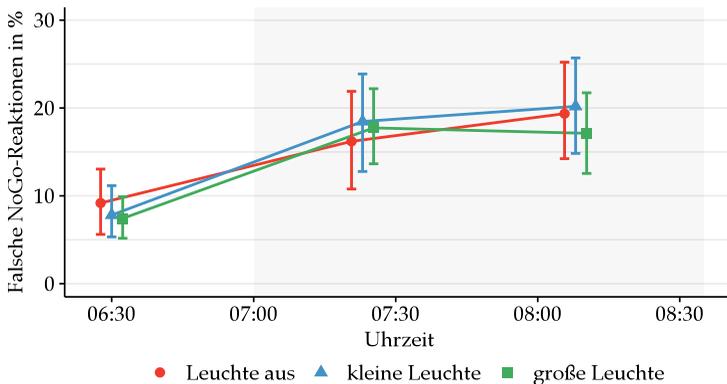


Abbildung D.31: Verlauf der Mittelwerte der prozentual falsch getätigten *NoGo*-Reaktionen (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario. Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.

Die inferenzstatistische Analyse der falsch getätigten *NoGo*-Reaktionen zeigte einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Testbatterie bzw. Uhrzeit, $\chi^2(2) = 40,97$, $p < 0,001$. Der Haupteffekt des Faktors Lichtszenario war nicht signifikant, $\chi^2(2) = 1,68$, $p = 0,43$. Gleiches gilt

für den Interaktionseffekt der Faktoren Uhrzeit und Lichtszenario, $\chi^2(4) = 3,80, p = 0,43$. Die Kontrastanalyse der benachbarten Testbatterien bzw. Uhrzeiten zeigte, dass während der zweiten Testbatterie prozentual mehr falsche *NoGo*-Reaktionen getätigt wurden als in der ersten Testbatterie, $b = -9,32, t(32) = -6,91, p < 0,001, r = 0,77$. Weitere signifikante Effekte konnte die Kontrastanalyse nicht aufdecken.

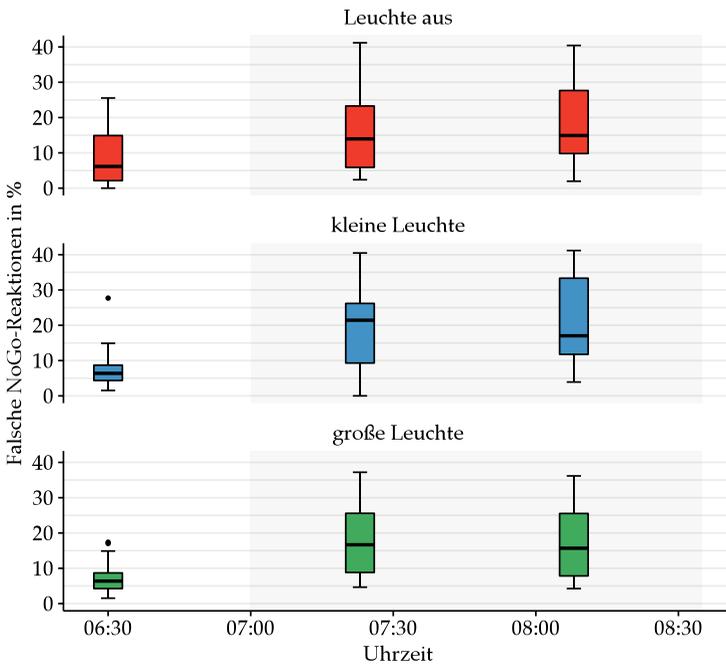


Abbildung D.32: Boxplots der prozentual falsch getätigten *NoGo*-Reaktionen in Abhängigkeit von Testbatterie bzw. Uhrzeit und Lichtszenario. Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.

D.3.7 RSVP TEST ERGEBNISSE

Tabelle D.31: Mittelwerte und Standardabweichungen der prozentual richtig getätigten RSVP-Reaktionen in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario (in %). Ein höherer Wert entspricht einer besseren Leistung.

Uhrzeit	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
06:30	97,88	2,70	98,11	1,69	98,27	2,20	98,09	2,20
07:23	95,35	6,29	93,60	8,12	94,45	7,24	94,46	7,15
08:08	95,92	4,62	95,28	4,10	97,09	3,81	96,10	4,17
alle Uhrzeiten	96,38	4,80	95,66	5,61	96,60	5,06		

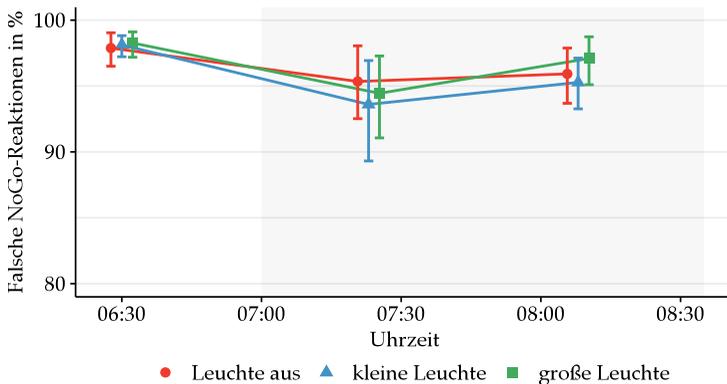


Abbildung D.33: Verlauf der Mittelwerte der prozentual richtigen RSVP-Reaktionen (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario. Ein höherer Wert entspricht einer besseren Leistung.

Die inferenzstatistische Analyse der richtig getätigten RSVP-Reaktionen zeigte einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Testbatterie bzw. Uhrzeit, $\chi^2(2) = 8,75, p = 0,01$. Der Haupteffekt des Faktors Lichtszenario war nicht signifikant, $\chi^2(2) = 2,73, p = 0,26$. Gleiches gilt für

den Interaktionseffekt der Faktoren Uhrzeit und Lichtszenario, $\chi^2(4) = 3,60, p = 0,46$. Die Kontrastanalyse der benachbarten Testbatterien bzw. Uhrzeiten zeigte, dass während der zweiten Testbatterie prozentual mehr richtige RSVP-Reaktionen getätigt wurden als in der ersten Testbatterie, $b = 3,62, t(32) = 3,06, p = 0,005, r = 0,48$. Weitere signifikante Effekte konnte die Kontrastanalyse nicht aufdecken.

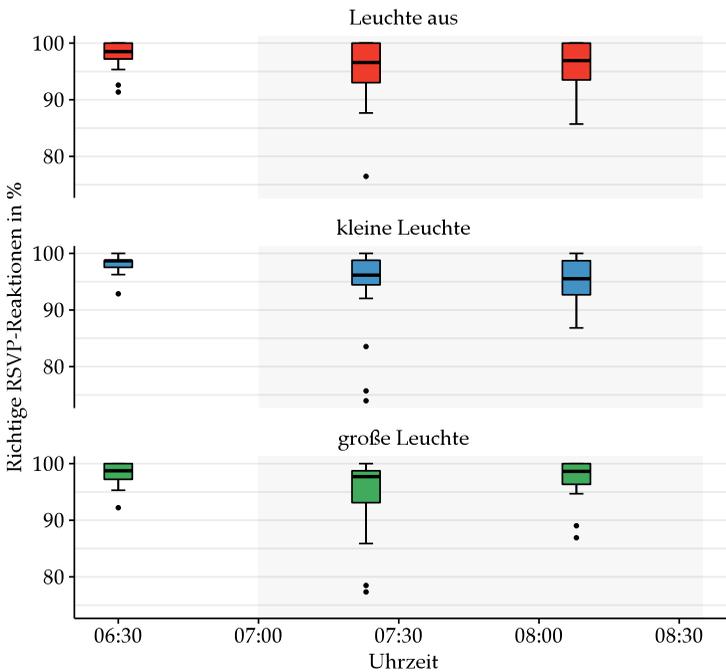


Abbildung D.34: Boxplots der prozentual richtigen RSVP-Reaktionen in Abhängigkeit von Testbatterie bzw. Uhrzeit und Lichtszenario. Ein höherer Wert entspricht einer besseren Leistung.

D.3.8 VIGILANZUHR ERGEBNISSE

Tabelle D.32: Mittelwerte und Standardabweichungen der Vigilanzuhr Miss-Quote in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario (in %). Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.

Uhrzeit	Lichtszenario							
	Leuchte aus		kleine Leuchte		große Leuchte		Licht gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
07:00	16,16	15,01	14,60	15,10	14,00	16,40	14,90	15,20
07:45	16,90	18,40	19,90	18,17	17,58	16,29	18,13	17,31
alle Uhrzeiten	16,50	16,50	17,25	16,65	15,80	16,20		

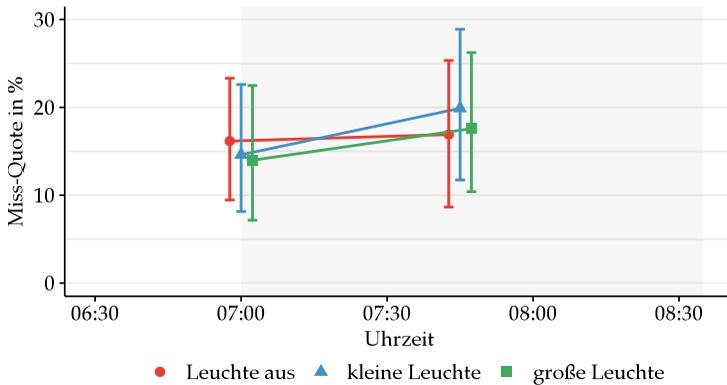


Abbildung D.35: Mittelwertverlauf der Vigilanzuhr Miss-Quote (inkl. 95% CI) in Abhängigkeit von Uhrzeit und Lichtszenario. Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.

Die inferenzstatistische Analyse der Vigilanzuhr Miss-Quote zeigte keinen signifikanten Haupteffekt der Faktoren Testatterie bzw. Uhrzeit, $\chi^2(1) = 3,34$, $p = 0,07$, oder Lichtszenario, $\chi^2(2) = 0,59$, $p = 0,74$.

Gleiches gilt für den Interaktionseffekt der Faktoren Uhrzeit und Lichtszenario, $\chi^2(2) = 1,47, p = 0,48$.

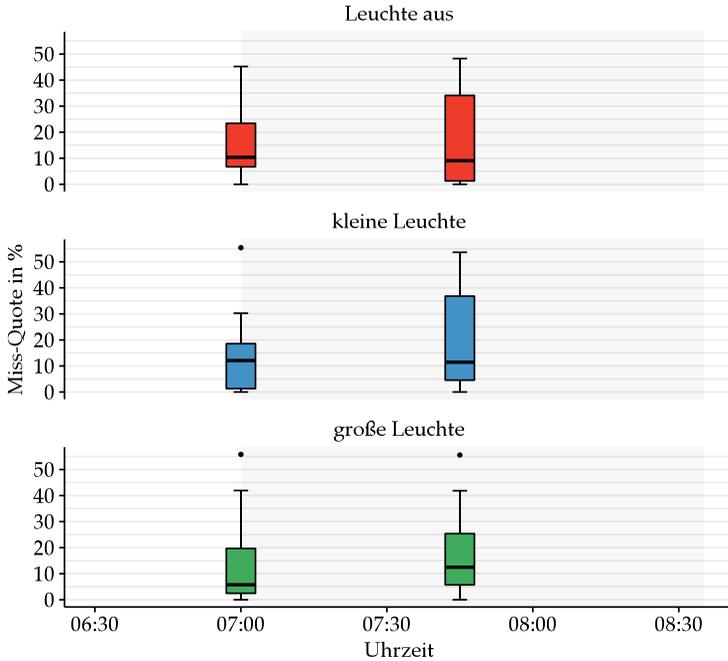


Abbildung D.36: Boxplots der Vigilanzuhr Miss-Quote in Abhängigkeit von Testbatterie bzw. Uhrzeit und Lichtszenario. Ein geringerer Wert entspricht einer besseren Leistung.