Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik Band 16

Inga Rothert

Wirkung von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung des Lichts auf die Aufmerksamkeit am Tag

Universitätsverlag der TU Berlin

Technische Universität Berlin

Inga Rothert

Wirkung von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung des Lichts auf die Aufmerksamkeit am Tag

Die *Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik* der Technischen Universität Berlin wird herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan Völker,
Heike Schumacher

Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik | 16

Inga Rothert

Wirkung von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung des Lichts auf die Aufmerksamkeit am Tag

Universitätsverlag der TU Berlin

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.dnb.de abrufbar.

Universitätsverlag der TU Berlin, 2020
http://verlag.tu-berlin.de

Fasanenstr. 88, 10623 Berlin
Tel.: +49 (0)30 314 76131 / Fax: -76133
E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2019
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker
Gutachter: Prof. Dr. Christoph Schierz (TU Ilmenau)
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Paul Walter Schmits-Reinecke (HAWK)
Die Arbeit wurde am 11. November 2019 an der Fakultät IV unter Vorsitz von Prof. Dr.-Ing. Reinhold Orglmeister erfolgreich verteidigt.

Diese Veröffentlichung – ausgenommen Zitate und anderweitig gekennzeichnete Teile – ist unter der CC-Lizenz CC BY lizenziert.
Lizenzvertrag: Creative Commons Namensnennung 4.0
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

Umschlagfoto:
Inga Rothert | CC BY 4.0 | http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

Druck: docupoint GmbH
Satz/Layout: Inga Rothert

ORCID iD Inga Rothert: 0000-0002-2069-2919

ISBN 978-3-7983-3135-8 (print)
ISBN 978-3-7983-3136-5 (online)

ISSN 2196-338X (print)
ISSN 2198-5103 (online)

Zugleich online veröffentlicht auf dem institutionellen Repositorium der Technischen Universität Berlin:
DOI 10.14279/depositonce-9617
http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-9617

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin des Fachgebiets Lichttechnik an der TU Berlin und wurde durch das BMBF Projekt Nicht-visuelle Lichtwirkungen (NiviL) gefördert.

Herzlichen Dank Prof. Stephan Völker für die spannenden Lichttechnik-Vorlesungen, die mich für das Licht begeistert haben, für die Anstiftung zur Promotion und für die Unterstützung bei den Mentoring-Treffen. Ebenso danke ich den beiden Gutachtern Prof. Christoph Schierz und Prof. Paul Schmits-Reinecke für ihre Zeit und ihr Feedback und für die spannenden Diskussionen.

Besonderer Dank gilt Dr. Martine Knoop, die mich großartig betreut hat, mich stets mit Feedback versorgt hat, mich bei selbstgesetzten Deadlines motiviert hat und mich bei Tiefpunkten aufgemuntert hat.

Eine Tonne voll Dank geht ans Fachgebiet Lichttechnik und all meine (ehemaligen) Kollegen für die vielen guten Gespräche und die gute Atmosphäre und dass immer Hilfe bei Problemen und Versuchen da war. Das gilt besonders für Mathias Niedling, der das Projekt NiviL super geleitet hat und mich stets unterstützt hat. Lieber Dank auch an meine Studierenden für die Hilfe bei den Versuchen: Kai Heller, Sarah Baur, Birte Saathoff, Sarah Schmidt und Farid Rhabar.

Vielen Dank an Dr. Jürgen Locher für die pragmatische Beratung bei Versuchsplanung und Statistik. Dr. Adrian Mahlkow danke ich für die Perspektive nach der Doktorarbeit und die unkomplizierte Geduld.

Zu guter Letzt ein großes Dankeschön an meine Lieben: meine beste Anja und meine kleine Lena, die immer an mich glauben und mich motivieren, meiner Mama für die vielen leckeren Lieblingsessen und meinem Papa für das Vererben von naturwissenschaftlichem Interesse, und meinem liebsten Andreas, der Zeit für Freizeit und Erholung einfordert und mich mit seinem sonnigen Frohsinn erheitert. Ihr seid die besten!

Kurzfassung

Moderne LED- und Lichtmanagementtechnologien sowie wachsendes Wissen über nicht-visuelle Wirkungen von Licht ermöglichen zukünftig, mit dem *richtigen* Licht zur *richtigen* Zeit die oft suboptimalen Lernbedingen an Schulen oder Universitäten zu verbessern. Leider herrscht noch kein Konsens, was „richtig“ bedeutet. Unter dem Begriff nicht-visuelle Wirkungen versammeln sich eine Vielzahl an unterschiedlichen Wirkungen: z. B. die Unterdrückung des Hormons Melatonin, die Verbesserung der Aufmerksamkeit oder der Einfluss auf das Wohlbefinden. Die Wirkung von erhöhten Beleuchtungsstärken oder erhöhten kurzwelligen Anteilen in der spektralen Verteilung auf die Melatoninsuppression in der Nacht ist gut belegt. Für die akute Aufmerksamkeit am Tage, Grundvoraussetzung zum Lernen, ist die Studienlage zur Wirkung von Beleuchtungsstärken und spektralen Verteilungen jedoch uneinheitlich. Im Rahmen dieser Dissertation wurden daher drei Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt.

Im Laborversuch wurden zwei Beleuchtungsstärken bei jeweils zwei spektralen Verteilungen an jeweils 30 Probanden miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass eine erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke von 1 000 lx auf Augenhöhe im Vergleich zu einer Standardbeleuchtungsstärke von 200 lx vertikal auf Augenhöhe positiv auf die Aufmerksamkeit wirkt. Ein erhöhter kurzwelliger Anteil in der spektralen Verteilung von 12 000 K unterschied sich bei gleicher Beleuchtungsstärke nicht in der Wirkung von 2 200 K bezüglich der Aufmerksamkeit. Die Interaktion beider Größen deutet darauf hin, dass sich eine hohe Beleuchtungsstärke bei gleichzeitig hohem kurzwelligem Anteil (12 000 K bei 1 000 lx) nachteilig auf die Aufmerksamkeit auswirkt. Dies wurde anhand der kognitiven Tests d2R-Test und Go-NoGo-Test ermittelt. Ein Einfluss der Beleuchtung auf die subjektive Aufmerksamkeit, gemessen mit der Karolinska-Sleepiness-Scale, konnte nicht nachgewiesen werden. Im Feldversuch im Hörsaalkontext wurden weder mit subjektiven noch mit kognitiven Tests Einflüsse der Beleuchtung auf die Aufmerksamkeit

beobachtet. Mögliche Erklärungen hierfür sind die weniger extremen Lichtbedingungen (hohe Beleuchtungsstärke: 400 lx vertikal auf Augenhöhe, hoher kurzwelliger Anteil: 9 000 K) als im Labor, stärkerer Einfluss von Störgrößen im Feld, ein langanhaltender Lerneffekt beim monotonen d2R-Test und die Möglichkeit, dass der potenzielle Effekt des Lichts auf die Aufmerksamkeit zu gering für einen Nachweis ist. Andere Einflussgrößen wie berichtete Anstrengung, Nahrungs- und Koffeinzufuhr sowie Krankheit und Schlafprobleme zeigten teilweise eine stärkere Wirkung auf die Aufmerksamkeit als das Licht. Diese Zusammenhänge sollten weiter erforscht werden, um den komplexen Einfluss von Licht auf den Menschen besser zu verstehen. In einem weiteren Laborversuch wurde kein Unterschied in der Wirkung von dynamischer vs. statischer Beleuchtung auf die Aufmerksamkeit gefunden. In allen Versuchen bewerteten die Probanden Lichtszenen mit hohem kurzwelligem Anteil hinsichtlich Akzeptanz schlechter als Lichtszenen mit niedrigem oder mittlerem kurzwelligem Anteil.

Diese Arbeit konnte zeigen, dass tendenziell höhere Beleuchtungsstärken von Vorteil für die Aufmerksamkeit tagsüber sind. Da jedoch kein Nachweis in der realen Anwendung im Lernumfeld erbracht wurde, sollten daraus zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Planungsempfehlungen abgeleitet werden. Sehr hohe Farbtemperaturen ab 9 000 K sollten nur mit Vorsicht eingesetzt werden, da eine geringere Nutzerakzeptanz zu erwarten ist und sie in Kombination mit hohen Beleuchtungsstärken nachteilig auf die Aufmerksamkeit wirkten.

Abstract

In the future, suboptimal learning conditions in schools or universities could be improved with the *right* light at the *right* time, because of further advancement of modern LED and light management technologies as well as growing knowledge on non-image-forming effects of light. Unfortunately, there is no consensus of what “right” means. The term non-image-forming effects combines a variety of different effects: e.g. the suppression of the hormone melatonin, the improvement of alertness or the impact on well-being. The effect of increased vertical illuminances at eye level or increased short wavelength part in the spectral distribution on melatonin suppression during nighttime is well proven. In case of acute alertness during the day, a requirement for learning, the evidence on effects of illuminances and spectral distributions is still inconsistent. Consequently, three studies on this subject were conducted in this doctoral thesis.

Two illuminances and two spectral power distributions were compared with 30 participants each in a laboratory experiment. The result showed that an increased vertical illuminance of 1 000 lx at eye level positively influences alertness in comparison to a standard illuminance of 200 lx at eye level. A larger short wavelength part in the spectrum of 12 000 K did not differ from 2 200 K concerning alertness. The interaction of both variables indicated that simultaneously increased illuminance and short wavelength part (12 000 K and 1 000 lx at eye level) have a negative effect on alertness. These results were determined with the cognitive tasks d2R-Test and Go-NoGo-Test. Subjective alertness, measured with the Karolinska-Sleepiness-Scale, was not influenced by illumination. A field study in a lecture hall did not observe effects of illumination on alertness, neither with subjective nor cognitive tests. Possible explanations are less extreme lighting conditions (high illuminance: 400 lx vertical at eye level, high short wavelength part: 9 000 K) than in the laboratory, greater influence of confounding parameters in the field, a prolonged learning effect of the monotonous d2R-Test and the

possibility that the potential effect of light on alertness might be too small for detection. Other influence parameters like reported effort, food and caffeine intake, sickness and sleep problems to some extend had greater impact on alertness than light. These relations should be further studied for a better understanding of the complex influence of light on humans. Another laboratory study found no difference of the impact of dynamic vs. static illumination on alertness. Lighting conditions with large short wavelength part in the spectrum were rated less acceptable in comparison to lighting conditions with low or medium short wavelength part in all experiments.

This thesis demonstrated that a higher illuminance level very likely is beneficial for alertness during the day. Recommendations for planning should not be concluded yet, because no evidence was provided in a real learning environment. Very high color temperatures (≥ 9000 K) should be used with care, because a lower user acceptance can be expected as well as a negative effect on alertness in combination with high illuminance levels.

Inhalt

Danksagung V

Kurzfassung VI

Abstract VIII

Inhalt X

1 Einleitung 1

2 Grundlagen und Stand der Forschung 7

2.1 Was ist Aufmerksamkeit und wie lässt sie sich messen? 7

2.1.1 Definition der Aufmerksamkeit 7

2.1.2 Messtechnische Operationalisierung der Aufmerksamkeit 9

2.2 Überblick: Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit 13

2.3 Einflussfaktoren des Lichts 19

2.3.1 Messtechnische Beschreibung der Beleuchtungsstärke und der spektralen Verteilung 20

2.3.2 Beleuchtungsstärke 23

2.3.3 Spektrale Verteilung 28

2.3.4 Dauer der Exposition 34

2.3.5 Tageszeit 35

2.3.6 Lichthistorie 37

2.3.7 Dynamik der Beleuchtung 38

2.4 Feldstudien Licht zum Lernen 41

2.5 Faktor Individualität der Menschen 45

3 Forschungsfragen 52

4 Experimentelle Untersuchungen 56

4.1 Hypothesen und Übersicht 56

4.2 Variablen 59
4.2.1 Unabhängige Variablen 60
4.2.2 Abhängige Variablen und deren Operationalisierung 60
4.2.3 Kovariablen 67
4.3 Laborversuch 1: Extreme Lichtbedingungen 69
4.3.1 Design 69
4.3.2 Probanden 70
4.3.3 Versuchsaufbau und Lichtszenen 71
4.3.4 Messgrößen 76
4.3.5 Versuchsablauf 76
4.4 Laborversuch 2: Dynamische Lichtbedingungen 78
4.4.1 Design 78
4.4.2 Probanden 78
4.4.3 Versuchsaufbau und Lichtszenen 79
4.4.4 Messgrößen 82
4.4.5 Versuchsablauf 82
4.5 Hörsaalstudie 86
4.5.1 Design 86
4.5.2 Probanden 88
4.5.3 Versuchsaufbau und Lichtszenen 88
4.5.4 Messgrößen 91
4.5.5 Versuchsablauf 92
4.5.6 Umgebungsbedingungen 93
5 Ergebnisse 96
5.1 Auswertung Laborversuch 1: Extreme Lichtbedingungen 96
5.1.1 Datenaufbereitung 97

5.1.2 Überprüfung der statistischen Voraussetzungen 99
5.1.3 D2R-Test.....101
5.1.4 Auditiver Go-NoGo-Test und Vigilanzaufgabe Tablet 106
5.1.5 Karolinska-Sleepiness-Scale (KSS) 109
5.1.6 Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden.....111
5.1.7 Fragebogen zur Akzeptanz der Beleuchtung 115
5.1.8 Analyse der Beleuchtungsstärken (200 lx vs. 500 lx vs. 1000 lx) 118
5.1.9 Zusammenfassung der Ergebnisse.....120
5.2 Auswertung Laborversuch 2: Dynamische Lichtbedingungen 122
5.2.1 Datenaufbereitung.....123
5.2.2 Überprüfung der statistischen Voraussetzungen 124
5.2.3 D2R-Test.....125
5.2.4 Auditiver Go-NoGo-Test.....128
5.2.5 Karolinska-Sleepiness-Scale 130
5.2.6 Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden.....131
5.2.7 Fragebogen zur Akzeptanz der Beleuchtung 134
5.2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse.....138
5.3 Auswertung Hörsaalstudie.....139
5.3.1 Datenaufbereitung.....140
5.3.2 Beschreibung der statistischen Methode linear gemischte Modelle.....142
5.3.3 D2R-Test.....145
5.3.4 Karolinska-Sleepiness-Skala 150

5.3.5 Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden 153
5.3.6 Fragebogen zur Akzeptanz der Beleuchtung 154
5.3.7 Weitere Ergebnisse 156
5.3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse 164
6 Diskussion und Schlussfolgerungen 167
6.1 Diskussion der Hypothesen 167
6.2 Diskussion der Methodik 180
6.2.1 Operationalisierung 180
6.2.2 Hörsaalstudie 182
6.2.3 Gültigkeit der Ergebnisse 184
7 Zusammenfassung und Ausblick 186
Literatur 190
Abbildungsverzeichnis 204
Tabellenverzeichnis 208
Formelzeichen und Abkürzungen 212
Anhang 213
Anhang A – Versuchsdokumente 213
Anhang B – Messdaten und Messunsicherheit 222
B1) Messdaten Laborstudie 1 222
B1) Messdaten Laborstudie 2 224
B2) Messunsicherheit Laborstudien 1 und 2 226
B3) Messdaten und -unsicherheit Hörsaalstudie 228
Anhang C – Tabellen aus Laborversuch 1 233
C1) Überprüfung der Normalverteilung 233
C2) Überprüfung der Varianzhomogenität 240

C3) Analyse der Beleuchtungsstärken 240

C4) Deskriptive Statistik zur subjektiven Aufmerksamkeit und Wohlbefinden 242

Anhang D – Tabellen aus Laborversuch 2 244

D1) Überprüfung der Normalverteilung 244

D2) Überprüfung der Varianzhomogenität 251

D3) Deskriptive Statistik zur subjektiven Aufmerksamkeit und Wohlbefinden 252

D4) Ergänzung zur Akzeptanz der Beleuchtung 254

Anhang E – Tabellen aus der Hörsaalstudie 255

E1) Überprüfung der Voraussetzungen 255

E2) Analyse subjektive Aufmerksamkeit und Wohlbefinden 258

E3) Analyse Akzeptanz der Beleuchtung 259

E4) Weitere Ergebnisse Grafiken 260

1 Einleitung

> *Eine typische Situation am Freitagmorgen an einer Universität: Unausgeschlafene Studierende schleppen sich nach einer viel zu kurzen Nacht in die Grundlagenvorlesung. Mit einem Kaffee halten sie sich zu Beginn noch wach, doch schon nach kurzer Zeit hat der komplizierte Stoff die meisten abgehängt. Das Licht ist auch so schön schummerig und die Augenlider werden schwer. Nach 90 Minuten Halbschlaf leider nichts aus der Vorlesung mitgenommen…*

Leider ist es traurige Realität, dass Jugendliche und junge Erwachsene dank zu wenig Schlaf morgens in Schule und Studium kaum aufnahmefähig sind [1–4]. In der Pubertät verschiebt sich der biologische Schlaf-Wach-Rhythmus häufig zu späteren Einschlafzeiten [5, 6], was in der Chronobiologie als Abend-Chronotyp (Eule) bezeichnet wird. Das Maximum dieser Verschiebung zu Abendtypen wird mit 20 Jahren erreicht [6]. Auf Grund sozialer Verpflichtungen wie Schule, Studium oder Arbeit baut sich so ein zunehmendes Schlafdefizit über die Woche auf (*Social Jetlag*, [7]), welches sich negativ auf die Leistungsfähigkeit am folgenden Tag auswirkt [8, 9].

> *Ganz anders im neuen Hörsaal, wo dieses neue Beleuchtungssystem installiert ist. Morgens wenn alle noch müde sind, stellt die Professorin besonders helles Licht ein. Das macht wach und aufmerksam und bietet beste Bedingungen fürs Lernen. Nach der Mittagspause, wenn die Gefahr des berüchtigten Mittagstiefs lauert, hilft das kaltweiße Licht im Hörsaal ebenfalls die Aufmerksamkeit aufrecht zu erhalten.*

Derlei Visionen versprechen aktuelle Schlagwörter der Lichtbranche wie *Human Centric Lighting* [10], biologisch wirksame oder dynamische Beleuchtung [11]. Mit modernen LED-Steuerungstechniken sind variabel

einstellbare Lichtströme oder Lichtfarben vielseitig einsetzbar. Da Beleuchtung in Innenräumen allgegenwärtig ist, wäre es leicht denkbar, sie nicht nur anhand von Sehaufgaben auszuwählen, sondern an weitere Bedürfnisse des Menschen anzupassen. Dies könnte beispielsweise eine Verbesserung der Aufmerksamkeit durch die Beleuchtung sein. Doch was ist Werbeversprechen und was ist wissenschaftlich belegter Nutzen?

Abbildung 1.1: Beispiele für nicht-visuelle Wirkungen von Licht

Die *nicht-visuellen Wirkungen* umfassen vielfältige Wirkungen von Licht auf den Menschen abseits des Sehvorgangs. Abbildung 1.1 zeigt einige Beispiele.

Am besten erforscht sind die nächtliche Melatoninsuppression durch Licht sowie die circadiane Phasenverschiebung, bei der Licht als Zeitgeber den zeitlichen Verlauf der Melatoninproduktion nach vorn oder hinten verschiebt. Verantwortlich sind die im Jahr 2001 entdeckten *intrinsically photosensitve retinal ganglion cells* (ipRGCs, [12, 13]), siehe Abbildung 1.2. Diese dritte Art Fotorezeptoren, neben Zapfen und Stäbchen, enthält das Photopigment Melanopsin und ist damit direkt lichtempfindlich. Die ipRGCs besitzen Verschaltungen ins Gehirn z. B. dem Suprachiasmatischen Nucleus [14], unsere innere Uhr, die u. a. den Tagesverlauf verschiedener Hormone steuert. Dosis-Wirkungs-Funktionen für Beleuchtungsstärke und Melatoninsuppression wurden u. a. von Cajochen und Zeitzer aufgestellt [14, 15]. Die spektrale Empfindlichkeit der ipRGCs besitzt ihr Maximum bei 480 nm [16] und ist im Vergleich zur Hellempfindlichkeit V (λ) in den kurzwelligen Spektralbereich verschoben. Eine hohe Wirksamkeit des Lichts auf die Melatoninsuppression wird demnach durch eine hohe vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe und einen hohen Blauanteil in der spektralen Verteilung erreicht.

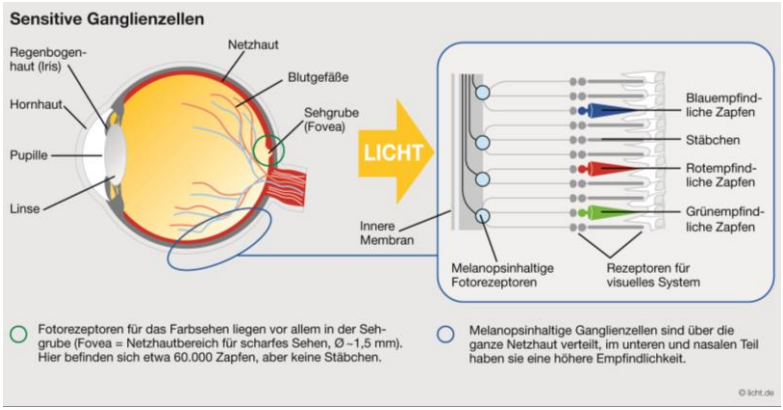


Abbildung 1.2: Aufbau des Auges und Schema der Fotorezeptoren der Netzhaut, Bild: licht.de [11]

Dies ist jedoch nicht mit Sicherheit auf andere nicht-visuelle Wirkungen wie beispielsweise die Aufmerksamkeit übertragbar [16]. Das Hormon Melatonin wird ausschließlich abends und nachts ausgeschüttet (siehe Abbildung 1.3). Untersuchungen zur Melatoninsuppression werden deshalb vornehmlich nachts durchgeführt. Tagsüber sind Menschen vergleichsweise wacher und das Aufmerksamkeitsniveau ist deutlich höher. Demnach wirkt eine Lichtexposotion am Tag wahrscheinlich anders auf den Menschen als in der Nacht.

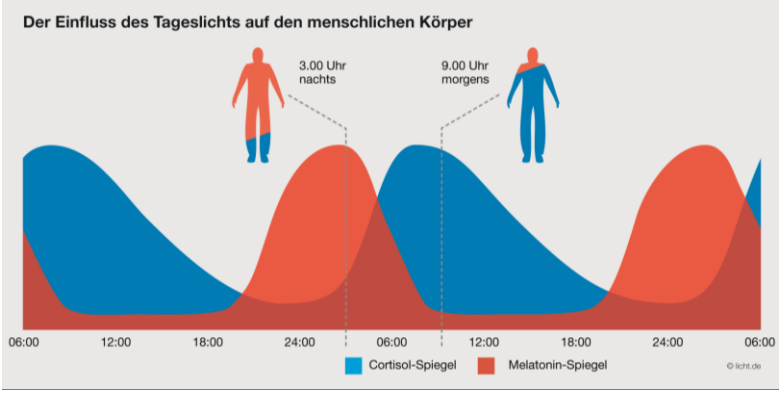


Abbildung 1.3: Tageszeitabhängiger Verlauf des Hormonspiegels von Melatonin und Cortisol, Bild: licht.de [11]

Einige Studien konnten tagsüber einen positiven Einfluss von erhöhter Beleuchtungsstärke [17–19] und erhöhtem kurzwelligen Anteil in der spektralen Verteilung [20–23] auf die akute Aufmerksamkeit zeigen. Demgegenüber stehen Studien mit keinen nachweisbaren oder mit negativen Effekten [24–27]. Die Studienlage, die im Kapitel 2.3 ausführlich analysiert wird, liefert kein eindeutiges Bild und insbesondere Studien zur gleichzeitigen Interaktion von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung fehlen.

Diese Dissertation hat das Ziel, den Einfluss von vertikaler Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe und von kurzwelligem Anteil in der spektralen Verteilung sowie deren Zusammenspiel auf die akute Aufmerksamkeit

tagsüber zu beschreiben. Dazu wurde eine Probandenstudie im Labor konzipiert und durchgeführt. Gleichzeitig wurden das Wohlbefinden und die Akzeptanz der Beleuchtung untersucht, da ein Zusammenhang wahrscheinlich ist [28, 29]. Eine weitere Laborstudie führte das Experiment fort und untersuchte den Unterschied zwischen dynamischer und statischer Beleuchtung.

Das Feld der nicht-visuellen Wirkungen ist ein komplexes Zusammenspiel verschiedenster Einflussgrößen (siehe Abbildung 1.4). Die Versuche wurden im Rahmen des interdisziplinären Verbundprojekts *Nicht-visuelle Lichtwirkungen* (NiviL, BMBF-Förderkennzeichen: 13N13398) durchgeführt. Durch die Zusammenarbeit von u. a. Medizinern, Psychologen und Lichttechnikern konnte das Wissen der Fachgebiete kombiniert werden und die Versuchsplanung sowie Erhebung von Kontrollgrößen vergleichbar gestaltet werden.

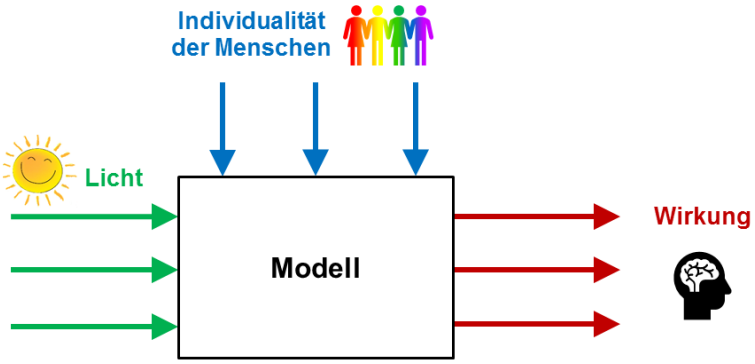


Abbildung 1.4: Modellbild zu nicht-visuellen Wirkungen von Licht

Laborstudien haben den Vorteil, dass die Bedingungen gut kontrollierbar und reproduzierbar sind. Die Ergebnisse sind jedoch nicht unbedingt auf die Praxis übertragbar. Ob eine Anwendbarkeit im Lernkontext tatsächlich gegeben ist, wird deshalb in einem Feldversuch in einem Hörsaal mit einer großen Anzahl Studierender überprüft. Durch Auswahl einer Vorlesung am Morgen und einer am frühen Nachmittag kann

gleichzeitig der Einfluss der Tageszeit untersucht werden. Der Faktor Individualität der Menschen ist eine große Quelle von weiteren potenziellen Einflüssen. Diese und weitere Einflüsse wie die Lichthistorie (Zeit und Dauer des Aufenthalts im Freien), der Chronotyp, Mahlzeiten und Koffeinzufuhr, Stresslevel und Schlafqualität werden erfasst und die Zusammenhänge in der Feldstudie explorativ analysiert.

Zunächst werden im Kapitel 2 die Grundlagen und der Stand der Forschung zur Aufmerksamkeit und zur Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit erläutert und daraus die Forschungsfragen in Kapitel 3 dieser Arbeit hergeleitet. Im Kapitel 4 werden die Hypothesen, die Variablen und die Methodik der drei Versuche beschrieben. Die Ergebnisse und die Auswertung sowie die Überprüfung der Hypothesen folgen im Kapitel 5. Schlussfolgerungen und Diskussion der Methodik werden im Kapitel 6 ausgearbeitet und zum Abschluss wird eine Zusammenfassung mit Ausblick in Kapitel 7 gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Was ist Aufmerksamkeit und wie lässt sie sich messen?

Zunächst wird die Zielgröße *Aufmerksamkeit* definiert und anschließend werden verschiedene Erfassungsmethoden erläutert. Der Kontext dieser Arbeit ist die Beleuchtung zum Lernen. Idealerweise sollte die Auswirkung des Lichts auf die *Leistungsfähigkeit* direkt erfasst werden. Die Leistung eines Menschen ist schwer messbar [30] und hängt von einer Vielzahl kognitiver Funktionen und weiterer Parameter ab (z. B. individueller Leistungsstand, Motivation), die sich nur schwer gezielt kontrollieren lassen. Aufmerksamkeit ist eine Grundvoraussetzung, um überhaupt eine Leistung erbringen zu können. Andersherum ausgedrückt: Bei geringer Aufmerksamkeit wird eine Person bei einer Aufgabe höchstwahrscheinlich keine gute Leistung erzielen. Daher ist die Aufmerksamkeit eine wichtige Größe für den Lernerfolg und wird in dieser Arbeit als Untersuchungsgröße gewählt.

2.1.1 Definition der Aufmerksamkeit

In der wissenschaftlichen Literatur zur Wirkung von Licht wird die Aufmerksamkeit (*alertness* in englischer Literatur) vielfach anhand verschiedener Konstrukte verwendet oder oft auch ohne klare Definition [31]. Insbesondere im Kontext der Chronobiologie und des circadianen Rhythmus wird Aufmerksamkeit als *Wachheit*, d.h. dem Gegenteil von Müdigkeit, betrachtet und meist anhand subjektiver Selbsteinschätzung erfragt. Im Rahmen psychologischer Studien werden außerdem die Begriffe *Vigilanz* und *Daueraufmerksamkeit* verwendet. Dabei ist eine Person nicht nur wach, sondern muss auch auf seltene Stimuli reagieren. Das bedeutet, die Person kann ein gewisses Level an kognitiver Leistung erreichen und aufrechterhalten [32]. Zur Messung werden häufig einfache Reaktionszeitaufgaben verwendet.

Die Aufmerksamkeit wird in der psychologischen Diagnostik in drei Komponenten eingeteilt: *räumliche Orientierung*, *Selektion* und *Alertness* [33]. Mit räumlicher Orientierung ist das Lenken der Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Punkt gemeint, Selektion bezeichnet das Entdecken und Auswählen relevanter Reize und Alertness beschreibt das Aufrechterhalten eines aufnahmefähigen Zustands. Diese und weitere Unteraspekte werden von Sturm (2004) [34] in Tabelle 2.1 in verschiedene Bereiche und Paradigma zur messtechnischen Erfassung eingeteilt.

Tabelle 2.1: Taxonomie der Aufmerksamkeit nach Sturm (2004) [34]

Dimension	Bereich	Paradigma
Intensität (Aktivierungsniveau)	Aufmerksamkeits-aktivierung (*Alertness*)	Einfache visuelle oder auditive Reaktionsaufgaben ohne oder mit Warnreiz
	Daueraufmerksamkeit (*sustained attention*)	Langandauernde Signalentdeckungsaufgaben, hoher Anteil relevanter Stimuli
	Vigilanz	Langandauernde monotone Signalentdeckungsaufgaben, niedriger Anteil relevanter Stimuli
Selektivität (Selektionsniveau)	**Selektive Aufmerksamkeit**	Wahlreaktionsaufgaben, Aufgaben mit Störreizen zwecks Distraktion
	Visuell-räumliche selektive Aufmerksamkeit	Aufgaben, welche den Wechsel der Aufmerksamkeit von einem räumlichen Fokus zum nächsten verlangen
	Geteilte Aufmerksamkeit	Aufgaben, welche eine Verteilung der Aufmerksamkeit auf mehrere Informationskanäle erfordern, Aufgaben zur Erfassung der kognitiven Flexibilität

Der Begriff *Konzentration* ist im deutschen Sprachraum üblich [35] und wird einerseits als Synonym für Aufmerksamkeit betrachtet. Andererseits wird Konzentration auch als separates Konzept betrachtet: So definieren Schmidt-Atzert et al. (2004) die Konzentration als die „Fähigkeit, unter Bedingungen schnell und genau zu arbeiten, die das Erbringen einer kognitiven Leistung normalerweise erschweren“ [33]. Weiterführend bezeichnet dann Konzentrationsfähigkeit die Fähigkeit, diese kognitive Leistung über einen längeren Zeitraum aufrecht zu halten. Eine andere Sichtweise unterscheidet die Art der Reizverarbeitung [36, 37]: Aufmerksamkeit ist notwendig, um die zu betrachtenden Informationen aus einer Menge von Reizen zu filtern. Konzentration stellt die bewusste Weiterverarbeitung zu einem Zeitpunkt von betrachteten Informationen dar.

Die vorgestellten Konzepte und Definitionen überschneiden sich inhaltlich und eine Abgrenzung ist für diese Arbeit nicht relevant. Daher wird in dieser Arbeit der allgemeine Begriff *Aufmerksamkeit* als Oberbegriff für *Daueraufmerksamkeit*, *Vigilanz* und *selektive Aufmerksamkeit* (siehe Tabelle 2.1) verwendet.

Eine weitere Möglichkeit der Unterscheidung ist der betrachtete Zeithorizont der Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit. Das Licht könnte einerseits eine akute Wirkung (d.h. innerhalb eines kurzfristigen Zeitraums) herbeiführen und andererseits durch die Wirkung auf circadiane Rhythmen sowie Phasenverschiebung von Schlafrhythmen indirekt eine langfristige Wirkung (Tage bis Wochen) zeigen. In dieser Arbeit werden ausschließlich akute Wirkungen innerhalb von Minuten bis maximal zwei Stunden betrachtet.

2.1.2 Messtechnische Operationalisierung der Aufmerksamkeit

Aufmerksamkeit lässt sich durch drei Methoden messen: subjektive Selbsteinschätzung der Probanden, kognitive Tests und physiologische Parameter.

Subjektive Selbsteinschätzung

Eine Methode zur subjektiven Selbsteinschätzung sind Likert-Skalen für Aufmerksamkeit, Wachsamkeit oder Müdigkeit wie z. B. die sehr häufig verwendete *Karolinska-Sleepiness-Scale* (KSS, [38]), welche mit anderen objektiven Messgrößen validiert wurde [38]. Weitere standardisierte Skalen sind die *Stanford Sleepiness Scale* [39], die *Epworth Sleepiness Scale* [40, 41] und die *Samn-Perelli fatigue checklist* [42]. Soll die Skala keine diskreten Abstände aufweisen, kann stattdessen eine sogenannte *Visual Analogue Scale* (VAS) angewandt werden. Dabei werden die Enden einer waagerechten Linie mit entgegengesetzten Begriffen versehen (z. B. „sehr müde“ vs. „sehr wach“) und der Proband kann auf der Linie ankreuzen.

Der Vorteil subjektiver Selbsteinschätzung anhand von Fragebögen ist die einfache Anwendbarkeit und die Möglichkeit, individuelle Sichtweisen der Probanden zu erfassen. Nachteilig ist die starke Anfälligkeit für verschiedene Arten von Verzerrungen (*bias*) bei Fragebögen [43, 44] z. B. Tendenz zur Mitte (Menschen kreuzen selten die Extreme an), Erwartungshaltung von Probanden (z. B. „blaues Licht macht wach“), soziale Erwünschtheit (z. B. „Was möchte die Versuchsleitung gerne hören?“) und viele weitere. Weiterhin stimmt die subjektive Bewertung der eigenen Leistung nicht immer mit der tatsächlichen Leistung überein [45]. Idealerweise sollte daher mindestens eine weitere Methode zum Einsatz kommen.

Kognitive Tests

Kognitive Tests messen das Ergebnis eines Probanden bei diversen Aufgaben. Häufig wird die Reaktionszeit beim Reagieren auf bestimmte Reize gemessen. Bei der *psychomotor vigilance task* [46, 47] (PVT) soll so schnell wie möglich auf einen Reiz reagiert werden. Dies entspricht je nach Häufigkeit der Reize der Vigilanz oder Daueraufmerksamkeit. Etwas schwieriger ist der *Go-NoGo-Test* [48–50]. Hier soll nur auf einen *Go*-Reiz so schnell wie möglich reagiert werden und auf einen *NoGo*-Reiz darf

nicht reagiert werden. Zusätzlich zur Daueraufmerksamkeit muss hier auch die selektive Aufmerksamkeit aufrechterhalten werden. Diese Tests gibt es in vielfältigen Varianten, zumeist visuell über Bildschirme. Für Versuche zur Wirkung von Licht sollte möglichst eine auditive Variante gewählt werden, um die Aufgabe unabhängig vom Sehvorgang zu gestalten sowie kein zusätzliches Licht durch Bildschirme zu erzeugen und so unbeabsichtigte Verzerrungen zu vermeiden. Weitere häufig verwendete Tests wie die n-Back-Task [51] betreffen zusätzlich zur Aufmerksamkeit das Arbeitsgedächtnis. Eine Zahlen- oder Buchstabenreihe wird nacheinander gezeigt oder vorgespielt. Entspricht das Zeichen dem n-ten Zeichen davor (z. B. n = 2), muss so schnell wie möglich reagiert werden. Diese Tests können am Computer, an Tablets oder an speziellen Testgeräten durchgeführt werden.

Eine einfache und schnelle Methode, die sich auch für große Gruppen eignet, ist der papierbasierte d2R-Test nach Brickenkamp [52]. Hier müssen bestimmte Zeichen so schnell wie möglich mit einem Stift markiert werden, während Distraktoren nicht markiert werden dürfen. Dieser Test misst die selektive Aufmerksamkeit. Nachteil ist die visuelle Natur der Aufgabe. Daher muss sichergestellt werden, dass die zu untersuchende Lichtsituation die Sehaufgabe gleichermaßen gut beleuchtet.

Vorteil von kognitiven Tests ist, dass sie keine subjektiven Äußerungen von Probanden abbilden, sondern eine tatsächlich dargebrachte Leistung messen. Jedoch können auch hier Verzerrungen und Störeinflüsse auftreten, da die erbrachte Leistung von weiteren Parametern abhängig ist (z. B. das allgemeine Leistungsniveau des Probanden, Alter, Tagesform, Umgebungsbedingungen usw.). Die Vergleichbarkeit verschiedener kognitiver Aufgaben ist nicht immer gegeben und die Leistung ist aufgabenspezifisch.

Physiologische Parameter

Anstatt die Aufmerksamkeit von Probanden anhand von Ergebnissen bei verschiedenen Tests zu messen, können auch direkt physiologische Parameter des Körpers gemessen werden. Beim Elektroenzephalogramm (EEG) kann das Muster von Theta-, Alpha- und Beta-Wellen Aussagen über den Wachzustand und die Aufmerksamkeit treffen [53]. Aufmerksamkeit zeigt sich auch in autonomen Nervenaktivitäten. Bei Müdigkeit nimmt die Pupillengröße ab, sowie die Pupillenoszillationen sind langsamer und stärker [54–56]. Außerdem steigt die Lidschlagfrequenz und -dauer [57]. Herzschlagrate und Herzratenvariabilität [58, 59] sowie Körpertemperatur [60] und Hauttemperatur [61] sind bei größerer Wachheit erhöht.

Gewählte Parameter

Um sowohl kognitive Testergebnisse als auch subjektives Empfinden der Probanden zu erfassen, werden in dieser Arbeit eine subjektive und mehrere kognitive Methoden angewandt. Außerdem werden die Testskalen, subjektiv wie kognitiv, nicht als absolute Größen genutzt, sondern relative Änderungen zwischen den untersuchten Situationen beschrieben.

Physilogische Größen erlauben Rückschlüsse auf den Wachheitszustand und die Aufmerksamkeit der Probanden, sind jedoch für medizinische Laien schwer interpretierbar. Weiterhin sind spezielle Messgeräte nötig und die physiologischen Größen können auch durch andere Zustandsgrößen des Probanden beeinflusst sein. Aus diesen Gründen werden physiologische Parameter in dieser Arbeit nicht behandelt.

2.2 Überblick: Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit

Zunächst soll ein erster Überblick über den Stand der Forschung zur Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit gegeben werden, bevor anschließend die einzelnen Parameter in den folgenden Abschnitten detaillierter behandelt werden.

Souman et al. (2018) [32] analysierten in einem aktuellen Literaturreview 68 Studien zu „acute alerting effects of light“. Sie unterteilten die Studien nach der Manipulation der Beleuchtungsstärke (Anzahl N = 38) oder der Manipulation der spektralen Verteilung bei polychromatischem weißem Licht (N = 15) oder bei monochromatischem Licht (N = 15). Weiterhin wurde nach Art der Messung der Aufmerksamkeit (subjektiv und/oder Reaktionszeittests) sowie nach Tageszeit der Exposition (tagsüber oder abends/nachts) unterschieden. In Tabelle 2.2 wird die Anzahl der Experimente bei polychromatischer Beleuchtung hinsichtlich signifikanter Effekte vs. nicht signifikanter Effekte zusammengezählt. Die Summe der Experimente ist etwas höher als die Anzahl betrachteter Studien, da einige Studien über mehrere Experimente berichteten. Eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke verbesserte die subjektive Bewertung der eigenen Aufmerksamkeit in der Mehrzahl der Studien (28 von 45). Aber eine nicht unwesentliche Anzahl Studien fand keine Effekte auf die subjektive Aufmerksamkeit (17 von 45). Bei erhöhtem Blauanteil in der spektralen Verteilung waren positive Effekte auf die subjektive Aufmerksamkeit mit nur fünf Studien deutlich seltener im Vergleich zu zehn Studien, die keine oder negative Effekte fanden. Reaktionszeiten wurden weniger häufig erfasst und nur drei von 24 Studien (Beleuchtungsstärke und spektrale Verteilung) fanden einen signifikanten Effekt. Der Großteil der Studien wurde abends oder nachts durchgeführt. Werden nur die Studien tagsüber gezählt, verringern sich die Anzahl und der relative Anteil Studien mit positivem signifikantem Effekt abermals.

Tabelle 2.2: Anzahl der Studien aus Souman et al. (2018) [32], die Beleuchtungsstärke oder spektrale Verteilung und Aufmerksamkeit untersuchen, zusammengefasst hinsichtlich der statistischen Signifikanz

Studien	Subjektiv		Reaktionszeittests	
	Sign.	Nicht sign.	Sign.	Nicht sign.
Beleuchtungsstärke	28	17	2	15
Davon tagsüber	17	8	2	10
Spektrale Verteilung	5	10	1	6
Davon tagsüber	0	3	0	2

Tabelle 2.3: Anzahl der Studien aus Lok et al. (2018) [62], zusammengefasst hinsichtlich positiver, negativer und keiner Effekte der Beleuchtungsstärke

Subjektive Indikatoren		Performance Indikatoren		
Positiver Effekt	Kein Effekt	Positiver Effekt	Negativer Effekt	Kein Effekt
14	4	9	5	9

Ein weiteres Literaturreview von Lok et. al 2018 „Alerting Effects of White Light“ [62] fasste die Einschlusskriterien enger: Ausschließlich polychromatisches weißes Licht wurde zugelassen, da unklar ist, ob monochromatische Effekte übertragbar sind und Hinweise auf ein (möglicherweise entgegengesetztes) Zusammenspiel der Fotorezeptoren existieren [63, 64]. Weiterhin wurden nur Studien am Tage in Betracht gezogen. Nachts durchgeführte Studien sind nicht ohne Weiteres auf tagsüber übertragbar [62], weil tagsüber kein Melatonin vorhanden ist und die Aufmerksamkeit tagsüber insgesamt auf einem höheren Niveau als nachts liegt. Es wird außerdem nur der Einfluss einer erhöhten Beleuchtungsstärke im Vergleich zu einer niedrigeren Beleuchtungsstärke untersucht, unabhängig von der spektralen Verteilung. Die Aufmerksamkeit wurde in subjektive und Performance Indikatoren sowie physiologische Indikatoren (hier nicht betrachtet) aufgeteilt. Insgesamt wurden 19 Studien verglichen. Diese sind in Tabelle 2.3 hinsichtlich positiver, negativer und keiner Effekte zusammengefasst. Analog zum Review von Souman et al. [32] zeigten subjektive Indikatoren überwiegend positive Effekte, während Performance-Indi-

katoren seltener positive Effekte und häufiger keine oder negative Effekte ergaben.

Beide Reviews [32, 62] kamen zu dem Schluss, dass die Ergebnisse zum Einfluss von weißem Licht auf die akute Aufmerksamkeit uneinheitlich sind. Ein potenzieller *Publication Bias* (Nichtveröffentlichung von Negativresultaten) wurde von beiden Reviews als weitere Tendenz hinsichtlich nicht ausreichend belegbarer positiver Effekte gewertet. Es wurden mehrere Hauptursachen für die uneinheitlichen Ergebnisse identifiziert. Häufig war die Stichprobengröße (von 6 bis 64) und damit auch die statistische Power zu gering. Eine Beispielberechnung von Souman et al. [32] ergab eine nötige Stichprobengröße von 26, die nur 9 der 68 Studien in [32] erreichten.

Weiterhin wurde bemängelt, dass unterschiedliche Studiendesigns schwer miteinander vergleichbar sind, da die Vorgehensweisen und Anwendungen sehr divers waren: z. B. die Darreichung von Licht u. a. durch Ulbrichtkugeln, Lichtboxen, klassische Leuchten, Bildschirme oder gefilterte Brillen. Teilweise fehlten Details zur Methodik oder Beschreibung des Lichts.

In Hyvärinen 2015 [44] wurden 20 lichttechnische Studien ab 2005 hinsichtlich Methodik und Dokumentation analysiert. Auch hier lautete das Urteil: ungenügende Beschreibung von Methodik und Auswertung sowie oft niedrige statistische Power. Das gleiche Problem wurde in Uttley 2019 [65] aufgezeigt: Auch hier ergab die Analyse von 50 lichttechnischen Studien zu geringe Stichprobengrößen und demzufolge zu geringe statistische Power. Weiterhin wurde bemängelt, dass nur selten Voraussetzungen für die Verwendung parametrischer Tests geprüft oder Effektgrößen berichtet wurden. Dies erhöht das Risiko, potenzielle Typ I oder II Fehler (falsch positive und falsch negative Effekte) zu produzieren. Lok et al. [62] berichteten außerdem, dass eine subjektiv reduzierte Aufmerksamkeit nicht immer eine verminderte Leistung widerspiegelt. Auch sind Erwartungseffekte möglich, da Teilnehmende nicht blind für die Lichtmanipulation sind [62].

Eine gemeinsame systematische Variation von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung innerhalb einer Untersuchung wurde nicht berichtet. Aufgrund begrenzter Kapazitäten wird sich meist auf eine der beiden Größen beschränkt. Insbesondere der Einfluss der spektralen Verteilung tagsüber wurde bisher selten untersucht (in Souman et al. [32] lediglich drei Studien und diese ohne signifikantem Effekt). Für ein umfassendes Verständnis der Wirkung sollte die Interaktion beider Größen untersucht werden. Außerdem wäre es für einen wissenschaftlichen Beleg der Wirkung von Vorteil, wenn die Effekte nicht nur subjektiv, sondern auch mit kognitiven Tests nachgewiesen werden könnten.

In den Reviews [32, 62] werden vor allem kontrollierte Laborstudien betrachtet. Im Gegensatz dazu untersuchte das Cochrane Review *„Workplace lighting for improving alertness and mood in daytime workers“* (2018) [66] Feldstudien an realen Arbeitsplätzen am Tage, weil eine Übertragbarkeit von Laborergebnissen in die Realität eventuell nicht gegeben ist. Cochrane Reviews stehen für *„qualitativ hochwertige, relevante und aktuelle Evidenz aus der Forschung“* [67] und sind daher von großer Bedeutung. Es werden strenge Kriterien an die Qualität der ausgewählten Studien gesetzt. Von 34 Volltexten wurden nur 5 Studien ausgewählt, die diese Kriterien allesamt erfüllen. Ausgeschlossen wurden u. a. Studien, die nicht an realen Arbeitsplätzen stattfanden und Studien mit ungeeignetem Studiendesign (z. B. Querschnitt-Studien). In 3 dieser 5 Studien verbesserte Licht mit einer hohen ähnlichsten Farbtemperatur (*correlated color temperature*, CCT) von 17 000 K (Mills et al. 2007 [22] und Viola et al. 2008 [21]) bzw. blau-angereichertes Licht (Bragard et al. 2013 [68]) Aufmerksamkeit und Stimmung. Die anderen beiden Studien untersuchten verschiedene Anteile von direkter und indirekter Beleuchtung sowie hohe Beleuchtungsstärken morgens im Vergleich zu nachmittags gegen Symptome saisonaler Depressionen und fanden keine signifikanten Unterschiede. Das Urteil für alle Studien hinsichtlich Qualität fiel negativ aus: *„All findings are based on low or very low-quality evidence“* („Alle Ergebnisse basieren auf niedriger oder

sehr niedriger Qualität der wissenschaftlichen Belege“) [66]. Gründe waren die geringe Anzahl Studien und Probanden sowie Probleme im Studiendesign wie beispielsweise fehlende Randomisierung. Die Autoren forderten daher weitere Feldstudien u. a. zur Beleuchtungsstärke, der Kombination von Beleuchtungsstärke mit Lichtfarbe sowie Tageslicht.

Auch die Literaturstudie der Kommission für Arbeitsschutz und Normung (KAN) „Gesicherte arbeitsschutzrelevante Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen” (2018) [69] setzt den Fokus auf Feldstudien, die die praktische Relevanz des Themas aufzeigen sollen. Die Literaturstudie gibt die Sichtweise der Chronobiologie und des Arbeitsschutzes wieder. Als Kriterium wurden Feldstudien am Arbeitsplatz mit mindestens 10 Probanden sowie eine Durchführung ab dem Jahr 2000 gewählt. Dies ergab 13 Studien, von denen drei tagsüber stattfanden und vier die Aufmerksamkeit als Messgröße enthielten. Für das Review wurden nicht-visuelle Wirkungen allgemein betrachtet. Nicht alle Erkenntnisse sind für jede nicht-visuelle Wirkung gleichsam gültig.

Das KAN-Review [69] bemängelte, dass lichttechnische Bedingungen und Methodik in den Studien zum Teil ungenügend dokumentiert waren. Das lichttechnische Gutachten im Anhang des Reviews fordert insbesondere genaue Angaben zur spektralen Verteilung und zum Ort und Ausrichtung der Messgeräte und empfiehlt die Beschreibung der Lichtexposition nach DIN SPEC 5031-100 [70]. Die KAN erbittet im Fazit weitere arbeitsschutzrelevante Studien einerseits aus der Grundlagenforschung und andererseits mehr praxisrelevante Feldstudien insbesondere auch tagsüber. Folgende Einflussparameter des Lichts für nicht-visuelle Wirksamkeit wurden identifiziert: vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe, spektrale Verteilung, Tageszeit, Dauer der Lichtexposition und Lichthistorie des Einzelnen. Diese Parameter sowie deren Interaktion sollten systematisch erforscht werden, da aktuell Angaben noch nicht gesichert sind und konkrete Zahlenwerte fehlen. Außerdem wurden weitere Forschungsfragen aufgestellt: Wie dynamisch muss Beleuchtung gestaltet werden? Sind interindividuelle

Unterschiede (z. B. Chronotyp, Lichthistorie, Alter, Geschlecht und Gesundheitszustand) in der Wirkung von Licht vorhanden? Sind zusätzliche Auswirkungen der Beleuchtung auf Wohlbefinden und Arbeitszufriedenheit möglich?

Die vorgestellten Literaturübersichten zeigen, dass einerseits Licht die akute Aufmerksamkeit beeinflussen kann, aber anderseits der genaue Zusammenhang der verschiedenen lichttechnischen Parameter noch nicht ausreichend erforscht ist. Der nächste Abschnitt 2.3 berichtet den bisherigen Kenntnisstand zu den Parametern detaillierter und zeigt auf, wie die Parameter in Studien berücksichtigt werden. Sowohl Cochrane [66] als auch KAN [69] fordern weitere praxisrelevante Feldstudien. Sie berücksichtigen jedoch nur den Kontext der Arbeitswelt. Der Anwendungsfokus dieser Arbeit richtet sich auf Lernumgebungen. In Abschnitt 2.4 werden daher weitere Feldstudien in diesem Kontext analysiert. Anschließend soll in Abschnitt 2.5 bekanntes Wissen über die Individualität der Menschen in Bezug auf Licht und Aufmerksamkeit zusammengetragen werden.

2.3 Einflussfaktoren des Lichts

Abbildung 2.1: Einflussfaktoren auf die nichtvisuelle Wirkung von Licht nach [69, 71]

Licht besitzt in Bezug auf nicht-visuelle Wirkungen wie die Aufmerksamkeit verschiedene Eigenschaften. Abbildung 2.1 zeigt die wichtigsten Einflussfaktoren des Lichts: vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe, Spektrale Verteilung, Dauer der Exposition, Tageszeit, Lichthistorie und räumliche Verteilung. Die Räumliche Verteilung des Lichts (u. a. Größe der leuchtenden Fläche und Richtung des Lichteinfalls) ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird in allen Experimenten konstant gehalten. Auch die zeitliche Dynamik der Beleuchtung (im Vergleich zu statischer Beleuchtung) beeinflusst die Wirkung auf den Menschen. Der Wissenstand zu den Faktoren wird in diesem Abschnitt nacheinander dargelegt. Der Bedarf an guter Beschreibung der lichttechnischen Größen wurde in den Reviews [16, 32, 62, 69] sowie in [72, 73] identifiziert. Deshalb wird die messtechnische Beschreibung von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung der Literaturanalyse vorangestellt.

2.3.1 Messtechnische Beschreibung der Beleuchtungsstärke und der spektralen Verteilung

Die Beleuchtungsstärke entspricht dem Lichtstrom pro Fläche, wobei die Fläche beliebig gewählt werden kann. Für nicht-visuelle Wirkungen ist die vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe des Probanden sinnvoll – unter der Annahme, dass der Proband überwiegend geradeaus schaut. Ist die Blickrichtung der Probanden anderweitig festgelegt, sollte die Beleuchtungsstärke am Auge in dieser Blickrichtung genutzt werden. Die Augenhöhe ist meist in 1,20 m Höhe bei einer sitzenden Person oder 1,60 m bei einer stehenden Person. In älteren Studien wird häufig die aus der Lichtplanung bekannte horizontale Beleuchtungsstärke auf einer Nutzebene verwendet oder leider gar nicht angegeben, um welche Beleuchtungsstärke es sich handelt. Beides ist für die Bewertung von nicht-visuellen Wirkungen ungeeignet. Eine gute, aber teure Methode ist die bildaufgelöste Messung der Leuchtdichte mit einer Kamera, da dort gleichzeitig Informationen über die Geometrie der leuchtenden Fläche gewonnen werden. Für Feldstudien eignen sich außerdem Dosimeter [74], die die Beleuchtungsstärke am Auge zeitaufgelöst messen. Eine weiterführende Übersicht, welche Messmethoden für welche lichttechnischen Situationen geeignet sind, findet sich in Knoop et al. (2019) [73]. Für die Beschreibung der räumlichen Lichtverteilung werden in dieser Arbeit Leuchtdichtebilder der Versuchsräume dokumentiert.

Die Angabe der Beleuchtungsstärke oder der Leuchtdichte allein reicht jedoch nicht aus, da diese Größen keine Aussage über spektrale Verteilung machen. Die spektrale Verteilung des Lichts besitzt unterschiedliche Formen je nach Lichtquelle z. B. kontinuierliche Wärmestrahlung der Glühlampe, Linienspektren von Leuchtstofflampen oder die charakteristische Form des Tageslichts. LED-Leuchten sind sehr flexibel und können neben der klassischen leuchtstoff-konvertierten LED mit Peak im kurzwelligen Bereich und breitem Anteil Leuchtstoff-Peak auch aus einzelnen LEDs mit diversen Peak-Wellenlängen bestehen.

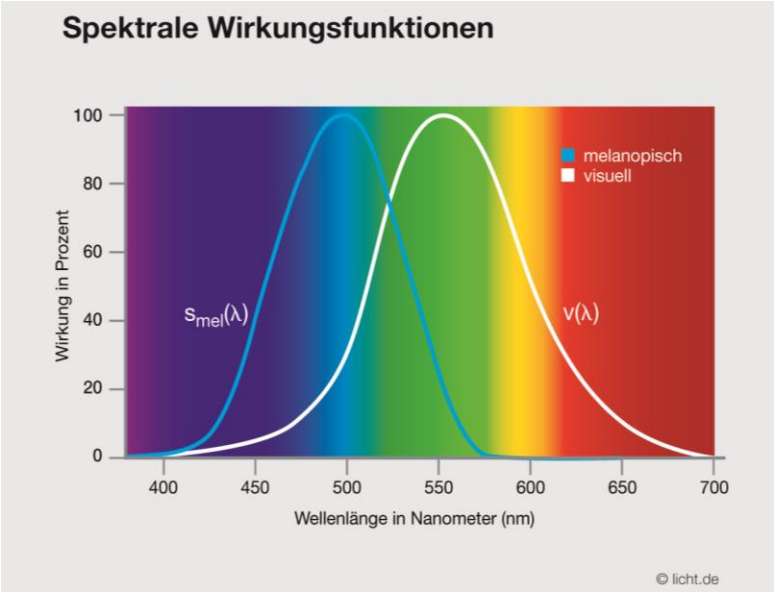


Abbildung 2.2: Aktionsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ der ipRGC-Zellen im Vergleich zur Hellempfindlichkeit V(λ), Bild: licht.de [11]

Seit der Entdeckung der ipRGC-Zellen wird ein Wirkungszusammenhang zur Melatoninsuppression durch Licht und eventuell sogar für weitere nicht-visuelle Wirkungen wie die Aufmerksamkeit [16, 32] angenommen. Das Aktionsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ [16, 70, 75] der ipRGC-Zellen ist in Abbildung 2.2 dargestellt und besitzt sein Maximum bei 480 nm. Dieses ist im Vergleich zur Hellempfindlichkeit V(λ) mit Maximum bei 555 nm deutlich in den kurzwelligen Anteil verschoben. Daher stammt die häufige Annahme, dass blaues oder kurzwelliges Licht nicht-visuelle Wirkungen stärker beeinflusst. Mehrere Kenngrößen zur Beschreibung einer gegebenen spektralen Verteilung werden aktuell angewandt.

Weit verbreitet ist die Charakterisierung der Lichtfarbe durch die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) in Kelvin. Folgende Einteilung ist üblich [76]: warmweiß bis 3 300 K, neutralweiß von 3 300 K–5 300 K und tageslichtweiß ab 5 300 K. Bezogen auf die s_{mel} (λ)-Funktion entsprechen hohe

Farbtemperaturen meist einer höheren Wirksamkeit als niedrigere. Diese Charakterisierung ist jedoch ungenau, da gerade bei LEDs verschiedene Spektren mit der gleichen CCT beschrieben werden [77].

Einen direkten Bezug zum Aktionsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ der ipRGCs bietet der melanopische Wirkungsfaktor a_{mel}, der nach DIN SPEC 5031-100:2015 [70] folgendermaßen definiert ist:

$$a_{mel} = \frac{\int_{380\ nm}^{780\ nm} X_\lambda(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380\ nm}^{780\ nm} X_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}$$

Er stellt das Verhältnis aus melanopisch mit $s_{mel}(\lambda)$ bewerteter Strahlungsgröße $X_\lambda(\lambda)$ zu photopisch mit $V(\lambda)$ bewerteter Strahlungsgröße $X_\lambda(\lambda)$ dar. Die Strahlungsgröße $X_\lambda(\lambda)$ kann beispielsweise die Bestrahlungsstärke oder die Strahldichte sein. Für Normlichtart A (Glühlampe bei CCT = 2 856 K) beträgt a_{mel} = 0,45 und Normlichtart D65 („Tageslicht“) a_{mel} = 0,91. LEDs können je nach Zusammensetzung Werte innerhalb dieses Bereiches als auch darüber oder darunter erreichen.

Möchte man auch den absoluten Beitrag der spektralen Verteilung zur melanopischen Wirkung mit einbeziehen, kann z. B. die melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke E_{mel} [70] verwendet werden:

$$E_{mel} = \int_{380\ nm}^{780\ nm} E_\lambda(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda$$

In dieser Größe werden sowohl Bestrahlungsstärke als auch spektrale Wirksamkeit nach $s_{mel}(\lambda)$ vereint. Nachteil beider Größen ist einerseits die geringe Verbreitung insbesondere im internationalen Kontext und die geringere Anschaulichkeit im Vergleich zur ähnlichsten Farbtemperatur. Außerdem gelten beide Grüßen explizit nur für die ipRGC-Zellen und demnach nur für nicht-visuelle Größen, die durch diese Zellen gesteuert werden. Für die Aufmerksamkeit ist das bisher nicht nachgewiesen [78]. Da einige der oben zitierten Studien einen positiven Einfluss hoher CCTs oder „blau-angereicherten“ Lichts auf die

Aufmerksamkeit fanden, wäre es möglich, dass sich die Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit ebenfalls durch $s_{mel}(\lambda)$ beschreiben lässt und diese Metrik dementsprechend anwendbar ist.

Eine international anerkannte Methode ist die Verwendung von α-opischen Bestrahlungsstärken [75, 79], die ihren Ursprung in der Methode von Lucas et al. 2014 [16] hat. Dabei wird die spektrale Verteilung einzeln mit den Wirkspektren aller Fotorezeptoren bewertet. So können die Beiträge der Fotorezeptoren separat betrachtet werden und sollte in Zukunft eine neue Bewertungsfunktion für nicht-visuelle Wirkungen gefunden werden, kann diese nachträglich auf die vorhandenen Daten angewandt werden. Für die Berechnung existiert eine frei im Internet zugängliche Toolbox der CIE [79].

Für die Experimente in dieser Arbeit werden sowohl der melanopische Wirkungsfaktor als auch die α-opischen Bestrahlungsstärken verwendet sowie zur verbesserten Anschaulichkeit ebenso die ähnlichste Farbtemperatur.

2.3.2 Beleuchtungsstärke

Sowohl Souman et al. [32] als auch Lok et al. [62] zeigten viele Studien mit mehrheitlich positiver Wirkung erhöhter Beleuchtungsstärken auf die subjektive Aufmerksamkeit. Aber beide fanden auch einen erheblichen Anteil an Studien, die keinen Effekt bestätigen konnten. Die untersuchten Beleuchtungsstärken in [32] und [62] reichen von 360 lx bis 8 000 lx bei der hohen Beleuchtungsstärke und < 5 lx bis 400 lx bei der niedrigen Beleuchtungsstärke. Häufig werden 1 000 lx bis 2 000 lx mit 100 lx bis 300 lx oder < 10 lx verglichen. Eine Tendenz, welche Beleuchtungsstärken positive Effekte und welche keine Effekte hervorrufen, lässt sich aus [32] und [62] nicht ablesen.

Als Beispiel sollen drei möglichst vergleichbare und aktuelle Studien dienen. Diese zusammenzustellen war nicht einfach, da oft sehr verschiedene Methoden und Lichtszenarien angewendet werden. In

Tabelle 2.4 sind drei niederländische Studien von Smolders et al. [17], Huiberts et al. [27] und Te Kulve et al. [80] aufgelistet, die eine hohe vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe (1000 lx bis 1700 lx) mit einer Referenz-Beleuchtungsstärke (5 lx bis 200 lx) vergleichen.

Tabelle 2.4: Beispiel von 3 Studien zum Einfluss der Beleuchtungsstärke auf Aufmerksamkeit und Performance mit unterschiedlichen Resultaten

Studie	**Smolders et al. 2015 [17]**	**Huiberts et al. 2016 [27]**	**Te Kulve et al. 2017 [80]**
Beleuchtungsstärke hell	1000 lx	1700 lx	1200 lx
Beleuchtungsstärke dunkel	200 lx	150 lx	5 lx
Effekt auf subjektive Aufmerksamkeit	**Ja**	**Nein**	**Ja**
Effekt auf Performance	**Ja**	**Nein**	**Nein**
Testmethode	KSS, PVT	KSS, PVT	KSS, PVT
CCT	4700 K	4000 K	4000 K
Dauer Exposition	52 min	55 min	90 min
Tageszeit	Morgens, nachmittags	Morgens, nachmittags	Morgens
Anzahl Probanden	32	39	19

Eine Studie fand sowohl positive Effekte bei subjektiver Aufmerksamkeit und Performance, eine nur bei subjektiver Aufmerksamkeit und nicht bei Performance, und eine weder noch. Es fällt schwer, zu entscheiden, welche Studie aussagekräftiger ist. Die Farbtemperatur war mit 4000 K bis 4700 K bei allen Studien vergleichbar und es wurden dieselben Messgrößen für die Aufmerksamkeit verwendet. [80] hatte mit 90 min eine etwas längere Expositionszeit und mit 19 Probanden eine kleinere Stichprobe als die anderen beiden Studien. Expositionszeit und Probandenanzahl waren nahezu gleich bei [17] und [27], jedoch fand [17] signifikante Effekte und [27] nicht. In [27] war die Differenz der Beleuchtungsstärken mit 1550 lx am größten und dennoch fanden sich hier keine Effekte. Souman et al. [32] vermuteten eine zu hohe

Beleuchtungsstärke der dunklen Referenzbeleuchtung (Baseline) von mehr als 100 lx vertikal auf Augenhöhe als Grund für das Ausbleiben von Effekten. Sowohl 200 lx in [17] (positive Effekte) als auch 150 lx in [27] (keine Effekte) überschreiten diesen Wert, während [80] (gemischte Effekte) mit 5 lx weit darunter liegt. Eine Differenzierung der Studienbedingungen dieser drei Studien bringt demnach keine weitere Klarheit, inwiefern eine erhöhte Beleuchtungsstärke die Aufmerksamkeit verbessern kann.

Eine Zusammenfassung der nachfolgenden Studien ist in Tabelle 2.5 aufgelistet. Cajochen et al. [15] stellten im Jahr 2000 eine Dosis-Wirkungs-Kurve für die subjektive Aufmerksamkeit (gemessen mit der KSS) auf. Sie variierten die vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe systematisch von 3 lx bis 9 100 lx. Der Übergang von müde zu wach befand sich bei 70 lx bis 200 lx und 100 lx entsprachen 50 % der Wirkung. Die maximale Wirkung wurde ab 300 lx erreicht und ging dann in Sättigung über. Diese Kurve wurde jedoch nachts und nach einer mehrstündigen Dunkeladaptation (< 3 lx) bei einer 6,5 h Lichtexposition aufgenommen und ist damit nicht auf Situationen tagsüber übertragbar.

Zwei Studien von Lok et al. 2018 [26] und Smolders et al. 2018 [81] scheiterten daran, solch eine Dosis-Wirkungs-Kurve für die Aufmerksamkeit tagsüber über mehrere Beleuchtungsstärken (20 lx bis 2 000 lx für 1 h) aufzustellen, da keine ausreichenden signifikanten Effekte nachgewiesen werden konnten. Sie schlussfolgerten, dass vertikale Beleuchtungsstärken auf Augenhöhe bis 2 000 lx tagsüber keine Verbesserung der Aufmerksamkeit an gesunden Probanden ohne erschwerte Bedingungen (z. B. Schlafentzug) bewirken.

Insbesondere bei kognitiven Tests sind bisher wenig Berichte über signifikante positive Effekte vorhanden. Im Review von Souman et al. [32] gab es nur zwei Studien, die einen positiven Effekt bei Reaktionszeittests fanden. Phipps-Nelson et al. 2003 [18] zeigten, dass eine Exposition am Nachmittag mit hellem Licht bei 1 000 lx im Vergleich zu dunklem Licht bei < 5 lx die Reaktionszeit verbesserte. Es handelte

sich jedoch um eine besondere Situation, da die Probanden zwei Nächte mit Schlafentzug hinter sich hatten und möglicherweise besonders empfindlich reagierten. In Smolders et al. 2012 [82] fand sich der positive Effekt von heller Beleuchtung (1 000 lx vs. 200 lx) auf die Reaktionszeit nur am Morgen und nicht am Nachmittag. Beide Studien sind daher nicht gut verallgemeinerbar.

In Tanaka et al. 2011 [19] führte hohe Beleuchtungsstärke (5 400 lx bis 8 800 lx) für 10 min am Morgen zu weniger Müdigkeit (KSS) und besserer Leistung im Reaktionstest PVT im Vergleich zu keiner Exposition. Auch Yoon et al. 2002 [83] zeigten eine bessere Leistung (Backward Masking Test und Digit Symbol Substitution Test, beides am PC) bei 4 h hellem Licht (4 000 lx bis 6 000 lx), jedoch nachts. Beide Studien untersuchten Krankenpfleger an realen Arbeitsplätzen im Schichtbetrieb.

Einige Studien berichten weiterhin widersprüchliche oder negative Effekte von hohen Beleuchtungsstärken. Bei Leichtfried et al. 2015 [84] verbesserte erhöhte Beleuchtungsstärke (5 000 lx und 6 500 K vs. 400 lx und 4 000 K für 30 min) am Morgen Stimmung und subjektive Aufmerksamkeit, aber verschlechterte mentale Performance, was dort auf mögliche Blendung zurückgeführt wurde. In Huiberts et al. 2017 [85] führte hohe Beleuchtungsstärke (1 700 lx vs. 165 lx bei 4 000 K) zu schlechterer Leistung bei einer schwierigen Arbeitsgedächtnisaufgabe im Winter. Andere Messgrößen (KSS, PVT) wurden dort positiv von hoher Beleuchtungsstärke beeinflusst. Auch bei Smolders und de Kort 2014 [86] offenbarte sich bei zwei Messgrößen (Go-NoGo-Test und 2-Back-Test) ein leistungsschwächender Effekt von hoher Beleuchtungsstärke (1 000 lx vs. 200 lx bei 4 000 K). Sowohl KSS und PVT wurden jedoch positiv von hoher Beleuchtungsstärke beeinflusst. Borragán et al. 2017 [24] fanden keine signifikanten Effekte von hoher Beleuchtungsstärke auf die Aufmerksamkeit. Badia et al. 1991 [87] und Daurat et al. 1993 [88] zeigten nur positive Effekte in der Nacht und nicht am Tag. Ein systematischer Unterschied zwischen den Studien, die einen positiven Effekt und den Studien, die keine oder gemischte Effekte finden, konnte bisher nicht gefunden werden.

Tabelle 2.5: Übersicht der Studien zur Beleuchtungsstärke

Studie	Lichtszenen	Effekt auf subjektive Aufmerksamkeit (Testmethode)	Effekt auf Performance (Testmethode)	Dauer Exposition	Tageszeit	Anzahl Probanden
Cajochen et al. 2000 [15]	Mehrere Stufen 3 lx–9 100 lx	Ja (KSS)	-	6,5 h	Nacht	23
Lok et al. 2018 [26]	24 lx, 74 lx, 222 lx, 666 lx, 2 000 lx bei 5 800 K	Nein (KSS)	Nein (Go-NoGo)	1 h	Tag	50
Smolders et al. 2018 [81]	20 Stufen 20 lx–2 000 lx bei 4 000 K	Nein (KSS)	Nein (PVT, Go-NoGo, 2-Back)	1 h	Morgen, Nachm.	60
Phipps-Nelson et al. 2003 [18]	1 000 lx vs. < 5 lx	Ja (KSS)	Ja (PVT)	5 h	Nachm.	16
Smolders et al. 2012 [82]	1 000 lx vs. 200 lx bei 4 000 K	Ja (KSS)	Nur Morgens (PVT), Nein (letter digit substitution test)	1 h	Morgen, Nachm.	32
Tanaka et al. 2011 [19]	5 400–8 000 lx vs. keine Beleuchtung	Ja (KSS)	Ja (PVT)	10 min	Morgen	61
Yoon et al. 2002 [83]	4 000 lx–6 000 lx vs. 100 lx–500 lx	Ja (VAS)	Ja (backward masking test, digit symbol substitution test)	4 h	Nacht	12
Leichtfried et al. 2015 [84]	5 000 lx bei 6 500K vs. 400 lx bei 4 000K	Ja (VAS)	Nein (sustained attention)	30 min	Morgen	33
Huiberts et al. 2017 [85]	1 700 lx vs. 165 lx bei 4000K	Ja (KSS)	Ja (PVT), Nein (backward digital span task)	52 min	Morgen, Nachm.	73
Smolders und de Kort 2014 [86]	1 000 lx vs. 200 lx bei 4 000 K	Ja (KSS)	Ja (PVT), Nein (Go-NoGo, 2-Back)	30 min	Morgen, Nachm.	28
Badia et al. 1991 [87]	5 000 lx vs. 50 lx	Nein Tag, Ja Nacht	Nein Tag, Ja Nacht (performance assessment battery)	1,5 h	Tag, Nacht	8
Borragán et al. 2017 [24]	2 000 lx vs. <200 lx	Nein (KSS)	Nein (PVT)	20 min	Nachm.	20
Daurat et al. 1993 [88]	2 000 lx vs. 150 lx	Nein Tag, Ja Nacht (VAS)	Nein Tag, Ja Nacht	24 h	Tag, Nacht	8

2.3.3 Spektrale Verteilung

Das Wissen um die Beleuchtungsstärke allein reicht nicht aus, um Aussagen über die Wirksamkeit von Licht auf die Aufmerksamkeit zu treffen. Die spektrale Verteilung muss ebenfalls bekannt sein. In diesem Abschnitt werden Hinweise analysiert, ob ein erhöhter kurzwelliger Anteil in der spektralen Verteilung positiv auf die Aufmerksamkeit wirken könnte. Dies hätte in der Anwendung den Vorteil, dass der energetische Mehraufwand und demnach die Kosten in der Umsetzung deutlich geringer als bei erhöhter Beleuchtungsstärke ausfallen. Eine Übersicht der Studienlage findet sich in Tabelle 2.6. Die Mehrzahl dieser Studien wurde am späten Abend oder nachts durchgeführt. Diese werden zuerst näher beleuchtet.

Im Review von Souman et al. [32] sind sechs Studien enthalten, in denen die spektrale Verteilung verändert wurde, indem Licht mit herausgefiltertem Blauanteil (z. B. durch getönte Brillen) gegenüber ungefiltertem Licht untersucht wurde. Blaugefiltertes Licht bewirkte in diesen Studien eine verminderte Melatoninsuppression im Vergleich zu ungefiltertem Licht. Ein Unterschied bei der Aufmerksamkeit trat nicht auf, außer bei Rahman et al. 2011 [89]. Dort war die Aufmerksamkeit sogar verbessert im Vergleich zur ungefilterten Beleuchtung, was der Hypothese des Vorteils von blauem Licht widerspricht. Eine weitere Studie von Gimenez et al. 2014 [90] untersuchte ebenfalls Blaulichtfilterung durch Brillen in der Nacht und fand keinen Einfluss auf die Wachheit.

Weitere sechs Studien aus dem Review [32] untersuchten eine hohe ähnlichste Farbtemperatur (4 667 K bis 17 000 K) im Vergleich zu einer niedrigen Farbtemperatur (2 000 K bis 4 775 K) abends bzw. nachts. Drei dieser Studien fanden einen positiven Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit. Teilweise wurde gleichzeitig die Beleuchtungsstärke erhöht, was einen Rückschluss auf den Effekt der spektralen Verteilung erschwert. Chellappa et al. (2011) [20] verglichen 6 500 K mit 2 500 K bzw. 3 000 K bei 40 lx für 2 h mit 16 Probanden. Sie zeigten verbesserte

subjektive Aufmerksamkeit (KSS, VAS) und Reaktionszeiten bei PVT und Go-NoGo-Test bei 6 500 K. Bei einer schwierigeren Aufgabe, die exekutive Funktionen verlangt, ergab sich jedoch keine Verbesserung. Cajochen et al. (2011) [91] fanden einen positiven Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit durch einen LED-hinterleuchteten Bildschirm (6 953 K) im Vergleich mit einem nicht LED-hinterleuchteten Bildschirm (4 775 K) für 5 h. Wahnschaffe et al. (2013) [92] variierten Farbtemperaturen bei verschiedenen Beleuchtungsstärken für je 30 min. Ein positiver Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit trat im Vergleich zu dunkler Baseline (< 10 lx) ein für 6 000 K & 130 lx, 5 000 K & 500 lx, 2 800 K & 500 lx, aber nicht für 6 000 K & 500 lx und 2 000 K & 130 lx. Hier hatte demnach eine hohe Farbtemperatur nur bei geringer Beleuchtungsstärke und nicht jedoch bei hoher Beleuchtungsstärke positive Auswirkungen. Diese Studie zeigte eine Interaktion von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung am Abend. Ob sich diese Interaktion auch tagsüber zeigt, sollte weiter erforscht werden. Da im Vergleich zur dunklen Referenzbeleuchtung stets auch die Beleuchtungsstärke mit erhöht wurde, kann bei [92] kein Rückschluss auf den alleinigen Einfluss der spektralen Verteilung gezogen werden.

Santhi et al. fanden sowohl bei einer Studie am Abend (2012) [93] und am Morgen (2013) [94] keine Unterschiede in der Wirkung der spektralen Verteilung auf subjektive Aufmerksamkeit (KSS) und kognitive Tests (PVT). In der Abendstudie verglichen sie 2 700 K bei 135 lx mit 17 000 K bei 135 lx und 700 lx und in der Morgenstudie 2 600 K bei 200 lx mit 7 700 K bei 200 lx und 7 300 K bei 750 lx jeweils für 4 h. Auch bei Canazei et al. 2016 [95] hatten verschiedene Farbtemperaturen (2 116 K, 3 366 K und 4 667 K) keinen Einfluss auf die Reaktionszeit beim PVT in der Nacht.

In Hanifin et al. (2019) [96] wurden 17 000 K mit 4 000 K bei gleicher Photonendichte (und E_v = 130 lx) mit jeweils 10 Probanden pro Lichtfarbe für 6,5 h bei Nacht und stündlicher Testung verglichen. 17 000 K zeigte einen signifikanten positiven Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit (KSS), aber nicht auf die objektive Aufmerksamkeit bei

einer visuellen und auditiven Reaktionszeitaufgabe (PVT). Bei Rahman et al. (2017) [97] war es umgekehrt: subjektive Aufmerksamkeit unterschied sich nicht und Reaktionszeiten waren langsamer bei blau-verminderten LEDs im Vergleich zu Standardleuchtstofflampen mit 4 100 K und 50 lx. Dabei wurden 16 Probanden in einem randomisierten cross-over Design für 8 h vor der Schlafenszeit der Beleuchtung ausgesetzt. Eine Studie von Sletten et al. (2017) [98] mit simulierten Nachtschichten und blau-angereichertem weißen Licht (17 000 K, 89 lx, N = 36) vs. Standard weißem Licht (4 000 K, 84 lx, N = 35) zeigte keine Effekte der Beleuchtung auf subjektive und objektive Aufmerksamkeit.

Deutlich weniger Studien zur spektralen Verteilung wurden tagsüber durchgeführt. Im Cochrane Review [66] wurden drei Studien tagsüber am Arbeitsplatz betrachtet. Zwei Studien (Mills et al. (2007) [22] und Viola et al. (2008) [21]) mit insgesamt 163 Probanden untersuchten eine hohe ähnlichste Farbtemperatur von 17 000 K im Vergleich zu Standardfarbtemperaturen von 2 900 K bzw. 4 000 K bei vergleichbarer Beleuchtungsstärke. Beide fanden einen positiven Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit (KSS) und keinen Unterschied in der Stimmung (PANAS *Positive and Negative Aspect Schedule*). Die dritte Studie von Bragard et al. (2013) [68] untersuchte an 25 Probanden eine „blau-angereicherte“ Lichtexposition (LED-Brillen) für 30 min am Morgen im Vergleich zu keiner Exposition. Subjektive Aufmerksamkeit (*Epworth Sleepiness Scale*) und Stimmung (*Beck Depression Inventory*) waren verbessert in der Variante mit Lichtexposition.

Shamsul et al. 2013 [99] variierten im Laborexperiment die ähnlichste Farbtemperatur (3 000 K vs. 4 000 K vs. 6 500 K) tagsüber an 47 Probanden. Die Testleistung und subjektive Aufmerksamkeit (Sehschärfe und Kontrast im FrACT-test mit Landolt-Ringen, KSS) waren bei 6 500 K am besten, während 4 000 K am komfortabelsten (*Office Lighting Survey*) bewertet wurden. Auch in Choi et al. (2019) [100] verbesserte sich die subjektive Einschätzung von Müdigkeit (KSS), sowie ebenfalls die Stimmung und der visuelle Komfort (VAS), bei 6 500 K im Vergleich zu 3 500 K (beides bei 500 lx). 15 Studierende wurden um 9 Uhr morgens

für 1 h randomisiert mit der jeweiligen Farbtemperatur beleuchtet, nachdem sie mit dunkler Brille ins Labor kamen und 1 h Dunkelheit < 10 lx ausgesetzt waren. Die Daten stammen aus einer größeren Studie inklusive abendlicher Untersuchung am Vortag.

Eine weitere Studie von Figueiro et al. (2018) [101] an insgesamt 94 Büromitarbeitern in drei Ländern zeigte ebenfalls einen positiven Einfluss einer Intervention mit erhöhten Blauanteilen in der spektralen Verteilung auf subjektive Aufmerksamkeit im Vergleich zu vor der Intervention. In Hartstein et al. (2017) [102] wurden 5000 K LEDs mit 3500 K Leuchtstofflampen verglichen. Zwei von drei kognitiven Tests zeigten eine Verbesserung bei höherer Farbtemperatur, jedoch in einem Test nur für Frauen und im anderen Test nur für Männer.

Ein Widerspruch zur Annahme, dass nur blaues Licht von Bedeutung wäre, zeigte sich in Sahin et al. 2014 [103]. Sowohl weißes Licht (2568 K, 361 lx, 1,1 W/m² vertikal auf Augenhöhe) als auch rotes Licht (λ_{max} = 631 nm, 213 lx, 1,1 W/m² vertikal auf Augenhöhe), welches außerhalb der spektralen Empfindlichkeit der ipRGC-Zellen liegt, verbesserten hier die Leistungsfähigkeit bei Performance-Tests tagsüber im Vergleich zur dunklen Referenz (< 5 lx).

Studien tagsüber zeigen ebenfalls keine oder negative Effekte. In Smolders und de Kort (2017) [104] ergab ein Vergleich von 2700 K mit 6000 K sowohl morgens als auch nachmittags keine Unterschiede bei akut aktivierenden Effekten. Auch in St Hilaire et al. (2017) [25] hatte die Farbtemperatur (4100 K bei 200 lx vs. 17000 K bei 200 lx und 400 lx für 3,5 h am Morgen nach mehreren Nächten mit Schlafentzug) keinen Effekt auf die Leistung beim PVT. Die Feldstudie von Wei et al. (2014) [105] beobachtete eine schlechtere Selbsteinschätzung der Produktivität bei 5000 K im Vergleich zu 3500 K, insbesondere in Büros mit vorhandenem Tageslicht. In Burattini et al. (2019) [106] führten 6800 K im Vergleich zu 3000 K zu besserer Leistung in einer visuellen Vigilanzaufgabe jedoch nicht in einer auditiven Vigilanzaufgabe.

Tabelle 2.6: Übersicht der Studien zur spektralen Verteilung

Studie	Lichtszenen	Effekt auf subjektive Aufmerksamkeit (Testmethode)	Effekt auf Performance (Testmethode)	Dauer Exposition	Tageszeit	Anzahl Probanden
Chellappa et al. 2011 [20]	6500 K vs. 2500 K bzw. 3000 K bei 40 lx	Ja (KSS, VAS)	Ja (PVT, Go-NoGo), Nein (Paced Visual Serial Addition Task)	2 h	Abend	16
Cajochen et al. 2011 [91]	6953 K vs. 4775 K bei 250 cd/m²	Ja (KSS)	Ja (Go-NoGo)	5 h	Abend	13
Wahn-schaffe et al. 2013 [92]	2000 K bei 130 lx, 2800 K bei 500 lx, 5000 K bei 500 lx, 6000 K bei 130 lx und 500 lx vs. < 10 lx	Ja (KSS)	-	0,5 h	Abend	9
Santhi et al. 2012 [93]	2700 K bei 135 lx, 17000 K bei 135 lx und 700 lx	Nein (KSS)	-	4 h	Abend	22
Santhi et al. 2013 [94]	2600 K bei 200 lx, 7700 K bei 200 lx, 7300 K bei 750 lx	Nein (KSS)	Nein (PVT)	4 h	Morgen	11
Canazei et al. 2016 [95]	2116 K bei 49 µW/cm², 3366 K bei 46 µW/cm², 4667 K bei 44 µW/cm²	-	Nein (PVT)	5 h	Nacht	31
Hanifin et al. 2019 [96]	17000 K vs. 4000 K bei 130 lx	Ja (KSS)	Nein (PVT)	6,5 h	Nacht	je 10
Rahman et al. 2017 [97]	"blau verminderte LED" (a_{mel} = 0,39) vs. Standard-FL (a_{mel} = 0,63) bei 50 lx	Nein (KSS)	Ja (PVT)	8 h	Nachm. bis Abend	16
Sletten et al. 2017 [98]	17000 K bei 89 lx vs. 4000 K bei 84 lx	Nein	Nein	8 h	Nacht	je 35
Mills et al. 2007 [22]	17000 K bei 170 lx, 2900 K bei 130 lx	Ja (Columbia Jet Lag Scale)	-	3 Monate	Tag	69

Tabelle 2.6 Fortsetzung: Übersicht der Studien zur spektralen Verteilung

Studie	Lichtszenen	Effekt auf subjektive Aufmerksamkeit (Testmethode)	Effekt auf Performance (Testmethode)	Dauer Exposition	Tageszeit	Anzahl Probanden
Viola et al. 2008 [21]	17 000 K vs. 4 000 K	Ja (KSS)	-	1 Monat	Tag	94
Bragard et al. 2013 [68]	"blau-angereicherte" LED-Brillen vs. keine Exposition	Ja (Epworth Sleepiness Scale)	-	0,5 h für 1 Monat	Morgen	25
Shamsul et al. 2013 [99]	3 000 K vs. 4 000 K vs. 6 500 K bei gleicher Leuchtdichte	Ja (KSS)	Ja (FrACT-Test)	50 min	Tag	47
Choi et al. 2019 [100]	6 500 K vs. 3 500 K bei 500 lx	Ja (KSS)	-	1 h	Morgen	15
Figueiro et al. 2018 [101]	Kaltweiße LEDs 6 000 K o. blaue LEDs 470 nm vs. keine Intervention	Ja (KSS)	-	2 Tage	Tag	94
Hartstein et al. 2017 [102]	5 000 K LED vs. 3 500 K FL bei 350 lx	-	Ja (Go-NoGo, task switching task) Nein (mental rotation task)	0,5 h	Morgen	40
Sahin et al. 2014 [103]	Weiß 2 568 K bei 361 lx, Rot 631 nm bei 213 lx vs. < 5 lx	Nein (KSS)	Ja (Go-NoGo)	2 h	Tag	16
Smolders, de Kort 2017 [104]	6 000 K vs. 2 700 K bei 500 lx	Nein	Nein		Morgen, Nachm.	39
St. Hilaire et al. 2017 [25]	4 100 K bei 200 lx, 17 000 K bei 200 lx und 400 lx	-	Nein (PVT)	3,5 h	Morgen	8
Wei et al. 2014 [105]	5 000 K vs. 3 500 K	Negativ (subjektive Produktivität)	-	je 14 Tage	Tag	26
Burattini et al. 2019 [106]	6 800 K vs. 3 000 K bei 290 lx	Nein (KSS)	Ja (PVT visuell) Nein (PVT auditiv)	1 h	Morgen	40

2.3.4 Dauer der Exposition

Die Dauer der Lichtexposition ist ein wichtiger Parameter im Studiendesign. Ein Blick in die Übersichtsarbeiten [32, 66] zeigt, dass die Dauer sehr variabel ist und von 5 min bis 24 h reicht. Souman et al. [32] stellten eine Übersicht Dauer vs. Effekt ja/nein auf, aus der jedoch kein Zusammenhang zwischen der Dauer und dem Finden eines bzw. keines Effekts ableitbar war. Sowohl Studien mit kurzer als auch mit langer Dauer zeigten Effekte oder berichteten über ausbleibende Effekte.

Chang et al. (2012) [107] variierten die Dauer der Lichtexposition von 10 000 lx nachts an 39 Probanden: 0,2 h, 1 h, 2,5 h, 4 h und 6,5 h. Außerhalb der Lichtexposition und in einer Kontrollgruppe herrschte eine Beleuchtungsstärke von 1 lx vor. Der Zusammenhang zur circadianen Phasenverschiebung, Melatoninsuppression und subjektiver Aufmerksamkeit (KSS) war nicht linear und kürzere Zeiten wirkten effizienter, wobei eine Dauer von 0,2 h am effizientesten war. Dies könnte bedeuten, dass die Rezeptoren bei längeren Expositionsdauern adaptieren und dann weniger wirkungsvoll arbeiten.

Im Gegensatz dazu schreiben Dewan et al. (2011) [108], dass eine Verlängerung der Dauer effektiver als eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke war. 56 Probanden wurden nachts randomisiert folgenden Bedingungen ausgesetzt: 2 000 lx, 4 000 lx oder 8 000 lx vertikal auf Augenhöhe für 1 h, 2 h oder 3 h. Die circadiane Phasenverschiebung fiel stärker aus bei längerer Dauer, jedoch nicht bei höherer Beleuchtungsstärke. Hier wurde jedoch keine Aufmerksamkeit gemessen und der Startwert von 2 000 lx ist bereits eine hohe Beleuchtungsstärke, was keinen Zusatzeffekt einer weiteren Steigerung erwarten lässt.

In einigen Studien tagsüber zeigte die Dauer der Exposition einen moderierenden Effekt auf die Ergebnisse [82, 86, 109, 110], das heißt die Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit war verschieden je nach Dauer. Die gefundenen Effekte sind üblicherweise nicht anhaltend, so

verschwinden die Effekte z. B. in Vandewalle et al. [111] 10 min nach der Lichtexposition wieder.

2.3.5 Tageszeit

Grundsätzlich lässt sich unterscheiden, ob Studien in der Nacht oder am Tag durchgeführt werden. Viele Studien untersuchen Aufmerksamkeit als ein Teil der circadianen Effekte von Licht (z. B. gleichzeitig mit Melatoninsuppression oder Phasenverschiebung) und finden demnach nachts statt. Diese Studien können nicht direkt auf die Situation tagsüber übertragen werden, weil verschiedene Bedingungen vorherrschen (Wachzustand, circadianer Rhythmus, Tageslichteinfluss, siehe dazu auch Cajochen et al. (2007) [112]). Abbildung 2.3 zeigt den circadianen Verlauf der Leistungsbereitschaft des Menschen. In der biologischen Nacht ist sie minimal und demnach wird hier eine maximale aktivierende Wirkung von Licht erwartet [112]. Nachts soll Licht anwachsender Müdigkeit entgegenwirken und ein Zusammenhang zur Melatonin-suppression ist möglich. Tagsüber ist dies nicht der Fall und die Leistungsbereitschaft ist grundsätzlich deutlich höher. Eine Lichtexposition soll hier kurzfristige Müdigkeitsphasen kompensieren und die akute Aufmerksamkeit weiter steigern. Zusammenhänge zum Chronotyp eines Menschen (siehe Abschnitt 2.5) oder zur Lichthistorie (nächster Abschnitt) in der entsprechenden Tageszeit sind ebenfalls denkbar.

Werden in der Literaturübersicht von Souman et al. [32] am späten Abend und in der Nacht durchgeführte Studien nicht berücksichtigt, bleiben deutlich weniger positive Funde auf subjektive Aufmerksamkeit übrig. Fanden Souman et al. noch insgesamt 38 Studien zum Einfluss der Beleuchtungsstärke unabhängig von der Tageszeit, waren es bei Lok et al. [62] nur noch 19 Studien mit Bedingung Durchführung am Tag und ebenfalls weniger häufig positive Effekte auf subjektive Aufmerksamkeit. Souman et al. [32] überprüften, ob der Umstand, dass Studien ein oder kein signifikantes Ergebnis fanden, mit der Tageszeit und der Zeit des Wachseins korrelierten und fanden keinen klaren Zusammenhang.

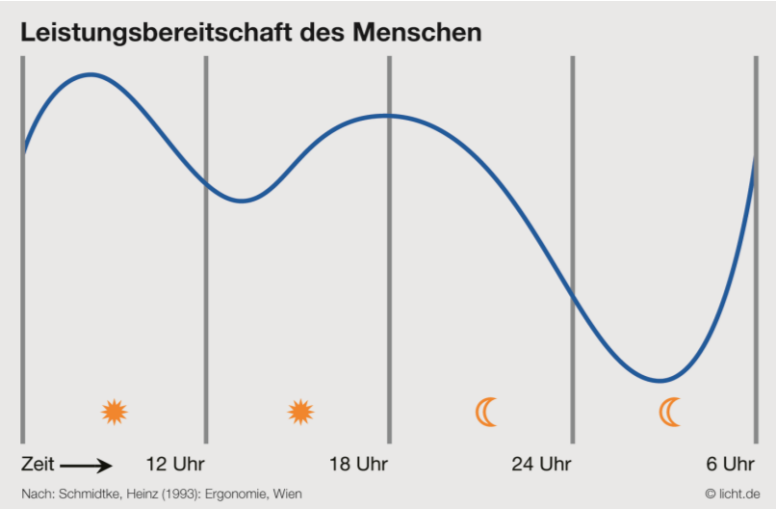


Abbildung 2.3: Circadianer Tagesverlauf der Leistungsbereitschaft, Bild: licht.de [11]

Rüger et al. (2006) [113] verglichen die Exposition von hellem Licht (5 000 lx) zu verschiedenen Uhrzeiten miteinander: 0 Uhr, 4 Uhr, 12 Uhr und 16 Uhr. Die Tageszeit (nachts vs. tags) hatte Einfluss auf Herzschlagrate und Körperkerntemperatur, jedoch nicht auf Schläfrigkeit (KSS) und Erschöpfung (VAS) (beides wurde zu allen Tageszeiten von hellem Licht verbessert).

Hingegen hatte die Tageszeit (vormittags vs. nachmittags) Einfluss auf die Ergebnisse von heller Beleuchtung (1 700 lx vs. 165 lx vertikal auf Augenhöhe) auf Performance in zwei Studien von Huiberts et al. (2015) [109] und (2017) [85]. Interessanterweise fanden sich 2015 sowohl positive als auch negative Effekte nur nachmittags, während die Effekte 2017 nur vormittags auftraten. Bei Smolders et al. (2012) [82] waren subjektive Effekte heller Beleuchtung (1 000 lx vs. 200 lx vertikal auf Augenhöhe) tageszeitunabhängig und Performance Effekte morgens besonders ausgeprägt. Eine finnische Studie im Hörsaal [23] fand wiederum Effekte hoher ähnlichster Farbtemperatur (17 000 K vs.

4000 K) auf subjektive Aufmerksamkeit (KSS) ausschließlich am Nachmittag und nicht am Morgen.

2.3.6 Lichthistorie

Es wird angenommen, dass die Lichthistorie (Beleuchtung vor dem eigentlichen Experiment) die Effektstärke der Lichtexposition beeinflusst [69]: Sind Probanden vor dem Experiment Dunkelheit ausgesetzt (z. B. morgens im Winter oder durch gezielte Dunkeladaptation), fällt der erwartete Effekt wahrscheinlich größer aus, als wenn Probanden bspw. vorher ausgiebig in der Sonne spazieren. Die Lichthistorie ist demnach eng mit der Jahreszeit und dem resultierenden Angebot an Tageslicht verknüpft.

Einige Studien untersuchten den Einfluss der Lichthistorie gezielt. Allerdings wurden sie nachts durchgeführt. Smith et al. (2004) [114], Hébert et al. (2002) [115] und Chang et al. (2011) [116] stellten eine erhöhte Melatoninsuppression bzw. Phasenverschiebung bei heller Beleuchtung in der Nacht fest, wenn Probanden tagsüber wenig Licht ausgesetzt waren. Andersherum gedacht, wurde in Kozaki et al. (2015) [117] bei Probanden, die tagsüber hellem Licht ausgesetzt waren, eine verringerte Melatoninsuppression durch Licht in der Nacht beobachtet.

Chang et al. (2013) [118] untersuchten den Einfluss der Lichthistorie, indem die Probanden 3 Tage vor dem Experiment entweder 1 lx oder 90 lx vertikal auf Augenhöhe während der wachen Zeit ausgesetzt waren. Das Experiment beleuchtete die Probanden für 6,5 h in der Nacht mit 90 lx vertikal auf Augenhöhe. Die aktivierende Wirkung des Lichts (subjektive Aufmerksamkeit, Reaktionszeit bei PVT, Delta/Theta Band im EEG) war stärker und länger, wenn die Probanden vor dem Experiment 1 lx ausgesetzt waren.

In Huiberts et al. 2017 [85] ist der Einfluss der Lichthistorie als mögliche Erklärung für die Abhängigkeit der Ergebnisse von Tageszeit und Jahreszeit genannt. Im Winter fühlten sich die Probanden signifikant

weniger müde und vitaler und erzielten eine bessere Reaktionszeit beim PVT, aber nicht im Frühling, während heller Lichtexposition (1 700 lx vs. 165 lx vertikal auf Augenhöhe). Außerdem trat im Winter sogar ein negativer Effekt auf: Eine schwierige Arbeitsgedächtnisaufgabe wurde bei heller Beleuchtung schlechter absolviert. Im Frühling wurde diese Aufgabe jedoch bei heller Beleuchtung besser abgeschlossen. Diese Effekte traten nur vormittags und nicht nachmittags auf. Eine mögliche Erklärung ist, dass im Winter und vormittags Probanden nur geringen Beleuchtungsstärken vor dem Experiment ausgesetzt waren, während im Frühling und nachmittags die Lichthistorie einen stärkeren Einfluss hatte und potenzielle Effekte überlagerte.

2.3.7 Dynamik der Beleuchtung

Dynamische Beleuchtung wird u. a. von Herstellern als besonders wirksam für „*Human Centric Lighting*“ propagiert. Dynamisch bedeutet hier eine zeitliche Variation von Beleuchtungsstärke und/oder spektraler Verteilung. Dies kann in abrupten Sprüngen oder unmerklich durch sanfte Übergänge geschehen. Eine Vielzahl von Varianten und Verläufen ist dabei denkbar. Einige Studien [114, 119, 120] bescheinigen abrupten Sprüngen gleiche oder sogar bessere Effektivität auf Melatonin-suppression und circadiane Phasenverschiebung im Vergleich zu kontinuierlicher Beleuchtung.

Eine empfohlene Strategie (z. B. DIN SPEC 67600 [121]) ist die Nachbildung des natürlichen Tageslichtverlaufs in Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung (siehe Abbildung 2.4). Eine andere Strategie (ebenfalls in DIN SPEC 67600 [121] empfohlen) zielt darauf ab, mit kurzen Aktivierungspeaks mit heller Beleuchtung und hoher ähnlichster Farbtemperatur die Leistung kurzzeitig zu unterstützen z. B. morgens und im Mittagstief.

De Kort und Smolders (2010) [122] wechselten dynamische (500 lx bis 700 lx, 3.000 K bis 4 700 K, maximale Werte um 8 Uhr und 13 Uhr, minimale Werte um 12 Uhr und ab 16 Uhr, dazwischen lineare Verläufe)

und statische (500 lx, 3000 K) Beleuchtung im monatlichen Rhythmus in einer Büroumgebung ab. Sie berichten keine signifikanten Unterschiede auf subjektive Aufmerksamkeit und eine größere Zufriedenheit der Angestellten mit der dynamischen Beleuchtung. Möglicherweise waren die Differenzen von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung in diesem Fall zu niedrig, um einen Effekt zu erzielen.

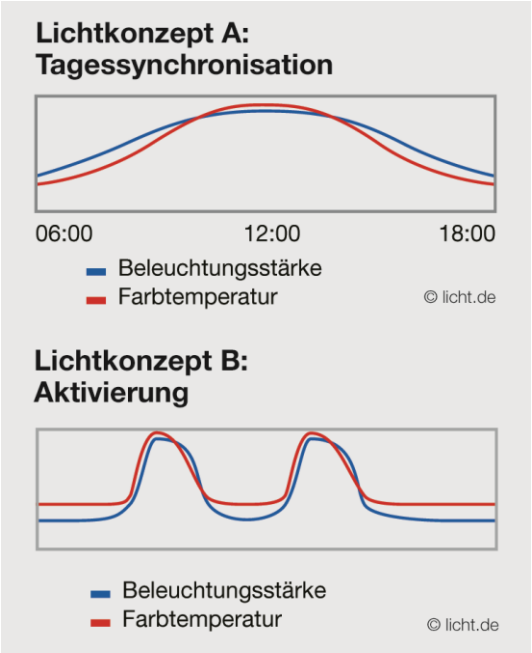


Abbildung 2.4: Beispiel für zwei dynamische Beleuchtungslösungen: A soll natürlichen Tageslichtverlauf simulieren und B soll kurzfristiger Aktivierung dienen, Bild: licht.de [11]

In Ye et al. (2017) [123] wurde die Farbtemperatur tagsüber graduell innerhalb einer bestimmten Zykluszeit variiert, z. B. von 4000 K auf 10000 K innerhalb von 1 h erhöht und anschließend wieder innerhalb von 1 h abgesenkt. Die Lichtexposition dauerte insgesamt 4 h. Farbtemperaturen wechselten von 4000 K auf 10000 K und von 6000 K auf 12000 K (stets bei 500 lx) und drei Zykluszeiten wurden untersucht:

0,5 h, 1 h, 2 h. Im Ergebnis waren Probanden bei höheren Farbtemperaturen subjektiv aufmerksamer und erzielten bessere Resultate bei kognitiven Tests. Die Zykluszeit hatte jedoch keinen Einfluss.

Eine Studie von Lowden und Åkerstedt [124] verglich eine dynamische Beleuchtung (650 lx bis 745 lx, 4 000 K bis 6 000 K) mit konstanter Beleuchtung (200 lx, 3 000 K) im Schichtbetrieb. Subjektive Aufmerksamkeit war erhöht unter der dynamischen Beleuchtung in der zweiten Nachtschicht, jedoch nicht in den anderen Schichten.

Canazei et al. berichten in zwei Studien über den positiven Einfluss dynamischer Beleuchtung. In einer Studie [125] wurden statisch 500 lx verglichen mit einem unmerklichen Dreieckprofil von 500 lx auf 2 000 lx und wieder zurück auf 500 lx in 30 min und einer unmerklichen Veränderung von 500 lx – 680 lx – 500 lx im 10 s Takt. Die Farbtemperatur war stets 4 000 K. Gemessen wurde die Produktivität beim Zusammenbau einer sich wiederholenden Lego-Aufgabe an einem Arbeitstag von 8 bis 16 Uhr. Es wurden keine signifikanten Effekte der Beleuchtung auf die Produktivität berichtet. Die Dynamik der zweiten Studie [126, 127] bestand in einer zweistündigen sanften Steigerung der Beleuchtungsstärke von 1 000 lx auf 2 000 lx und der Farbtemperatur von 4 000 K auf 6 500 K am Morgen bei permanenten Morgenschichtarbeiterinnen. Die Produktivität (Anzahl der montierten Produkte) unter dynamischer Beleuchtung war im Winter besser als unter konstanter Beleuchtung. Im Sommer war jedoch kein Unterschied vorhanden.

Die hier vorgestellten Studien berichten, bis auf die letzte Studie, allesamt kleine bis keine Effekte. Ob eine dynamische Änderung des Lichts wirklich vorteilhaft ist und wie die Wirkung funktioniert, ist demnach noch nicht gesichert.

2.4 Feldstudien Licht zum Lernen

Die bisherigen Erkenntnisse stammen hauptsächlich aus kontrollierten Laborstudien. Sowohl das Cochrane Review [66] als auch das KAN Review [69] betonen, dass sich Laborergebnisse nicht ohne Weiteres auf reale Situationen übertragen lassen und fordern weitere Feldstudien zur Überprüfung der Wirksamkeit von Licht. Beide Reviews zielen auf die Anwendung im Büro ab. Für die Anwendung Licht zum Lernen in Schulen und Universitäten gelten ähnliche Bedingungen, dennoch ist die Zielgruppe verschieden. Hier wird der Wissensstand zu Feldstudien im Lernkontext zusammengefasst.

Eine Studie von Rautkylä et al. (2010) [23] untersuchte in Helsinki den Einfluss einer Hörsaalbeleuchtung mit hoher Farbtemperatur (17 000 K vs. 4 000 K Leuchtstofflampen, dank Reflexionen bei Messung am Platz noch 12 370 K vs. 3 870 K) auf die subjektive Aufmerksamkeit (KSS) vor und nach einer 90 minütigen Vorlesung. Die Beleuchtung erfolgte dabei randomisiert in 10 Vorlesungen sowohl vormittags als auch nachmittags und es gab keinen Tageslichteinfluss durch Fenster. Die erste Durchführung im Frühling (N = 16, Studierende, 22 bis 27 Jahre, E_h = 800 lx) fand keinen Effekt. Im Herbst wurden deutlich mehr Probanden untersucht (N = 138 Studierende, 19 bis 30 Jahre, E_h = 1000 lx) und die Müdigkeit nahm im Laufe der Vorlesung zu. Am Nachmittag war der Abfall der Müdigkeit unter 17 000 K signifikant geringer als unter 4 000 K. Dieser Effekt fand sich nicht am Vormittag und es wurden keine kognitiven Tests verwendet. Positiv anzumerken ist, dass viele Kontrollvariablen untersucht wurden und Raumtemperatur sowie CO_2-Konzentration gemessen wurden. Einfluss hatten der Aufenthalt im Freien vor dem Experiment, die Einnahme von Stimulantien (z. B. Koffein und Energydrinks) und die Nahrungszufuhr vor dem Experiment. Probanden, die vorher aßen oder Stimulantien zu sich nahmen, zeigten keinen Effekt. Der Chronotyp hatte keinen Einfluss. Es wurde versucht den Hintergrund der Studie gegenüber den Probanden zu verschleiern, indem als offizielles Ziel „Umgebungsfaktoren beim Lernen“ angegeben

wurde und die Befragung mit weiteren Fragen zur Umgebung erweitert wurde.

An einer Universität in Ankara verglich Kocaoğlu et al. (2015) [128] direkt im Anschluss an eine zweistündige Vorlesung die Wirkung von Leuchtstofflampen mit 4 000 K bzw. 6 500 K (500 lx horizontal). In zwei Seminarräumen wurde jeweils eine Farbtemperatur an insgesamt 97 Probanden im März getestet und nach 2 Tagen getauscht. Messgrößen waren der d2R-Test und ein Fragebogen zur Stimmung (PANAS). Die ähnlichste Farbtemperatur hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Konzentrationsleistung beim d2R-Test und auf die Stimmung. Die Anzahl Verwechslungsfehler beim d2R-Test war signifikant geringer bei 6 500 K als bei 4 000 K.

Der d2R-Test wurde ebenfalls in einigen Studien in Schulen als kognitiver Leistungstest verwendet, da er einfach in großen Gruppen durchzuführen ist. Barkmann und Wessolowski untersuchten in den „Hamburger Schulstudien“ [129, 130] eine variable Beleuchtung im Schulalltag, bei der sieben Settings mit 275 lx ... 1 000 lx und 3 500 K ... 11 000 K vom Lehrer gewählt werden durften. An zwei Schulen gab es jeweils zwei Schulklassen (N = 116, 3. und 10. Klasse) mit variabler Beleuchtung und Standardbeleuchtung (300 lx und 4 000 K). Der Tageslichteinfluss wurde durch eine möglichst ähnliche Lage der Klassenräume kontrolliert und die Studie fand im Winter statt. Das Vorher-Nachher-Testdesign begann mit einer gemeinsamen Baseline bei Standardbeleuchtung und nach 7 Wochen variabler Beleuchtung wurde das Setting *„Concentrate“* (1 000 lx und 5 800 K) angewendet und mit dem Setting *„Standard“* (300 lx und 4 000 K) verglichen. Die Interventionsklassen zeigten eine 17 % bessere Lesegeschwindigkeit und 20 % weniger Auslassfehler beim d2R-Test nach 7 Wochen, während die Vergleichsklasse nur 7 % schneller las und keinen Unterschied im d2R-Test aufwies. 70 % der Schüler befürworteten das variable Licht. Die Fehler beim d2R-Test sind aufgrund verschiedener Bearbeitungsstile jedoch wenig aussagekräftig und die Konzentrationsleistung des d2R-Tests stieg in beiden Gruppen gleich stark an. Die schulische Leistung der

Klassen war sehr verschieden und die Lehrer waren unterschiedlich gut engagiert, sodass auch der Effekt der schnelleren Lesegeschwindigkeit andere Ursachen haben könnte.

Variable Beleuchtung in Schulen (vier Settings, u. a. *„focus“* 1 000 lx und 6 500 K, welches mindestens beim Lesen lernen eingesetzt wurde) wurde ebenfalls in Mott et al. (2012) [131] mit dem Setting *„normal“* verglichen (500 lx und 3 500 K, welches dauerhaft in der Vergleichsgruppe und bei allen Tests eingesetzt wurde). Die Studie dauerte ein Schuljahr (N = 84, 7 bis 8 Jahre, 4 Klassenräume in den USA) und getestet wurde zu Beginn im September, in der Mitte im Januar und am Ende im Mai. Tageslichteinfluss wurde durch kleine Fenster und zugezogenen Sonnenschutz versucht zu minimieren. Die Lesekompetenz verbesserte sich in der Gruppe mit variabler Beleuchtung stärker als in der Vergleichsgruppe. Der d2R-Test und ein Motivationsfragebogen zeigten keinen Unterschied. Da nur ein Test anschlägt, die Differenzen insgesamt eher klein erscheinen und auch hier der Einfluss des Lehrers nicht kontrolliert wurde, sollten diese Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden.

Sleegers et al. (2013) [132] fassen drei niederländische Studien zusammen, die variables Licht (vier Settings, u. a. *„Focus“* 1 000 lx horizontal und 6 500 K) mit dem Setting *„Standard“* (300 lx horizontal und 3 000 K bis 4 000 K) mittels d2R-Test vergleichen. Die ersten beiden Studien (N = 98 und N = 44, 4. und 6. Klasse) fanden im Winter im Vorher-Nachher-Testdesign (1 Monat) statt. Es trat ein Lerneffekt bei der Konzentrationsleistung des d2R-Tests auf, jedoch verbesserten sich die Experimentalklassen stärker als die Kontrollklassen. Die dritte Studie (N = 55, 4. bis 6. Klasse) fand in einem fensterlosen simulierten Klassenraum statt und sowohl Schüler als auch Instruktor wurden randomisiert einer Beleuchtung (Fokus oder Standard) zugeteilt. Sie fand im Mai und Juni früh am Morgen statt, um möglichst den Einfluss durch Lichthistorie zu vermeiden. Das Setting *„Focus“* erzielte zwar höhere Mittelwerte bei der Konzentrationsleistung, aber der Unterschied war

nicht statistisch signifikant trotz besser kontrollierter Bedingungen im Vergleich zu den ersten beiden Studien.

Ein positiver Effekt auf die Konzentrationsleistung des d2R-Tests von blau-angereichertem Licht (LED: 4000 K direkt und 14000 K indirekt, resultierend in 300 lx und 5500 K vertikal auf Augenhöhe) im Vergleich zu Standardlicht (direkte Leuchtstofflampen 3.000 K bzw. 4000 und 300 lx vertikal auf Augenhöhe) wurde in Keis et al. (2014) [133] in Ulm gefunden. An zwei Schulen mit jeweils zwei Klassen (N = 58, 16 bis 29 Jahre, Winter) wurde das blau-angereicherte Licht sowohl langfristig innerhalb von fünf Wochen und kurzfristig als Testbedingung beim Nachher-Test eingesetzt. Die Probanden waren jedoch zufriedener mit der Standardbeleuchtung in Helligkeit und Lichtfarbe und nur 50 % mochten es nach Studienende behalten.

Insgesamt zeigen diese Studien im Schul- und Universitätskontext, dass teilweise eine hohe Farbtemperatur und eine hohe Beleuchtungsstärke vorteilhaft für die Aufmerksamkeit sein können. Doch die Limitierungen der Feldstudien sind relativ groß, da eine Verfälschung der Ergebnisse durch Störgrößen schwer zu kontrollieren ist. Beispiele dafür sind u. a. Erwartungshaltung der Probanden, Hawthorne Effekt [134], Einfluss des Lehrpersonals, Leistungsunterschiede in den Gruppen, Tageslichteinfluss durch Fenster, etc.

2.5 Faktor Individualität der Menschen

Dieser Abschnitt widmet sich den individuellen Unterschieden der Menschen und deren möglicher Einfluss auf die Wirkung des Lichts auf die Aufmerksamkeit. Folgende Faktoren werden diskutiert:

- Alter
- Geschlecht
- Chronotyp
- Besondere Umstände wie Stress, Schlafentzug, Krankheit
- Koffein- und Nahrungszufuhr
- Anstrengung bei den Tests
- Wohlbefinden und Akzeptanz der Beleuchtung

Alter

Altersbedingte Veränderungen im Auge führen zu einer reduzierten Lichtexposition im Vergleich zu jüngeren Probanden. Dies hat mehrere Ursachen. Der Transmissionsgrad der Linse, absolut und besonders im kurzwelligen Spektralbereich, nimmt mit dem Alter ab [135–137]. Außerdem verkleinert sich die Pupille [138, 139] mit zunehmendem Alter und die Rezeptordichte der Zapfen nimmt ab [140, 141]. Als Resultat nehmen Sehschärfe und Sehleistung ab, der Lichtbedarf steigt und die Blendempfindlichkeit steigt aufgrund Zunahme des Streulichts im Auge [142]. Augenkrankheiten wie eine Makuladegeneration, ein grauer oder grüner Star verschlechtern die visuelle Wahrnehmung zusätzlich [142].

Abgesehen von der Alterung des Auges ist auch die Leistungsfähigkeit und damit das Abschneiden bei kognitiven Tests z. B. bei Reaktionszeiten verschieden je nach Altersgruppe. Werden mehrere Altersgruppen gleichzeitig untersucht, kann bspw. eine standardisierte Umrechnung der Ergebnisse je Altersgruppe wie beim d2R-Test erfolgen [52].

Geschlecht

Ob das Geschlecht die Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit beeinflusst, ist nicht bekannt. In Hartstein et al. [102] mit 40 Probanden und einem 50:50 Geschlechtsverhältnis wurden geschlechtsspezifische Unterschiede im Ergebnis gefunden. Bei der Go-NoGo-Aufgabe verbesserten sich nur die Frauen und bei der Task-Switching-Aufgabe nur die Männer unter 5000 K LED-Beleuchtung im Vergleich zu 3000 K Leuchtstofflampen-Beleuchtung. Van Duijnhoven et al. [143] beobachtete in einer Feldstudie, dass Frauen etwas aufmerksamer waren als Männer. Auch Knez et al. [144, 145] berichten von geschlechtsspezifischen Reaktionen auf Stimmung und Kognition durch Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur. Als Einzelfälle könnten diese Ergebnisse aber auch auf Zufall beruhen.

Chronotyp

Der Chronotyp teilt Menschen in sogenannte Morgentypen („Lerchen“), Abendtypen („Eulen“) und Normaltypen ein. Bei Morgentypen sind der circadiane Rhythmus, die innere Uhr, Aufwach- und Einschlafzeit und Leistungsphasen zu früheren Zeiten am Morgen verschoben im Vergleich zu Normaltypen. Im Gegensatz dazu ist der Rhythmus bei Abendtypen zu späteren Zeiten verschoben. Der Chronotyp kann mit dem Horne-Östbergs Morningness-Eveningness Score (MEQ, [146]) oder mit dem Munich Chronotype Questionnaire [147] bestimmt werden. Ein Vergleich der beiden Methoden findet sich in [148, 149].

Nicht-visuelle Wirkungen von Licht sind eng mit dem circadianen Rhythmus verknüpft, daher liegt der Gedanke nahe, dass der Chronotyp eines Menschen Auswirkungen auf seine Reaktion gegenüber der Beleuchtung hat. In Martin et al. (2012) [150] wurde an Studierenden beobachtet, dass der Chronotyp die durchschnittliche Lichtexposition am Tag beeinflusst. Abendtypen waren im Verlauf der Zeit des Wachseins insgesamt weniger hellem Licht ausgesetzt. Weil sie in der Woche morgens vom Wecker geweckt zu wenig Schlaf bekommen und

dies am Wochenende nur bedingt ausgeglichen werden kann, haben Abendtypen eine schlechtere Schlafqualität als Normal- und Morgentypen. Bei langanhaltendem Stress beim Pflegen von Angehörigen berichteten in Buschkens et al. (2010) [151] Morgentypen ein besseres Wohlbefinden als andere Chronotypen.

Auch bei einer Studie zu Leistung und Licht zeigte sich eine Abhängigkeit der Ergebnisse vom Chronotyp. In Kantermann et al. (2012) [152] wurde eine hohe Beleuchtungsstärke (4 420 lx) mit einer niedrigen Beleuchtungsstärke (230 lx) bei einem Fahrrad Ergometer Test verglichen. Der Leistungsunterschied der Probanden unter den Beleuchtungen war abhängig von der Testuhrzeit entsprechend dem Chronotyp. Maierova et al. (2016) [153] untersuchten extreme Morgen- und Abendtypen und stellten fest, dass die Ergebnisse zur Aufmerksamkeit und Wohlbefinden vom Chronotyp moderiert wurden. Die circadiane Phase war verschieden für beide Chronotypen bei heller Beleuchtung im Vergleich zu selbst gewählter Beleuchtung tagsüber. Außerdem berichteten Morgentypen einen schnelleren Anstieg der Müdigkeit tagsüber als die Abendtypen.

Besondere Umstände wie Stress, Schlafentzug, Krankheit

Es ist denkbar, dass besondere Umstände wie Stress, Schlafentzug oder Krankheit Menschen empfindlicher gegenüber einer Lichtintervention machen, weil es für sie schwieriger sein könnte, Aufmerksamkeit aufrecht zu erhalten.

Cajochen (2007) [112] schreibt, dass die aktivierende Wirkung von Licht maximal ist, wenn der circadiane Druck für Schlaf maximal ist (früher Morgen von 2 bis 6 Uhr), ein hoher homöostatischer Schlafdruck herrscht (z. B. nach mehr als 16 h Wachheit) und bei Schlaftrunkenheit (engl. *sleep inertia*, z. B. beim Aufwachen aus dem Schlaf). Einige Studien wurden daher absichtlich mit schlafentzogenen Probanden durchgeführt, um maximale Effekte hervorzurufen und so die nachts gefundenen positiven Effekte heller Beleuchtung auf tagsüber zu

übertragen. So erlaubten Phipps-Nelson et al. [18] den Probanden zwei Nächte vor dem Experiment jeweils nur 5 h zu schlafen und fanden einen positiven Effekt am Nachmittag von heller Beleuchtung mit 1 000 lx im Vergleich zu dunklem Licht < 5 lx auf die subjektive Aufmerksamkeit und Reaktionszeit beim PVT. In Lafrance et al. [154] durften die Probanden nur 4 h vor dem Experiment schlafen. Die Beleuchtung (helles weißes Licht vs. dunkles rotes Licht) hatte hier jedoch keinen Einfluss auf die subjektive Aufmerksamkeit am Morgen.

Eine Studie von Smolders und de Kort [86] zu heller Beleuchtung 1 000 lx vs. 200 lx zeigte zudem einen Einfluss des Faktors Stress auf die Wirkungen des Lichts. Unter absichtlich herbeigeführter mentaler Ermüdung war der Effekt des hellen Lichts auf subjektive Aufmerksamkeit stärker.

In der Feldstudie von van Duijnhoven et al. [143] wurden mit dem *SF-36 Fragebogen zum Gesundheitszustand* acht Gesundheitsaspekte abgefragt. Vier dieser Aspekte (Allgemeine Gesundheitswahrnehmung, Vitalität, Soziale Funktionsfähigkeit, psychisches Wohlbefinden) korrelierten positiv mit der subjektiven Aufmerksamkeit der Probanden, die anderen vier Aspekte (Körperliche Funktionsfähigkeit, körperliche Schmerzen, körperliche Rollenfunktion, emotionale Rollenfunktion) nicht. Der Gesundheitszustand ist demnach eine wichtige Kovariable für Untersuchungen zur Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit.

Unklar ist, ob diese besonderen Umstände Schlussfolgerungen auf die Allgemeinheit zulassen oder eben nur unter diesen schwierigen Bedingungen gelten.

Koffein- und Nahrungszufuhr

In der Studie von Rautkylä et al. [23] zur Wirkung von hoher ähnlichster Farbtemperatur auf die Aufmerksamkeit im Hörsaal zeigte sich ein zusätzlicher Einfluss durch Einnahme von Koffein oder Stimulanzien wie Energydrinks und der Nahrungszufuhr vor der Vorlesung. Wright et al.

1997 [155] zeigte, dass die Kombination von Licht und Koffein in der Nacht bei Schlafentzug Aufmerksamkeit und Leistung stärker aufrecht erhielt im Vergleich zu ausschließlich Licht oder Koffein.

Anstrengung bei den Tests

Ein möglicher Grund, warum einige Studien keine Effekte bei kognitiven Tests zeigen, könnte darin bestehen, dass Probanden eine schlechte Leistungsfähigkeit durch vermehrte Anstrengung bei den Tests ausgleichen können [69, 156]. Dies könnte auch eine Erklärung für die im Review von Lok et al. [62] häufig gefundene Abhängigkeit von Art und Schwierigkeit der Aufgabe sein. Demnach könnten Probanden bei leichten Aufgaben mit verstärkter Anstrengung eine niedrige Leistungsfähigkeit kompensieren, was bei schwereren Aufgaben oder unter schwierigeren Bedingungen nicht mehr gelingt. In Fragebögen können Probanden über diese zusätzliche Anstrengung berichten, weshalb Fragebögen häufiger signifikante Ergebnisse ergeben als die (kompensierten) Leistungstests.

Wohlbefinden und Akzeptanz der Beleuchtung

Diese Arbeit untersucht die Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit. Darüber hinaus besitzt das Licht vielfältige andere nicht-visuelle Wirkungen z. B. auf Wohlbefinden und Emotionen. Beispielsweise könnte eine besonders unangenehme Lichtsituation negative Auswirkungen auf das Wohlbefinden oder die subjektiv empfundene Konzentrationsleistung haben und potenziell positive Effekte der spektralen Verteilung oder der Beleuchtungsstärke verschleiern.

Veitch et al. (2008) „Lighting appraisal, well-being and performance in open plan offices“ [28] stellen einen kombinierten Analyseansatz (engl. *linked mechanisms*) vor: Die Zufriedenheit mit der Beleuchtung (Präferenz) hat Einfluss auf die Stimmung [157, 158] und die Stimmung beeinflusst wiederum Gesundheit und Wohlbefinden. Stimmung und Wahrnehmung der eigenen Kompetenz beeinflussen die Motivation eine

Aufgabe zu machen und damit auch die Leistung bei der Aufgabe selbst [157, 159]. Dieser Ansatz wird mit vielfältigen Messgrößen zur Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden, Motivation, Zufriedenheit mit der Arbeitsumgebung und der Beleuchtungssituation verfolgt. Eine Beleuchtung mit höherer Qualität führte hier zu einer angenehmeren Stimmung und besserem Wohlbefinden. Außerdem wurde die Arbeitsumgebung als attraktiver bewertet. Beleuchtung, die die Sehleistung förderte, verbesserte auch die Leistung bei den Aufgaben.

Das Wohlbefinden wird zusätzlich zur Aufmerksamkeit im Cochrane Review [66] als wichtige Ausgangsgröße untersucht. Gleichzeitig mit einem positiven Effekt einer hohen ähnlichsten Farbtemperatur auf die subjektive Aufmerksamkeit und kognitiven Tests fanden Chellappa et al. [20] und Viola et al. [21] einen positiven Effekt auf das Wohlbefinden, was einen Zusammenhang zwischen Wohlbefinden und Aufmerksamkeit denkbar macht.

In ihrer Literaturübersicht [29] zeigen Smolders und Beersma, dass die Höhe der Beleuchtungsstärke die Akzeptanz der Beleuchtung beeinflusst. Einerseits kann eine höhere Beleuchtungsstärke als aktivierender, lebhafter und angenehmer wahrgenommen werden. Andererseits kann eine sehr hohe Beleuchtungsstärke wiederum als weniger angenehm empfunden werden und bei starken Leuchtdichteunterschieden potenziell Blendung verursachen. Außerdem ist die Wahrnehmung abhängig von individuellen Präferenzen sowie Art der Aufgabe und Tageszeit. Sie schließen damit, dass eine sowohl aktivierende als auch angenehme Beleuchtung für den Arbeitsplatz zu liefern weiterhin eine Herausforderung ist.

Begemann et al. (1997) [160] ermittelten in ihrer Feldstudie in einer Büroumgebung ebenfalls, dass Probanden höhere Beleuchtungsstärken präferieren, als es eine Standardbürobeleuchtung liefert. Außerdem wurde ein dynamischer, dem Tageslicht nachempfundener Verlauf, einer konstanten Beleuchtung vorgezogen. In ihrer Übersichtsarbeit folgern van Bommel et al. (2004) [161], dass für die Lichtfarbe keine

eindeutigen Präferenzen gegeben werden können und jede Person eine individuelle Vorliebe besitzt. Im Gegensatz dazu berichtet eine Feldstudie in Büros mit und ohne Tageslicht von Wei et al. (2014) [105], dass eine höhere Farbtemperatur (5 000 K) unangenehmer empfunden wurde als eine niedrigere Farbtemperatur (3 500 K) bei vorhandenem Tageslicht.

Auch praktische und wirtschaftliche Gründe, wie beispielsweise Realisierbarkeit und zukünftige Vermarktbarkeit von Lichtlösungen, die die Aufmerksamkeit verbessern, sind zu bedenken. Eine schlecht akzeptierte und unpraktikable Lichtlösung wird nicht verkauft werden, unabhängig davon wie gut sie Leistungsfähigkeit möglicherweise zu steigern vermag.

Insgesamt ist der Einfluss der vorgestellten Faktoren auf den Zusammenhang Licht und Aufmerksamkeit noch nicht ausreichend erforscht. Es ist ratsam, möglichst viele Faktoren bei der Studienplanung zu beachten und idealerweise konstant zu halten oder als Kontrollvariablen bei der statistischen Analyse zu berücksichtigen. Letzteres bedeutet einen vermehrten Aufwand in der Datenerhebung, sodass hier ein realistischer Kompromiss gefunden werden sollte.

3 Forschungsfragen

Der Überblick über den Forschungsstand zur Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit zeigt, dass zwar eine Vielzahl an Literatur zu diesem Thema existiert, sich die bisherigen Ergebnisse dennoch nicht zu einem einheitlichen Bild zusammenfassen lassen. Insbesondere Zahlenwerte, ab wann eine Wirkung zu erwarten ist, fehlen bisher.

Zahlreiche Studien berichten einen positiven Effekt einer erhöhten Beleuchtungsstärke auf die subjektive Aufmerksamkeit. Dennoch gibt es weiterhin eine nicht geringe Anzahl Studien, die das nicht aufzeigen können, besonders wenn auch die Leistungsfähigkeit bei kognitiven Tests mit einbezogen wird. Die Aufmerksamkeit wird in dieser Arbeit deshalb stets sowohl subjektiv als auch anhand kognitiver Tests ermittelt. Da nicht gesichert ist, ob überhaupt ein Effekt zu erwarten ist, sollen möglichst extreme Unterschiede der Beleuchtungsstärke bei ansonsten möglichst anwendungsnahen Bedingungen untersucht werden. Wenn dabei kein Unterschied zu finden ist, könnte das ein Hinweis sein, dass kein Einfluss vorliegt oder dass andere Variablen den Einfluss kompensiert oder verdeckt haben [69]. Wichtig ist außerdem die Höhe der Referenzbeleuchtungsstärke. Sehr dunkle Beleuchtungsstärken erzielen voraussichtlich stärkere Effekte. Im Anwendungsgebiet Licht zum Lernen herrscht jedoch meist eine normgerechte Standardbeleuchtung vor. Diese soll daher als Referenzbeleuchtungsstärke dienen, um den Zusatznutzen einer erhöhten Beleuchtungsstärke zu erforschen. Viele Studien vergleichen 1 000 lx vs. 200 lx vertikal auf Augenhöhe (letzteres entspricht ca. 500 lx horizontal z. B. bei klassischer Arbeitsplatzbeleuchtung). Dieser Vergleich soll hier zwecks Vergleichbarkeit ebenfalls genutzt werden.

Beim Einfluss von spektraler Verteilung ist die Studienlage ebenso uneinheitlich. Einige Studien zeigen, dass sich ein erhöhter kurzwelliger Anteil in der spektralen Verteilung positiv auf die Aufmerksamkeit auswirkt. Davon wurden jedoch viele nachts durchgeführt, die nicht

ohne weiteres auf Situationen am Tage übertragbar sind. Auch hier existiert ein großer Anteil Studien mit keinem oder negativem Effekt. Daher soll der Einfluss der spektralen Verteilung ebenfalls mit möglichst extremen Unterschieden im melanopischen Wirkungsfaktor erforscht werden. Meist wird entweder Beleuchtungsstärke oder spektrale Verteilung untersucht. Eine Interaktion der beiden Parameter ist hingegen wenig erforscht. Möglicherweise tritt bei hohen Beleuchtungsstärken eine Sättigung auf, sodass dann die spektrale Verteilung einen geringeren Einfluss auf die Aufmerksamkeit hat.

Daraus werden drei Forschungsfragen abgeleitet, die den Kern dieser Arbeit bilden und in einem Laborversuch beantwortet werden sollen:

1. Steigert eine stark erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe die akute Aufmerksamkeit am Tag im Vergleich zu Standardbeleuchtungsstärken?
2. Kann eine spektrale Verteilung mit stark erhöhtem kurzwelligem Anteil die akute Aufmerksamkeit am Tag ebenfalls steigern?
3. Existiert eine Wechselwirkung zwischen vertikaler Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe und der spektralen Verteilung und wenn ja, wie wirkt sich die Wechselwirkung aus?

Laborversuche haben den Vorteil, dass kontrollierbare und vergleichbare Bedingungen hergestellt werden können. So wird die Wahrscheinlichkeit minimiert, dass die Effekte von störenden Variablen verdeckt werden. Die Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf reale Anwendungen muss jedoch in Feldstudien mit großer Probandenzahl bewiesen werden [66, 69]. Bisherige Studien im Schul- und Lernkontext untersuchen die Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit von Schulkindern und Studierenden, haben jedoch eine limitierte Aussagekraft. Daher soll eine eigene Feldstudie im Hörsaalkontext ähnlich zu [23], erweitert um eine kognitive Testkomponente, an einer großen Studierendenanzahl folgende Frage untersuchen:

4. Lassen sich im Labor gefundene Ergebnisse zu Frage 1 und 2 im Anwendungsfall Hörsaal reproduzieren?
   D.h. steigern eine erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe oder ein erhöhter kurzwelliger Anteil in der spektralen Verteilung die akute Aufmerksamkeit in einer Feldstudie im Hörsaal?

Der Forschungsstand zeigt, dass für die Wirkung ebenfalls Dauer und die Tageszeit der Exposition von Bedeutung sind. Die Dauer variiert in den Studien stark und soll kein Thema dieser Arbeit sein. Sie soll weder zu kurz (wenige Minuten) oder zu lang sein (mehrere Stunden) und wird daher für alle Versuche im Hinblick auf praktische Anwendbarkeit auf 90 min (= Dauer einer Vorlesung) festgelegt. Einige Studien berichten von Effekten, die ausschließlich morgens oder nachmittags auftraten. Außerdem hängt die Leistungsbereitschaft von der Tageszeit ab (siehe Abschnitt 2.3.5). Der Einfluss der Tageszeit soll daher im Vergleich in der Feldstudie untersucht werden.

5. Moderiert die Tageszeit die Wirkung von Licht auf die akute Aufmerksamkeit, d.h. ist die Wirkung morgens ausgeprägter als nachmittags?

Das Potenzial dynamischer Beleuchtung wurde in einigen Studien aufgezeigt, jedoch ist die Wirksamkeit noch nicht belegt. Da auch hier nicht sicher ist, ob Effekte zu erwarten sind, wird versucht eine maximale Wirkung durch die Verwendung extremer und sichtbarer Unterschiede zu erzielen. Folgende Frage wird in einem eigenen Laborversuch erforscht:

6. Sind dynamische Wechsel der Beleuchtung effektiver als statische Lichtszenen gleicher Dauer in Bezug auf die Steigerung der Aufmerksamkeit?

Die Fragen 1 bis 6 sind die Hauptforschungsfragen dieser Arbeit. Weitere interessante Aspekte sollen in den nachfolgenden Nebenfragen erforscht werden. Die Wirkung von Licht ist nicht allein auf die Aufmerksamkeit begrenzt, sondern die Beleuchtung beeinflusst

ebenfalls das Wohlbefinden, welches wiederum indirekt die Aufmerksamkeit beeinflussen kann. Sollte das Wohlbefinden negativ beeinflusst werden, könnte dies potenzielle Effekte der Beleuchtung auf die Aufmerksamkeit überlagen. Ein möglicher Zusammenhang der Akzeptanzbewertung der Lichtszene mit der resultierenden Aufmerksamkeit ist ebenfalls nicht auszuschließen. Außerdem wird eine aufmerksamkeitssteigernde Beleuchtung wenig erfolgreich sein, wenn sie nicht vom Nutzer akzeptiert wird. Da dies jedoch kein Kernthema ist, werden die Lichtszenen anhand der Forschungsfragen 1 bis 3 ausgewählt und nicht nach größtmöglicher Nutzerakzeptanz. Mit den folgenden beiden Forschungsfragen soll der Einfluss von Licht auf das Wohlbefinden und die Akzeptanz der Beleuchtung untersucht werden:

7. Beeinflussen die gezeigten Lichtszenen das Wohlbefinden der Probanden?
8. Welche Lichtszenen werden von den Probanden als akzeptabel bewertet?

Die Faktoren zur Individualität sollen als Kovariablen erfasst und deren möglicher Einfluss analysiert werden. Der potenzielle Einfluss der Lichthistorie soll möglichst gering gehalten werden und wird als weitere Kovariable aufgenommen. Ebenfalls sollen Wechselwirkungen der Ausgangsgrößen miteinander untersucht werden, u. a. subjektive Aufmerksamkeit und kognitive Testergebnisse, Aufmerksamkeit und Wohlbefinden sowie Aufmerksamkeit und Akzeptanz der Beleuchtung. Für die Kovariablen und die wechselseitigen Einflüsse liegen keine zielgerichteten Hypothesen vor. Sie sollen explorativ untersucht werden, um neue Ansätze für die weitere Forschung zu entwickeln.

9. Korrelieren die abhängigen Variablen subjektive Aufmerksamkeit, kognitive Testergebnisse, Anstrengung, Wohlbefinden und Akzeptanz der Beleuchtung miteinander?
10. Gibt es weitere Einflüsse auf die akute Aufmerksamkeit durch die Kovariablen Alter, Geschlecht, Chronotyp, Stress, Krankheit, Schlafprobleme, Koffein, Nahrungszufuhr und Lichthistorie?

4 Experimentelle Untersuchungen

Dieses Kapitel erläutert die Vorgehensweise der durchgeführten Experimente. Es wird zunächst beschrieben, welche Hypothesen zugrunde gelegt werden und welche Variablen untersucht werden. Anschließend wird das Versuchsdesign der drei durchgeführten Experimente vorgestellt und auf spezifische Details der einzelnen Experimente eingegangen.

4.1 Hypothesen und Übersicht

Aus dem Forschungsstand und den Forschungsfragen lassen sich folgende Hypothesen ableiten, die die Grundlage für die Auslegung der Experimente bilden (siehe dazu Übersicht in Abbildung 4.1):

1. Eine stark erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe bewirkt eine akute Steigerung der Aufmerksamkeit tagsüber im Vergleich zu einer Standardbeleuchtungsstärke.

2. Eine spektrale Verteilung des Lichts mit stark erhöhtem kurzwelligem Anteil bewirkt eine akute Steigerung der Aufmerksamkeit tagsüber.

3. Erstens: Bezüglich der Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit existiert eine Interaktion zwischen der Beleuchtungsstärke und der spektralen Verteilung des Lichts.
   Zweitens: Die Interaktion tritt als Sättigung auf: Bei hohen Beleuchtungsstärken hat ein erhöhter kurzwelliger Anteil keinen Effekt auf die Aufmerksamkeit.

4. Die Ergebnisse aus der Laborstudie zu 1. und 2. bestätigen sich in einer Feldstudie, Anwendungsgebiet Vorlesung in einem Hörsaal. D.h. eine erhöhte Beleuchtungsstärke und ein erhöhter kurzwelliger Anteil in der spektralen Verteilung bewirken eine Steigerung der Aufmerksamkeit.

5. Die Wirkung des Lichts auf die Aufmerksamkeit ist morgens ausgeprägter als nachmittags.

6. Eine dynamische Abfolge von Lichtszenen wirkt effektiver auf die Steigerung der Aufmerksamkeit tagsüber als eine statische Lichtszene gleicher Dauer.

7. Das Wohlbefinden der Probanden verbessert sich bei erhöhter Beleuchtungsstärke und verschlechtert sich bei erhöhtem kurzwelligem Anteil.

8. Die Akzeptanz der gezeigten Lichtszenen verbessert sich bei erhöhter Beleuchtungsstärke und verschlechtert sich bei erhöhtem kurzwelligem Anteil.

Die letzten beiden Forschungsfragen 9 und 10 (siehe Kapitel 3) stehen für explorative Beobachtungen ohne zugrunde liegende Hypothesen.

Die Hypothesen und Forschungsfragen werden anhand von drei experimentellen Versuchen untersucht:

1. Extreme Lichtbedingungen im Labor im Sommer 2016:

   Hypothesen 1, 2, 3, 7, 8

2. Dynamische Lichtbedingungen im Labor im Winter 2017:

   Hypothesen 6, 7, 8

3. Realistische Bedingungen im Feld (Hörsaal, Wintersemester 2016/2017) zu zwei unterschiedlichen Tageszeiten:

   Hypothesen 4, 5, 7, 8 und Forschungsfragen 9, 10

Eine genannte Kritik [32, 62] an vielen Studien ist die geringe Stichprobengröße und demzufolge niedrige statistische Power sowie ein unzureichend beschriebenes Versuchsdesign samt der lichttechnischen Bedingungen. Diese Arbeit legt daher großen Wert auf eine detaillierte Beschreibung des Versuchsdesigns zwecks guter Vergleichbarkeit und der Nutzung einer ausreichend großen Anzahl Probanden. Um potenzielle Alterseffekte zu vermeiden, wird die Altersgruppe auf junge Erwachsene im Alter von 18 bis 30 Jahre eingegrenzt.

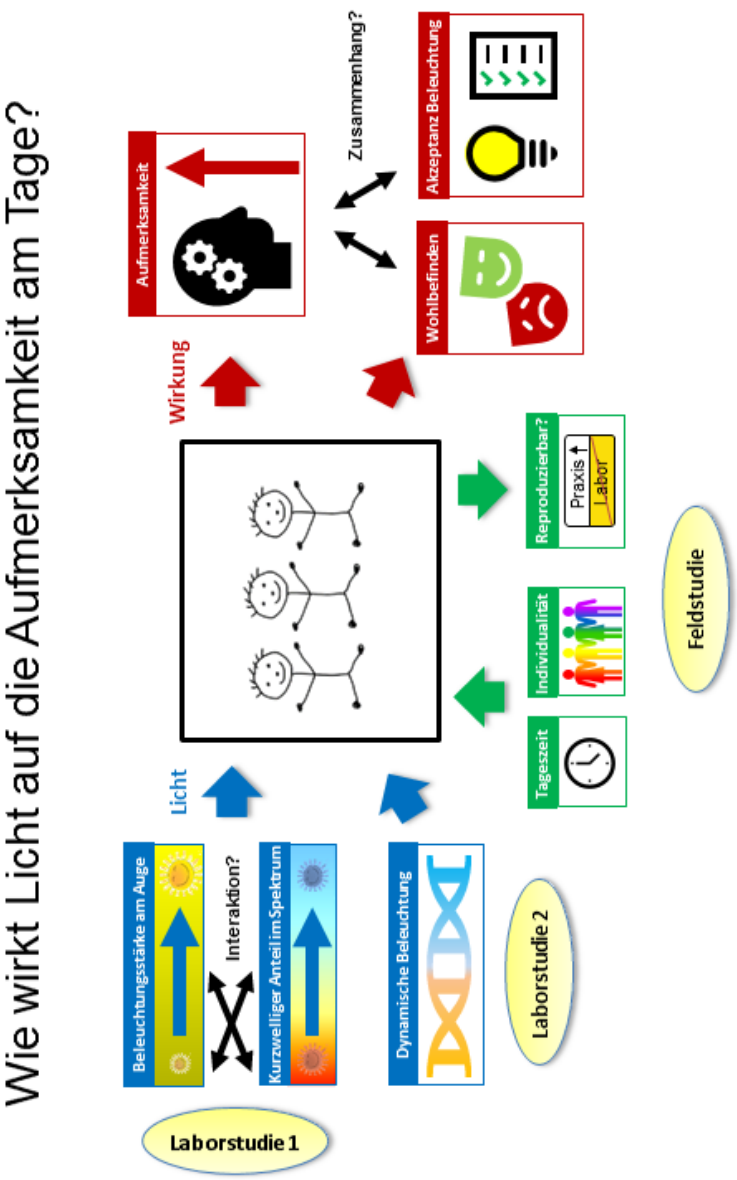


Abbildung 4.1: Übersicht der Hypothesen und Forschungsfragen sowie Zuordnung zu den Versuchen

4.2 Variablen

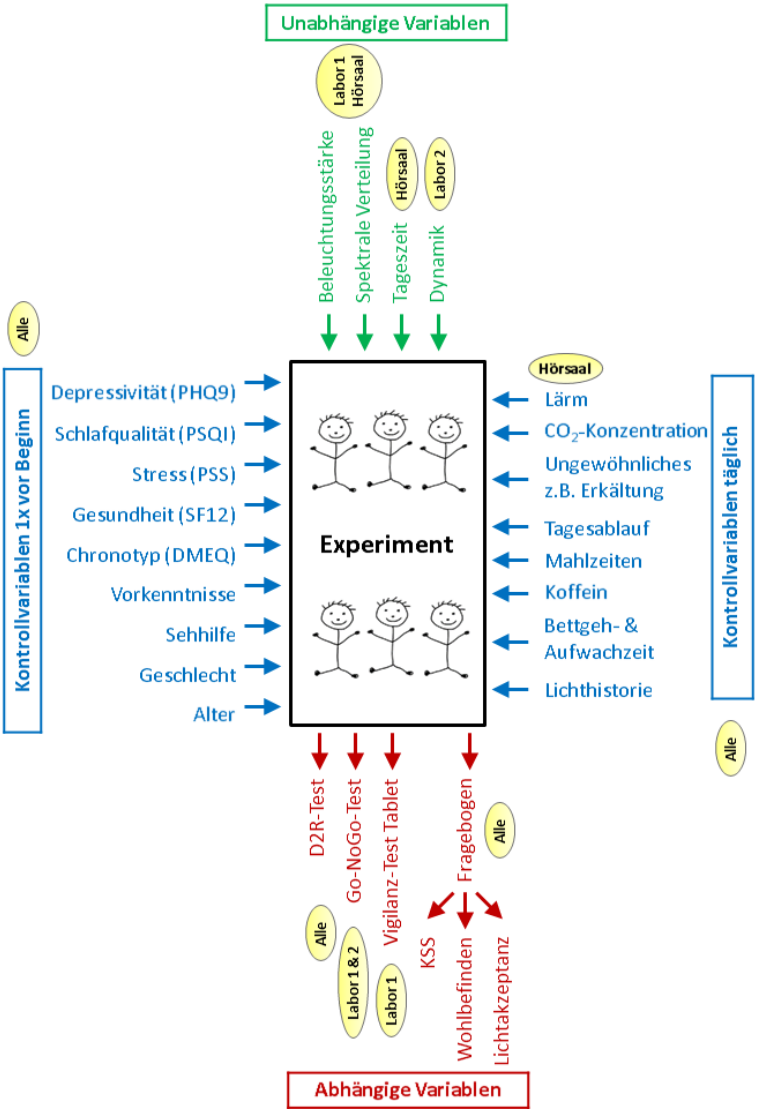


Abbildung 4.2: Übersicht aller Variablen und Operationalisierungen. In den gelben runden Markierungen ist angegeben, in welchen Versuchen sie verwendet werden.

4.2.1 Unabhängige Variablen

Die Eigenschaften der Lichtexposition stellen in dieser Arbeit die unabhängigen Variablen dar. Die Beleuchtung eines Raumes wird durch vielfältige Eigenschaften des Lichts charakterisiert. Die folgenden Parameter wurden in den Experimenten systematisch als unabhängige Variablen variiert:

- vertikale Beleuchtungsstärke E_v auf Augenhöhe
- spektrale Verteilung (melanopischer Wirkungsfaktor a_{mel}, ähnlichste Farbtemperatur CCT)
- Zeitpunkt der Exposition (morgens vs. nachmittags)
- Dynamik der Beleuchtung (statisch vs. dynamisch)

Folgende Parameter der Lichtexposition werden hier nicht untersucht und daher konstant gehalten (Zur Vollständigkeit und für zukünftige Analysen werden sie jedoch im Versuchsdesign beschrieben.):

- räumliche Verteilung
- Dauer der Exposition

4.2.2 Abhängige Variablen und deren Operationalisierung

Die abhängigen Variablen werden anhand von drei kognitiven Testverfahren und einem eigens für die Versuche konstruierten Fragebogen ermittelt. Eine Übersicht ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

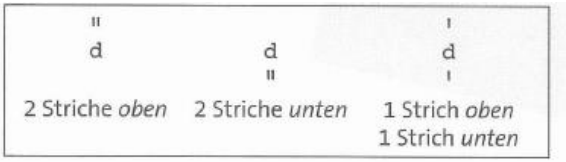
4.2.2.1 D2R-Test

Der d2R-Test ist ein standardisierter Konzentrationstest von Brickenkamp [52] und kann einfach mit einer Gruppe gleichzeitig durchgeführt werden. Dank seiner verbreiteten Nutzung in anderen Studien u. a. in [128, 129, 132, 133] können die Ergebnisse gut miteinander verglichen werden.

Abbildung 4.3: Übersicht über die verwendeten Testverfahren

Die Aufgabe besteht darin, den Buchstaben *d* mit zwei Strichen durchzustreichen. Andere Symbole wie *d* mit mehr oder weniger als zwei Strichen oder der Buchstabe *p* egal mit wie vielen Strichen sind Distraktoren und dürfen nicht durchgestrichen werden. In Abbildung 4.4 ist ein Ausschnitt der Kurzanleitung dargestellt, die für jeden Probanden stets einsehbar war. Der Testbogen besteht aus 14 Zeilen mit diesen Zeichen (im Anhang A – Versuchsdokumente einsehbar). Die Probanden bekamen die Aufgabe, „so schnell wie möglich – aber fehlerfrei“ zu arbeiten. Das Zeitlimit von 15 s pro Zeile wurde von der Versuchsleitung mit der Ansage „Stopp, nächste Zeile!“ bzw. mit einem Signalton vorgegeben.

Jedes ***d***, das ***zwei*** Striche hat, durchstreichen!



Nicht durchstreichen:

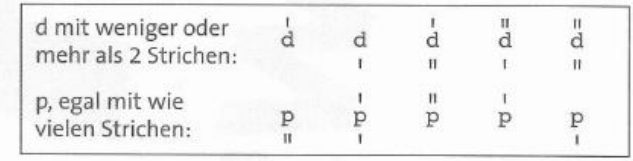


Abbildung 4.4: Zielobjekte und Distraktoren des d2R-Tests [52]

Das Zeitlimit für jede Zeile wurde von ursprünglich 20 s auf 15 s gesenkt. Dies wird laut Anleitung [52] empfohlen, um Deckeneffekte bei wiederholter Durchführung zu vermeiden. Die resultierenden Werte können mit dem Faktor 4/3 zurückgerechnet werden, um sie beispielsweise in Standardwerte der entsprechen Altersgruppe umzurechnen. Da hier ausschließlich Vergleiche in einer Altersgruppe angestellt wurden, ist dies nicht nötig.

Für die Auswertung werden die erste und die letzte Zeile ausgelassen, da die Probanden nicht alle zur exakt gleichen Zeit beginnen und aufhören. Das Ergebnis des d2R-Tests ist die Konzentrationsleistung (KL). Sie berechnet sich aus der Anzahl richtig bearbeiteter Zielobjekte (BZO) minus der Anzahl der Auslassfehler (AF, Zielsymbol ausgelassen) und der Anzahl der Verwechselungsfehler (VF, falsches Symbol durchgestrichen).

$$KL = BZO - AF - VF$$

Dieser Wert eignet sich sehr gut als Messgröße für die Konzentrationsleistung, da er sowohl die Bearbeitungsgeschwindigkeit als auch die Sorgfalt bei der Bearbeitung einbezieht. Unterschiedliche Bearbeitungsstile wie „schnell und viele Fehler“ vs. „langsam und

korrekt“ werden damit gleich bewertet. Möchte man nur die Fehlerrate F% betrachten, kann sie wie folgt bestimmt werden:

$$F\% = \frac{AF + VF}{BZO} \cdot 100$$

Ein Nachtteil des d2R-Tests ist der berichtete Lerneffekt [132], der mit geeigneten Maßnahmen behandelt werden sollte. In einem eigenen Vorversuch (siehe [162]) wurde der d2R-Test mit 40 Probanden sechsmal innerhalb von 2 h durchgeführt und am darauffolgenden Tag mit dem gleichen Ablauf wiederholt. Am ersten Tag gab es eine signifikante Steigerung der Konzentrationsleistung um 25 % bis zum vierten Test. Danach waren die Werte stabil (siehe Abbildung 4.5). Am nachfolgenden Tag verbesserte sich die Konzentrationsleistung zunächst wieder signifikant um 8 % bis zum dritten Test und blieb anschließend stabil. Der Lerneffekt scheint demnach am ersten Tag nach einer gewissen Übung zu verschwinden, beginnt aber am nächsten Tag von neuem, wenn auch weniger stark und schneller stabilisierend als zu Beginn.

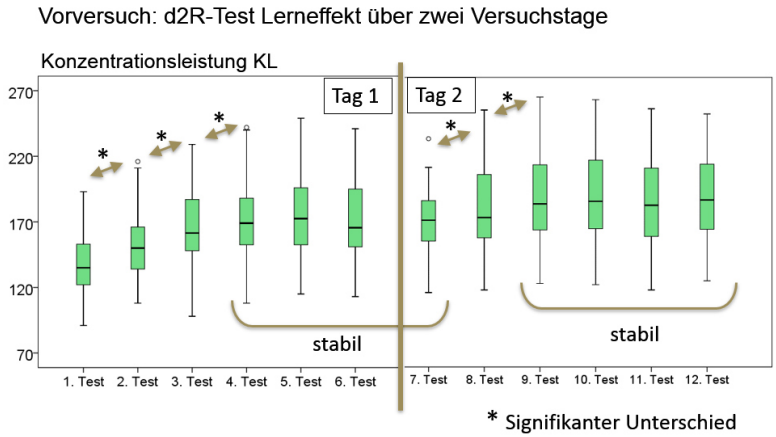


Abbildung 4.5: Beobachteter Lerneffekt des d2R-Tests im Vorversuch

Für die Laborversuche wurde daher ein Zwischensubjektdesign gewählt. Das heißt, jeder Proband bekam nur eine der möglichen Lichtsituationen präsentiert und die Analyse der verschiedenen Lichtsituationen betraf

verschiedene Probanden. Der Lerneffekt ist damit nicht mehr von Bedeutung. In diesem Design ist es wichtig, eine ausreichend große Zahl von Probanden pro Lichtsituation zu nutzen. Sonst könnte es vorkommen, dass eine Probandengruppe den d2R-Test zufällig besonders gut beherrscht und damit das Ergebnis verzerrt.

Ein Zwischensubjektdesign in der Hörsaal-Feldstudie war aus zwei Gründen nicht möglich: Erstens war der personelle Aufwand mehr als eine Vorlesung gleichzeitig zu betreuen zu hoch und zweitens fand sich keine geeignete Veranstaltung mit hoher Studierendenzahl zur selben Zeit in einem Hörsaal ohne Tageslicht. Stattdessen wurden dieselben Studierenden über ein Semester begleitet und diese führten den d2R-Test unter verschiedenen Lichtsituationen aus. Um die Auswirkungen des Lerneffekts zu vermeiden, wurde eine Testphase von zwei Wochen durchgeführt. Im Vorversuch war zu erkennen, dass der Lerneffekt mit der Zeit geringer ausfällt. Daher wurde nach den insgesamt acht durchgeführten d2R-Tests kein Lerneffekt mehr erwartet.

4.2.2.2 Auditiver Go-NoGo-Test

Zusätzlich zum d2R-Test wurde eine auditive Variante des Go-NoGo-Tests als alternative Testmethode für die Aufmerksamkeit verwendet. Go-NoGo-Tests sind Reaktionstests, bei denen ein Proband auf einen kritischen Reiz (*Go*) reagieren muss und auf einen unkritischen Reiz (*NoGo*) nicht reagieren darf [48–50]. Anhand der Reaktionszeit und der Fehlerrate eignet sich der Test gut zur Messung der Konzentrationsleistung. Es wurde eine auditive Variante gewählt, damit visuelle Effekte der Beleuchtung das Testergebnis nicht direkt beeinflussen können.

Das verwendete Testgerät „AuReTim“ (links unten in Abbildung 4.3) wurde vom NiviL-Projektpartner der Eberhard Karls Universität Tübingen entwickelt und mit einem Rasberry-Pi umgesetzt [163]. Die Reize ertönten durch Kopfhörer und die Reaktion wurde durch Drücken eines Tasters durchgeführt. Der Taster wurde in der Hand der entsprechenden

Händigkeit des Probanden gehalten (d.h. rechts bei Rechtshändern und links bei Linkshändern). Beim Hören des kritischen tiefen Tons von 440 Hz sollte so schnell wie möglich der Taster gedrückt werden. War stattdessen der hohe Ton mit 880 Hz zu hören, sollte keine Reaktion erfolgen. Es wurden 60 Töne in randomisierter Reihenfolge abgespielt. Die Dauer eines Tones betrug 200 ms und der Abstand zwischen zwei Tönen betrug 2 s. Der Test wurde individuell vom Probanden über den Touchscreen gestartet und ein Test dauerte insgesamt 5 min. Das Gerät zeichnete u. a. die Reaktionszeit (Mittelwert, Median und Standardabweichung) und die Fehleranzahl in einem Protokoll auf.

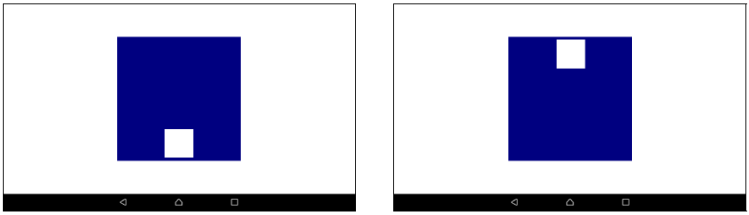
Dieser Test wurde in beiden Laborstudien verwendet. Wegen der hohen benötigten Anzahl an Geräten, kam dieser Test nicht in der Hörsaal-Feldstudie zum Einsatz.

4.2.2.3 Vigilanzaufgabe Tablet

In der ersten Laborstudie wurde ein weiterer Test auf einem Tablet (Lenovo Tab 2 A7-10F) durchgeführt. Die App Psych-Lab 101 (Version 2.0.4, [164]) bietet eine Vielzahl psychologischer Tests zum Einsatz in der Lehre an Universitäten. Es wurde der Test *Vigilance* ausgewählt, weil dieser Vigilanztest ähnlich der *Psychomotor Vigilance Task* (PVT) funktioniert, die häufig in Studien zu nicht-visuellen Wirkungen Anwendung findet [32, 165, 166].

Abbildung 4.6 zeigt einen Screenshot des Vigilanztests. Auch hier sollte auf einen kritischen Reiz (das weiße Quadrat erscheint am oberen Bildschirmrand) so schnell wie möglich durch Berühren des Touchscreens reagiert werden. Beim unkritischen Reiz (das weiße Quadrat erscheint am unteren Bildschirmrand) sollte nicht reagiert werden. Die Reize wurden für 250 ms angezeigt und der Abstand zwischen zwei Reizen betrug 1750 ms. Im Unterschied zum Go-NoGo-Test war die Häufigkeit der kritischen Reize (20-mal) jedoch deutlich geringer als die Häufigkeit des unkritischen Reizes (80-mal). Der Vigilanztest ist dadurch deutlich monotoner und ermüdender. Der Test

dauerte 3:20 min plus eine vorgeschaltete Proberunde von 30 s. Ein Protokoll speicherte die Reaktionszeit (Mittelwert, Median und Standardabweichung) und die Fehlerrate jeweils für den kritischen und den unkritischen Reiz.



(A) Unkritischer Reiz (B) Kritischer Reiz

Abbildung 4.6 Screenshot des Vigilanztests bei unkritischem Reiz (links) und kritischem Reiz (rechts), Neurobehavioral Systems Inc. [164]

4.2.2.4 Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden

Für die subjektive Einschätzung der Aufmerksamkeit und des Wohlbefindens der Probanden wurde ein Fragebogen mit mehreren Teilaspekten entwickelt. Die Karolinska-Sleepiness-Scale (KSS) [38, 167] ist eine 9-stufige Likert-Skala von 1 – Extrem wach bis 9 – Extrem müde, mit dem Schlaf kämpfend. Sie ist eine standardisierte Methode die akute Müdigkeit zu erfragen und wird häufig in anderen Studien verwendet. Hier wird die Wachheit als Gegenteil von Müdigkeit als Messgröße für die Aufmerksamkeit genutzt. Zusätzlich werden ein Item zur subjektiv empfundenen Aufmerksamkeit und sechs Items über das Wohlbefinden in einer 7-stufigen Likert-Skala gefragt: Wohlfühlen, Konzentration, Interesse, Stress, Unruhe, Motivation und Erschöpfung. Außerdem wurde gefragt, wie anstrengend der d2R-Test, der AuReTim und der Tablettest empfunden wurde (ebenfalls 7-stufige Likert-Skala) und ob es Ablenkungen gab und wenn ja welche.

Dieser Fragebogen wurde bei allen Studien mehrmals pro Versuch eingesetzt, mindestens aber am Anfang und am Ende. Im letzten

Fragebogen eines Versuchstages wurde zusätzlich gefragt, ob die Probanden eine Veränderung ihres Wohlbefindens über den Zeitraum des Versuchs bemerkt haben und wenn ja welche. Im Anhang A – Versuchsdokumente sind die Fragen einsehbar.

Die Onlineversion wurde mit SoSci Survey [168] erstellt und im Labor auf dem Tablet durchgeführt. Die Bildschirmhelligkeit wurde niedrig eingestellt, um den Störeinfluss des Bildschirms zu vermeiden. Eine Kontrollmessung mit dem Spektroradiometer ergab 12 lx vertikal auf Augenhöhe (a_{mel} = 0,95; E_{mel} = 0,011 W/m²) durch das Tablet. In der Hörsaal-Feldstudie konnten die Probanden die Fragen auf ihren eigenen Geräten durchführen und es gab zur Ergänzung auch eine Papierversion mit identischem Inhalt.

4.2.2.5 Fragebogen zur Akzeptanz der Beleuchtung

Die Beurteilung der Beleuchtung durch die Probanden wurde durch vier Items in einer 7-stufigen Likert-Skala abgefragt: künstliche Beleuchtung allgemein, Helligkeit, Lichtfarbe und (psycholigische) Blendung. Die Beantwortung dieses Fragebogens wurde an das Versuchsende gestellt, damit die Probanden bereits an die Lichtbedingung gewöhnt waren. Außerdem sollte den Probanden möglichst nicht bewusst sein, dass die Beleuchtung das Versuchsthema war. Die Beleuchtungsfragen wurden gemeinsam mit dem Empfinden der Umgebungsbedingungen abgefragt. Diese Fragen wurden zusätzlich zur Kontrolle der Störgrößen verwendet und waren ebenfalls 7-stufige Likert-Skalen: Luftqualität, Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, Geräuschpegel und im Falle der Hörsaal-Feldstudie weiterhin Lesbarkeit der Folien und Vorlesungsschwierigkeit. Im Anhang A – Versuchsdokumente sind die Fragen einsehbar.

4.2.3 Kovariablen

Vor Beginn des Experiments bearbeitete jeder Proband einen Vorabfragebogen online. Zunächst wurden allgemeine Informationen (Alter, Geschlecht, Brille?) und Vorkenntnisse bezüglich Konzentrations-

tests und Lichttechnik abgefragt. Mit standardisierten Fragebögen wurden Chronotyp (Deutsche Version des Horne-Östbergs *Morningness-Eveningness Score*, [146] DMEQ), Schlafqualität (*Pittsburgh Schlafqualitätsindex* [169], PSQI), Stresslevel (*Perceived Stress Scale* [170], PSS), Gesundheitszustand (*SF12 Fragebogen zum Gesundheitszustand* [171, 172]) und Depressivität (*Gesundheits-fragebogen für Patienten* [173, 174], PHQ9) erfasst. So lässt sich nachträglich kontrollieren, ob es zusätzliche Einflüsse gab.

In dieser Arbeit wurden den Probanden keine Vorschriften zu ihrem Tagesablauf gemacht. Deshalb wurden am Versuchstag weitere Informationen abgefragt: Lichthistorie (Zeit und Dauer des Aufenthalts im Freien), Einschlaf- und Aufstehzeit, Koffeinkonsum (ja/nein), Einnahme von Mahlzeiten (ja/nein), Tagesablauf in Stunden (Arbeit/Uni, Freizeit, Sport) und besondere Umstände wie z. B. eine Erkältung.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Aufmerksamkeit ist das Raumklima, insbesondere die CO_2-Konzentration der Luft. Diese wurde in allen Versuchen protokolliert. In Laborstudie 1 betrug der Mittelwert der CO_2-Konzentration 550 ppm, das Minimum lag bei 440 ppm und das Maximum bei 990 ppm. Laut Tabelle 4.1 entspricht dies einer mittleren bis mäßigen Luftqualität. In Laborstudie 2 lagen die CO_2-Werte dank einer ausgefallenen Lüftungsanlage durchschnittlich bei mäßiger Luftqualität: Mittelwert 750 ppm, Minimum 420 ppm und Maximum 1 400 ppm. Eine niedrige Luftqualität von über 1 000 ppm wurde an 4 von 27 Versuchstagen erreicht. Die detaillierten Messwerte sind im Anhang B1) und B1) zu finden. Da in Feldstudien die Umgebungsbedingungen (CO_2-Konzentration, Raumtemperatur, Luftfeuchte und Lärm [175, 176]) schwieriger zu kontrollieren sind, werden diese für die Hörsaalstudie im Abschnitt 4.5.6. ausführlich analysiert.

Tabelle 4.1: Kategorien der Raumluftqualität nach CO_2-Konzentration laut DIN EN 15251:2012-12 [177]

Raumluftqualität	Hoch	Mittel	Mäßig	Niedrig
CO_2-Konzentration [ppm]	< 400	400–600	600–1 000	> 1 000

4.3 Laborversuch 1: Extreme Lichtbedingungen

4.3.1 Design

Der erste Laborversuch fokussiert sich auf die Fragestellung, ob eine erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe E_v bzw. eine spektrale Veränderung zu einem höheren melanopischen Wirkungsfaktor a_{mel} eine akute Steigerung der Aufmerksamkeit am Tage bewirkt. Außerdem soll die Wechselwirkung beider Größen untersucht werden: Führt eine gleichzeitige Erhöhung von E_v und a_{mel} zu einer weiteren Steigerung der Aufmerksamkeit, gibt es eine Sättigung oder wirkt sich dies sogar negativ aus? Das Wohlbefinden und die Akzeptanz der Beleuchtung werden beobachtet, um festzustellen, ob die verwendeten Lichtszenen für die Probanden akzeptabel sind.

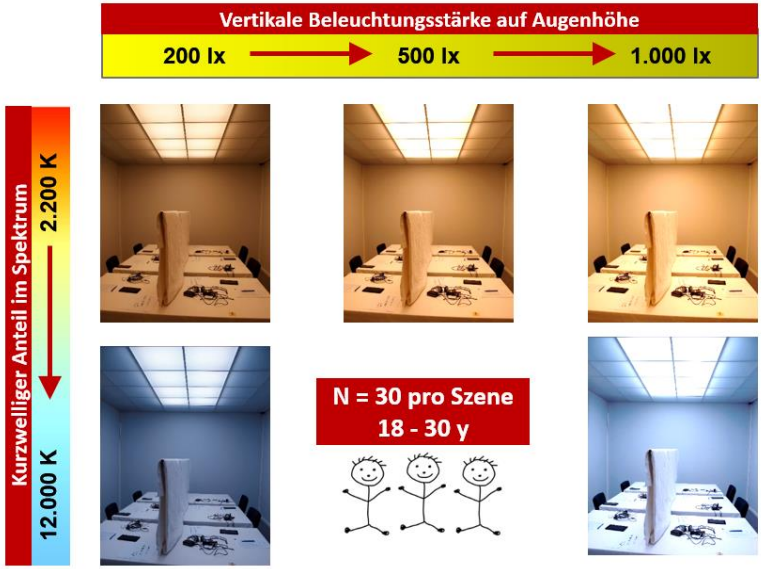


Abbildung 4.7: Design der Laborstudie 1

Der Versuch wurde in einem Spezialversuchsraum durchgeführt und ein Zwischensubjektdesign gewählt. Reihenfolgeeffekte der Lichtszenen und störende Lerneffekte bei den verwendeten Tests sind so ausgeschlossen. Es wurden fünf Lichtszenen ausgewählt und jede Lichtszene wurde jeweils 30 zufällig zugeorneten Probanden gezeigt. Jede Lichtszene wurde für 90 min von 9:00 bis 10:30 Uhr getestet. Der Versuch fand vom 10. August bis 30. September 2016 an Werktagen statt.

4.3.2 Probanden

An dem Versuch nahmen insgesamt 165 Probanden im Alter von 18 bis 30 Jahren (Durchschnitt 25,5 Jahre) teil. Sie wurden größtenteils über ein Probandenportal der TU Berlin [178] rekrutiert. Einige Probanden wurden außerdem über ebay-Kleinanzeigen, Aushänge an der TU Berlin und Probandenkontakte am Fachgebiet rekrutiert. Für die Teilnahme am Versuch gab es eine Aufwandsentschädigung von 15 €. Es gab zwei weitere Voraussetzungen: gute Deutschkenntnisse und keine Erfahrungen mit Konzentrationstests. Mit einer Sehtestkarte für den Nahbereich [179] wurde zu Versuchsbeginn auf eine Sehschärfe größer 0,8 geprüft.

Insgesamt nahmen 94 Frauen und 71 Männer teil. Die berufliche Bandbreite der Probanden war folgende: 73,9 % Studierende, 14,5 % Angestellte, 4,8 % auf Jobsuche und 6,6 % Schüler, Selbstständige und Sonstige. Der Chronotyp-Fragebogen ergab 25 moderate Morgentypen, 27 moderate Abendtypen, 1 definiter Abendtyp und 112 Neutraltypen. Das entspricht einer gewöhnlichen Verteilung in der Bevölkerung, in der Normaltypen am häufigsten vertreten sind [6].

Die Probanden sollten möglichst nicht wissen, dass die Beleuchtung Untersuchungsgegenstand war, um Erwartungseffekte zu vermeiden. Der offizielle Hintergrund war daher „Erkenntnisse zur Konzentrationsfähigkeit am Morgen in Bezug auf das Raumklima zu finden“. Jeder Proband bekam nur eine Lichtszene zu sehen, die bereits eingeschaltet war, und der Fragebogen zur Akzeptanz der Beleuchtung

wurde erst kurz vor Ende des Versuchs bearbeitet. Eine anschließende mündliche Befragung ergab, dass die Verschleierung für die meisten Probanden erfolgreich war, jedoch nicht für alle.

4.3.3 Versuchsaufbau und Lichtszenen

In der Decke des Spezialversuchsraums des Fachgebiets Lichttechnik wurde eine große leuchtende Fläche aus einem 6 x 2 Raster von 60 x 60 cm² großen LED-Panels montiert, die eigens für das Projekt entwickelt wurden. Die LED-Leuchten enthalten drei Kanäle: eine blaue LED mit Peak-Wellenlänge 480 nm, die gezielt das Maximum der ipRGCs stimuliert, eine warmweiße LED bei 2 000 K mit einer blauarmen spektralen Verteilung ähnlich einer Glühlampe und eine kaltweiße LED bei 4 000 K für einen hohen Lichtstrom der Leuchte. Weitere Spezifikationen und Details zur Leuchte finden sich in Niedling (2017) [180]. Es gab keinen Tageslichteinfluss im Versuchsraum. Ein künstliches Fenster könnte diesen simulieren, wurde aber nicht genutzt. Der Spezialversuchsraum ist 4,8 m x 3,8 m groß mit einer Deckenhöhe von 2,8 m. In dem Raum standen direkt unter der Lichtdecke drei mit weißem Moltonstoff (zur Vermeidung von Reflexionen) bezogene Tische, an denen sechs Probanden sitzen konnten. In Abbildung 4.8 sind Fotos und in Abbildung 4.9 ist der Grundriss des Versuchsraums mit Leuchtenanordnung zu sehen. Die Trennwand aus weißem Moltonstoff wurde erst im zweiten Laborversuch hinzugefügt, um gegenseitige Beeinflussung der Probanden zu reduzieren. Schnittansichten finden sich im Anhang B1).

Es wurden fünf Lichtszenen nach folgenden Kriterien ausgewählt: Minimum und Maximum von melanopischem Wirkungsfaktor a_{mel}, Minimum und Maximum von vertikaler Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe E_v und zusätzlich eine Szene mit mittlerem E_v, für weniger extreme Bedingungen. Alle lichttechnischen Parameter befinden sich in Tabelle 4.2 und die Spektren in Abbildung 4.10. Das Minimum von a_{mel} wurde bei warmweißem Licht von 2 200 K mit 0,3 erzielt und entspricht damit fast einem a_{mel} von Kerzenlicht (a_{mel} = 0,24 [70]). Das kaltweiße

Licht von 12 000 K erzielt den maximalen a_{mel} mit 1,5 und ist sogar größer als bei Tageslicht (Normlichtart D65 besitzt einen a_{mel} von 0,9 [70]). Dieses Licht besitzt einen geringen allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a von 56. Da jedoch ein möglichst extremer Unterschied von a_{mel} höhere Priorität für den Versuch hat, wurde der niedrige R_a in Kauf genommen, zumal das Labor komplett in Weiß und in Grautönen gestaltet war.

Die minimale Beleuchtungsstärke E_v, gemessen auf Augenhöhe, wurde auf 200 lx festgelegt. Dies entsprach 450 lx horizontal auf dem Tisch, was nahezu der geforderte Mindestwert von 500 lx laut DIN EN 12464-1 [76] für Büroarbeitsplätze ist. Damit wurde sichergestellt, dass auch mit geringem E_v der d2R-Test gut für die Probanden zu erkennen war. Die Testanleitung weist zudem darauf hin, dass der Test an *„hellen Arbeitsplätzen“* [52] durchgeführt werden sollte. Das Maximum von E_v mit 1 000 lx entspricht etwa 1 900 lx horizontal auf dem Tisch und wurde in Referenz zu anderen Studien (siehe Abschnitt 2.3.2), die E_v untersucht haben, ausgewählt. Zusätzlich wurde ein mittleres E_v von 500 lx ausschließlich bei 2 200 K gewählt, um zu testen, ob eine positive Wirkung auch bei weniger extremen Beleuchtungsstärken eintritt. Ein repräsentatives Leuchtdichtebild des Labors findet sich in Abbildung 4.11. Weiterhin finden sich im Anhang B1) die CO_2-Konzentrationen zu Beginn und Ende des Versuchs sowie die Betrachtung der Messunsicherheit im Anhang B2).

Abbildung 4.8: Fotos des Versuchsraums, links: 2 200 K, rechts: 12 000 K [181]

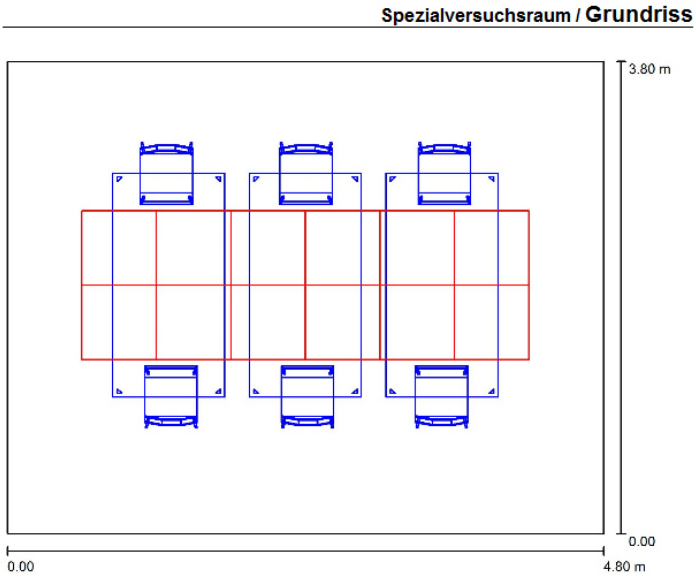


Abbildung 4.9: Grundriss des Versuchsraums mit Leuchtenanordnung

Tabelle 4.2: Lichttechnische Parameter der Lichtszenen, vertikal auf Augenhöhe gemessen ($E_{\alpha\text{-opic}}$ wurde mit der Toolbox von [79] berechnet.)

Lichtszenen	1	2	3	4	5
E_v [lx]	200 ± 20	500 ± 50	1 000 ± 100	200 ± 20	1 000 ± 100
CCT [K]	2 200 ± 100	2 200 ± 100	2 200 ± 100	12 000 ± 500	12 000 ± 500
a_{mel}	0,3	0,3	0,3	1,5	1,5
$E_{melanopic}$ [µW/cm²]	9,41	21,43	44,71	47,65	236,16
$E_{cyanopic}$ [µW/cm²]	3,35	7,45	15,70	21,41	105,88
$E_{rhodopic}$ [µW/cm²]	14,68	33,64	70,16	47,52	235,07
$E_{chloropic}$ [µW/cm²]	26,68	61,86	128,96	43,05	212,21
$E_{erythropic}$ [µW/cm²]	38,32	89,45	186,32	40,02	196,93
Photonendichte [1/(s·cm²)]	$2{,}5\cdot10^{14}$	$5{,}9\cdot10^{14}$	$1{,}2\cdot10^{15}$	$2{,}5\cdot10^{14}$	$1{,}3\cdot10^{15}$
R_a	87	87	87	56	56
E_H [lx]	450	1 000	1 900	450	1 900

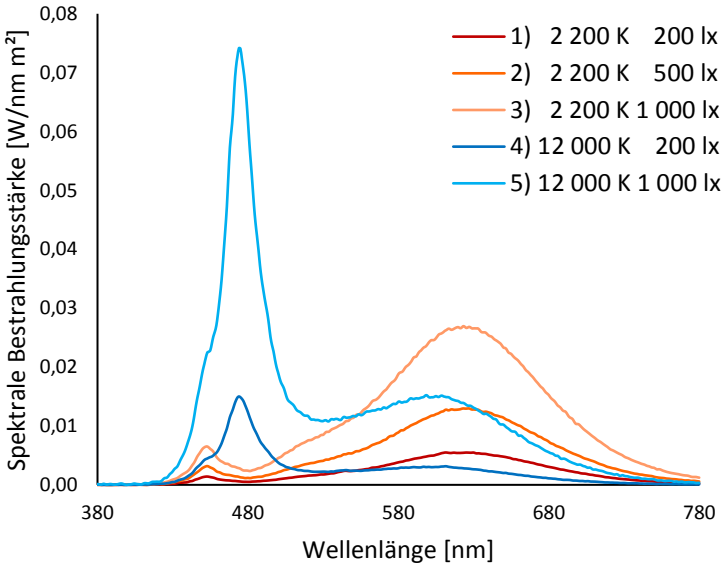


Abbildung 4.10: Spektrale Verteilungen der Lichtszenen

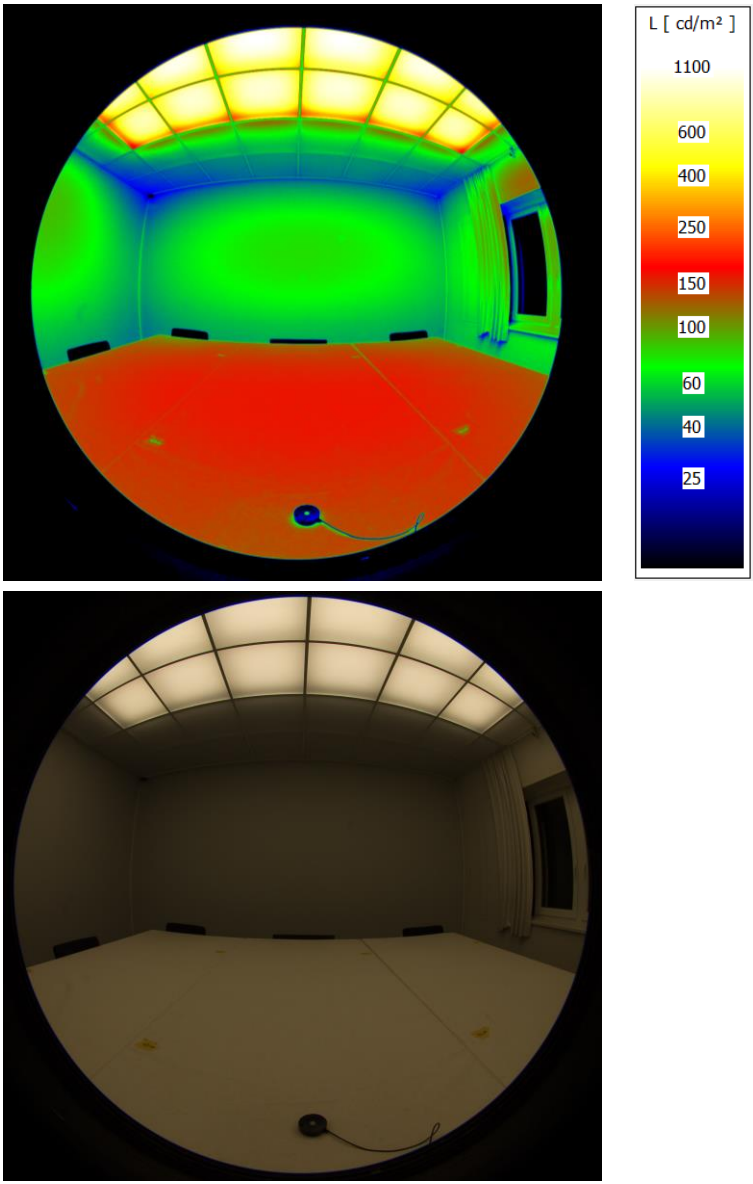


Abbildung 4.11: Repräsentatives Leuchtdichtebild des Labors ohne Trennwand bei 500 lx aus Beobachterposition der Probanden (oben) und zugehöriges Kamerabild (unten)

4.3.4 Messgrößen

Die abhängige Variable Aufmerksamkeit wurde mit dem d2R-Test, dem auditiven Go-NoGo-Test und der Vigilanzaufgabe auf dem Tablet gemessen. Die Fragebögen (im Anhang einsehbar) zur subjektiven Aufmerksamkeit, zum Wohlbefinden, zur Testschwierigkeit, zur Akzeptanz der Beleuchtung und zur Lichthistorie wurden auf dem Tablet ausgefüllt. Der Vorabfragebogen sollte vor Teilnahme am Experiment online ausgefüllt werden. Bei Vergessen wurde dies nach dem Versuch vor Ort nachgeholt. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Tests und Fragebögen befinden sich in Abschnitt 4.2.2.

4.3.5 Versuchsablauf

Der Versuch begann um 9:00 Uhr morgens. Die Probanden wurden einzeln mit einer Sehtesttafel [182] auf Normalsichtigkeit geprüft. Nach einer kurzen Begrüßung füllten die Probanden eine Einverständniserklärung aus und der Versuchsablauf wurde erklärt (siehe auch Abbildung 4.12). Die Versuchsanweisungen waren schriftlich festgehalten und wurden vorgelesen, um einheitliche Bedingungen herzustellen. Nach der Begrüßung wurde ein erster Wohlbefinden-Fragebogen ausgefüllt. Anschließend wurde der d2R-Test erklärt und zweimal geübt. Danach folgten die Erklärung, eine kurze Übungsrunde und ein Durchlauf des auditiven Go-NoGo-Tests. Ebenso wurde mit der Vigilanzaufgabe verfahren. Nach einem weiteren d2R-Test und einem Fragebogen zum Wohlbefinden und zur Testschwierigkeit gab es eine 10-minütige Pause, in der Sudokus gelöst werden durften. Danach wurde jeder Test noch einmal durchgeführt und mit dem Fragebogen zum Wohlbefinden (inklusive der Frage zur wahrgenommenen Veränderung), der Lichtakzeptanz und der Lichthistorie abgeschlossen. Der Versuch endete um 10:30 Uhr und die Versuchsdauer betrug insgesamt 90 min.

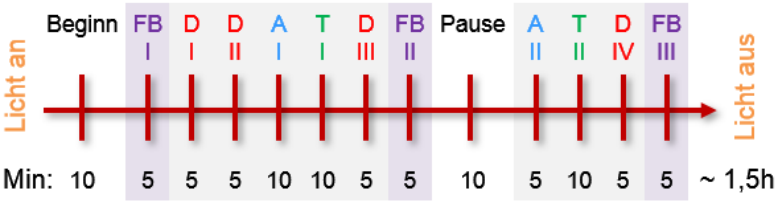


Abbildung 4.12: Ablauf der Tests (D = d2R, A = Audio, T = Tablet) und Fragebögen (FB) im Versuch

4.4 Laborversuch 2: Dynamische Lichtbedingungen

4.4.1 Design

Folgende Hypothese wurde in der zweiten Laborstudie untersucht: Eine dynamische Abfolge von Lichtszenen wirkt effektiver auf die Aufmerksamkeit als eine statische Lichtszene gleicher Dauer. Basierend auf der Methodik des ersten Laborversuchs wurde ein optimiertes Design (siehe Abbildung 4.13) konzipiert. Die Studie fand im Winter von Januar bis März 2017 statt. In der dunklen Jahreszeit werden größere Effekte erwartet, da die Probanden deutlich weniger Tageslicht ausgesetzt sind. Der Versuchszeitraum wurde auf den frühen Nachmittag von 14:00 bis 15:30 Uhr gelegt, um die potenziell leistungsschwache Zeit des Mittagstiefs auszunutzen. Eine Übungsphase am gleichen Versuchstag morgens um 9:00 bis 9:45 Uhr dient zur Vorbereitung der Probanden und stellt eine Obergrenze für die Aufstehzeit der Probanden dar. Jeweils 30 Probanden wurden zufällig einer von drei Lichtszenen (zwei statische und eine dynamische) zugeordnet.

4.4.2 Probanden

An dem Versuch nahmen insgesamt 92 Probanden im Alter von 18 bis 30 Jahren (Durchschnitt 24,5 Jahre) teil. Davon waren 50 weiblich und 42 männlich. Die Rekrutierung erfolgte über das Probandenportal [178] der TU Berlin. Eine vorherige Teilnahme an der ersten Studie war ein Ausschlusskriterium. Weiterhin wurde wieder auf Normalsichtigkeit (Sehschärfe > 0,8) geprüft. Bis zu sechs Probanden konnten gleichzeitig am Versuch teilnehmen. Am Ende des Versuchs wurde eine Aufwandsentschädigung von 20 € ausgezahlt. Die Probanden waren am häufigsten Studierende mit 86 %. 4 % waren Angestellte, 6 % auf Jobsuche und 4 % Schüler, Selbstständige und sonstiges. Die meisten Probanden wurden dem neutralen Chronotyp (67) zugeordnet und es gab einige Abendtypen (23 Moderate Abendtypen und 2 Definitive Abendtypen) sowie keine Morgentypen.

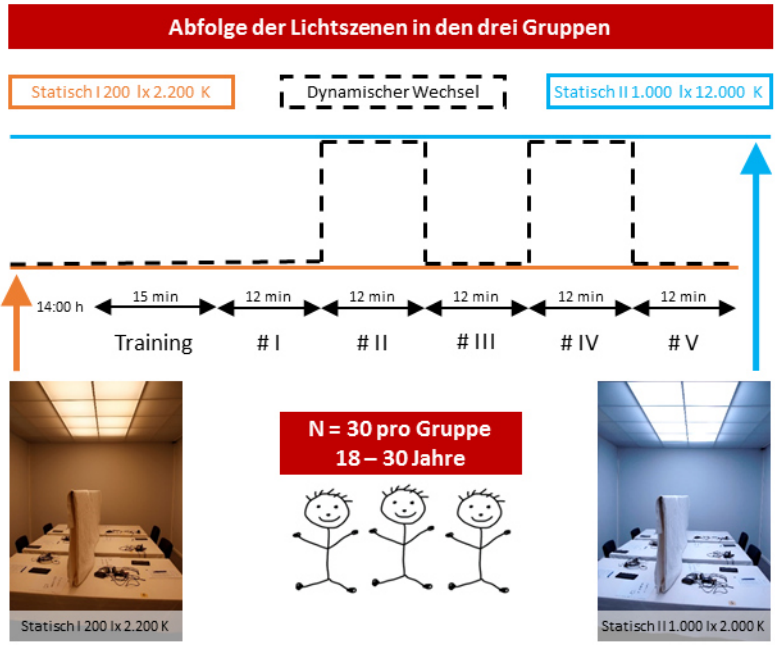


Abbildung 4.13: Übersicht Design Laborversuch 2

Der eigentliche Studienzweck wurde wieder nach bester Möglichkeit verschleiert und als offizieller Grund „die Untersuchung von Konzentration und Wohlbefinden im Tagesverlauf“ angegeben. Fragen an die Probanden zur Beleuchtung befanden sich gemeinsam mit Fragen zum Raumklima im Abschnitt Umgebungsbedingungen. Da diesmal die Lichtbedingungen nicht konstant waren, sondern im Verlauf des Versuchs geändert wurden, konnten die Probanden diese Änderung auch wahrnehmen. Auch hier ergab eine anschließende Befragung eine erfolgreiche Verschleierung für die meisten Probanden mit vereinzelten Ausnahmen.

4.4.3 Versuchsaufbau und Lichtszenen

Der Versuch fand im gleichen Labor mit den gleichen Leuchten statt wie die erste Laborstudie. Um eine gegenseitige Beeinflussung der

Probanden zu mindern, wurde eine weiße Trennwand zwischen den Sitzplätzen hinzugefügt. Es wurden zwei statische Lichtbedingungen aus der ersten Studie übernommen: *Statisch I* bei 2 200 K und 200 lx vertikal auf Augenhöhe vs. *Statisch II* bei 12 000 K und 1 000 lx vertikal auf Augenhöhe. Beide Szenen wurden aufgrund der hinzugekommenen Trennwand neu eingemessen. Die warmweiße Szene wurde außerdem als gemeinsame Referenzszene für die Trainingsphasen verwendet. Neu war eine *dynamische* Lichtszene, die alle 12 min zwischen den beiden statischen Lichtszenen wechselte.

Der abrupte Wechsel des Lichts in der dynamischen Szene könnte einen Erwartungseffekt (Hawthorne-Effekt [134]) hervorrufen, den es in den beiden statischen Szenen nicht gibt. Dieser Effekt könnte die Ergebnisse verzerren. Um dies auszuschließen wurde ein Lichtsignal in allen Szenen eingeführt, das alle 12 min den Beginn des nächsten Versuchsblocks ankündigte. Dabei wurde die Beleuchtung der Deckenleuchten ausgeblendet und die Beleuchtung an den Wänden des Versuchsraums eingeblendet. Die Wandbeleuchtung wurde möglichst nah an den Lichtszenen gewählt: 200 lx vertikal auf Augenhöhe und warmweiß mit 2 800 K bzw. kaltweiß mit 5 600 K. Nach 10 s wurde die Wandbeleuchtung wieder ausgeblendet und die Deckenbeleuchtung wieder eingeblendet. Bei der dynamischen Lichtszene wechselte dabei die Lichtszene und bei den beiden statischen Lichtszenen wurde wieder die ursprüngliche Beleuchtung hergestellt. Nach einer kurzen Adaptationszeit von ca. 30 s begann der nächste Versuchsblock.

Die folgende Tabelle zeigt die lichttechnischen Parameter der Lichtszenen und der Lichtsignale und Abbildung 4.14 zeigt die Spektren. Fotos, Grundriss und Leuchtdichtebild befinden sich im vorherigen Abschnitt 4.3.3.

Tabelle 4.3: Lichttechnische Parameter der Lichtszenen, vertikal auf Augenhöhe gemessen ($E_{\alpha\text{-opic}}$ wurde mit der Toolbox von [79] berechnet.)

Lichtszenen	200 lx + 2 200 K	1 000 lx + 12 000 K	Signal warm	Signal kalt
E_v [lx]	200 ± 20	1 000 ± 100	200 ± 20	200 ± 20
CCT [K]	2 200 ± 100	12 000 ± 500	2 800 ± 100	5 600 ± 200
a_{mel}	0,3	1,6	0,4	0,6
$E_{melanopic}$ [µW/cm²]	8,63	240,3	11,41	20,46
$E_{cyanopic}$ [µW/cm²]	3,04	101,3	3,80	14,76
$E_{rhodopic}$ [µW/cm²]	13,50	238,5	17,68	26,74
$E_{chloropic}$ [µW/cm²]	24,85	212,5	29,28	33,77
$E_{erythropic}$ [µW/cm²]	36,05	194,9	38,36	36,11
Photonen-dichte [1/(s·cm²)]	$2{,}4 \cdot 10^{14}$	$1{,}3 \cdot 10^{15}$	$2{,}2 \cdot 10^{14}$	$1{,}8 \cdot 10^{14}$
R_a	87	54	85	72
E_H [lx]	450	1 900	270	270

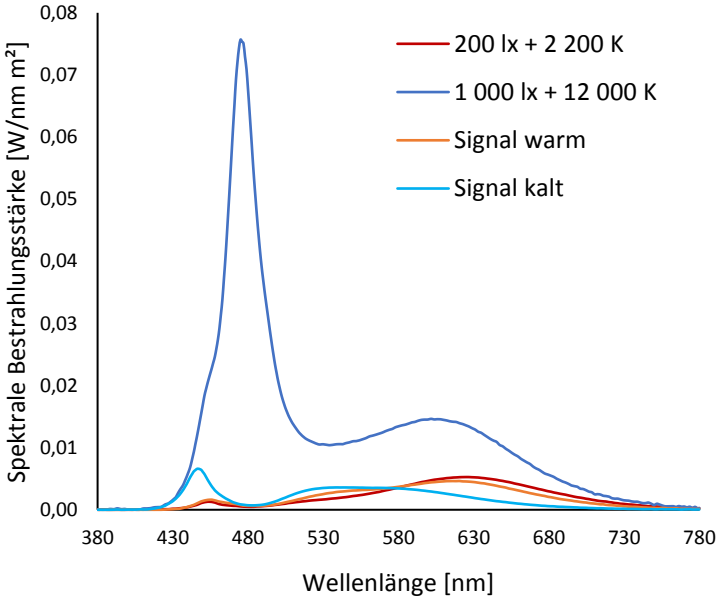


Abbildung 4.14: Spektrale Verteilungen der Lichtszenen

4.4.4 Messgrößen

Die verwendeten Messgrößen waren nahezu identisch zur ersten Laborstudie. Es wurden der d2R-Test, der auditive Go-NoGo-Test und die KSS als Operationalisierung für die Aufmerksamkeit verwendet. Der Fragebogen (im Anhang einsehbar) erfasste die subjektive Aufmerksamkeit, das Wohlbefinden, die Testschwierigkeit und die Akzeptanz der Beleuchtung. Auch der Vorabfragebogen wurde wieder vor dem Experiment online ausgefüllt. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Tests und Fragebögen befinden sich in Abschnitt 4.2.2.

4.4.5 Versuchsablauf

Der Versuch fand in zwei Abschnitten statt: die Trainingsphase von 9:00 bis 9:45 Uhr morgens und die Versuchsphase von 14:00 bis 15:30 Uhr nachmittags. Eine Übersicht findet sich in Abbildung 4.15 und die inhaltliche Zusammensetzung der einzelnen Fragebögen ist in Tabelle 4.4 aufgelistet. Die Versuchsanweisungen waren schriftlich festgehalten und wurden vorgelesen, um einheitliche Bedingungen herzustellen.

Die **Trainingsphase** diente der Vorbereitung der Probanden und sollte eine möglichst ähnliche Aufstehzeit sicherstellen. Sie fand stets bei Referenzbeleuchtung (Statisch I 200 lx + 2 200 K) statt. Die Probanden wurden einzeln hereingebeten und der Sehtest durchgeführt. Anschließend wurde eine Einverständniserklärung ausgefüllt und der Versuchsablauf erklärt. Zu Beginn wurde ein Fragebogen ausgefüllt. Es wurden sowohl der d2R-Test als auch der auditive Go-NoGo-Test zunächst erklärt und jeweils eine Übungsrunde durchgeführt. Danach wurden beide Tests noch einmal durchgeführt. Offiziell war dies der erste „richtige“ Test, aber er diente dem Training der Probanden. Am Ende folgte ein weiterer Fragebogen. Zum Abschluss wurden die Probanden gebeten am Nachmittag pünktlich zu erscheinen und bis dahin auf Schlaf zu verzichten.

Die **Versuchsphase** begann mit einer erneuten Trainingseinheit (d2R-Test, Audiotest und Fragebogen) und setzte sich mit fünf 12-minütigen Blöcken fort. Diese Blöcke wurden jeweils mit dem Lichtsignal an den Wänden eingeleitet. Bei den beiden statischen Lichtbedingungen wurde hier stets die gleiche Lichtszene (entweder Statisch I 200 lx + 2 200 K oder Statisch II 1 000 lx + 12 000 K) eingestellt. In der dynamischen Bedingung wechselten sich beide Szenen ab: Statisch I 200 lx + 2 200 K für die Blöcke 1, 3 und 5 und Statisch II 1 000 lx + 12 000 K für die Blöcke 2 und 4. In den Blöcken 1, 2 und 5 wurden jeweils ein d2R-Test und ein Audiotest durchgeführt. Um die Probanden nicht zu überanstrengen und für Abwechslung und Motivation zu sorgen, wurden in den Blöcken 3 und 4 zwei Konzentrationsspiele auf dem Tablet (*Colorado* und *Zahlenkönig* der App *Neuronation* [183]) durchgeführt. Diese wurden den Probanden offiziell als weitere Tests vorgestellt, jedoch nicht ausgewertet. Jeder Block schloss mit einem Fragebogen ab.

Tabelle 4.4: Inhaltliche Zusammensetzung der Fragebögen (FB)

FB Nr.	Inhalt
FB I	KSS, Wohlbefinden, Bett- und Aufstehzeit, Koffeinkonsum, Frühstück ja/nein, Aufenthalt im Freien, Ungewöhnliches
FB II	Testschwierigkeit, KSS, Wohlbefinden, Umgebungsbedingungen
FB III	KSS, Wohlbefinden, bisheriger Tagesverlauf, Koffeinkonsum, Mittag ja/nein, Aufenthalt im Freien, Ungewöhnliches, Umgebungsbedingungen
FB IV	Testschwierigkeit, KSS, Wohlbefinden
FB V	Testschwierigkeit, KSS, Wohlbefinden, Veränderung wahrgenommen?, Umgebungsbedingungen
FB VI	Testschwierigkeit, KSS, Wohlbefinden
FB VII	Testschwierigkeit, KSS, Wohlbefinden
FB VIII	Testschwierigkeit, KSS, Wohlbefinden, Veränderung wahrgenommen?, Umgebungsbedingungen

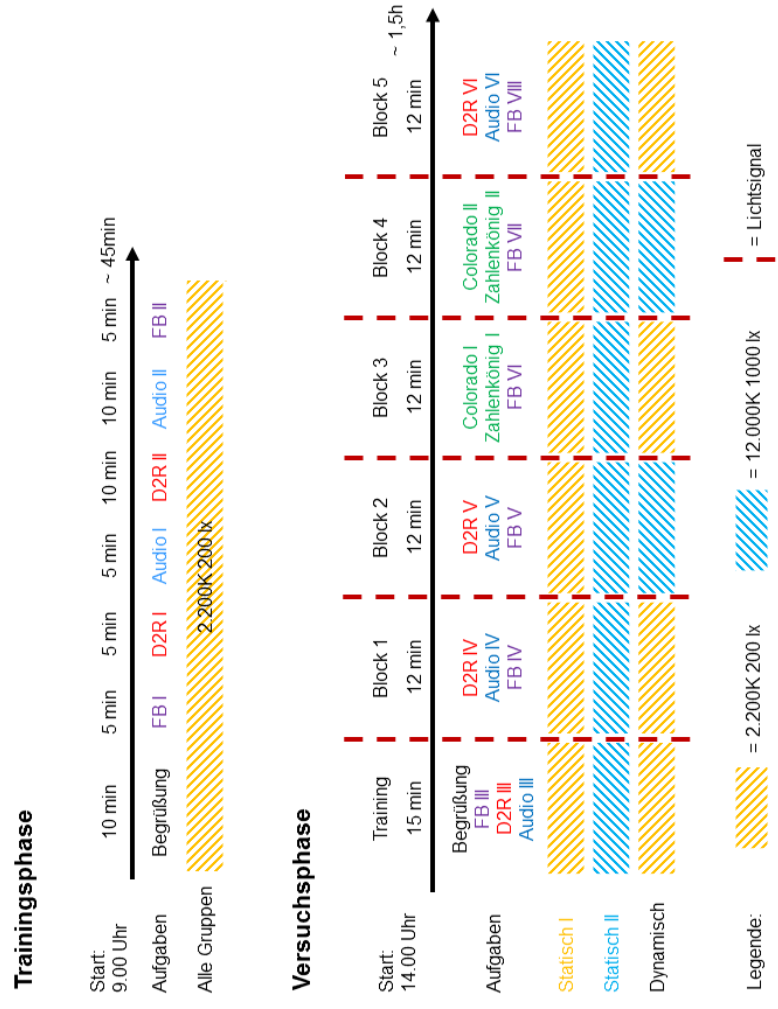


Abbildung 4.15: Versuchsablauf der Trainings- und Versuchsphase (FB = Fragebogen)

4.5 Hörsaalstudie

4.5.1 Design

Die Versuche im Labor bieten zwar eine sehr gute Möglichkeit, die potenziellen Einflussparameter zu kontrollieren, aber bilden die Wirklichkeit nur eingeschränkt nach. In einem Quasi-Feldversuch soll daher ein möglichst realitätsnahes Setting untersucht werden. Er soll zeigen, ob die Ergebnisse aus dem Labor in der Praxis verifiziert werden können. Deshalb wurde darauf geachtet, die Methodik so weit möglich anzugleichen. Auch hier lautete die Fragestellung, ob sich durch eine höhere vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe oder einen erhöhten melanopischen Wirkungsfaktor die Aufmerksamkeit steigern lässt. Weiterhin soll der Einfluss der unterschiedlichen Tageszeiten „Mittagstief“ vs. „früher Morgen“ untersucht werden. Als Anwendungsfall dient eine Vorlesung an der TU Berlin. Studierende müssen in Vorlesungen über einen langen Zeitraum konzentriert bleiben, oft unter schwierigen Umständen wie komplexen Inhalten, wenig anregenden Vortragsstilen oder Müdigkeit. Die Vision dieser Studie ist es, mit dem richtigen Licht den Studierenden zu helfen, ihre Aufmerksamkeit leichter aufrecht zu erhalten.

Eine schematische Übersicht der Versuchsmethodik ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Der Versuch fand im Wintersemester 2016/2017 (Oktober 2016 bis Februar 2017) im Rahmen der Veranstaltung „Einführung in die Elektrotechnik“ an der TU Berlin statt. Die 90-minütigen Vorlesungen fanden zweimal wöchentlich statt: Donnerstagnachmittag und Freitagvormittag. Die Vorlesungen wurden vom Professor des Fachgebietes Lichttechnik gehalten, der den Versuch mit betreut hat. Während dieser Vorlesungen wurde stets eine von vier Lichtszenen eingestellt (unabhängige Variable). Die Versuchsdauer vor bzw. nach jeder Vorlesung durfte höchstens 15 min betragen, damit die Studierenden ihre folgenden Veranstaltungen rechtzeitig erreichen konnten. Die Probandengruppe blieb während des Semesters gleich, es handelte sich hierbei um ein Messwiederholungsdesign.

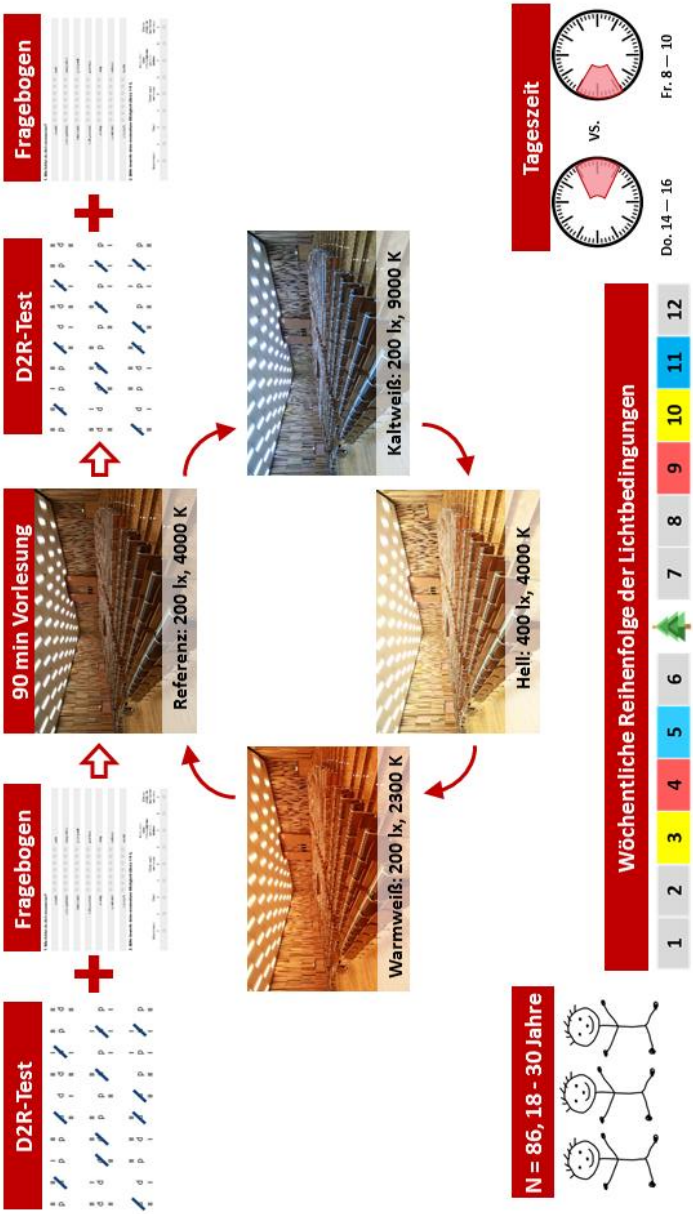


Abbildung 4.16: Schematische Übersicht der Versuchsmethodik

4.5.2 Probanden

Von den ca. 250 Studierenden, die diese Vorlesung besuchten, nahmen 85 Studierende (davon 13 weiblich) an dem Versuch teil. Das Alter lag zwischen 18 bis 30 Jahren mit einem Durchschnitt von 20,6 Jahren. Mit einer Sehtestkarte für den Nahbereich [179] wurde eine Sehschärfe größer 0,8 überprüft. Die Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung in zwei Abschnitten: 100 € vor den Weihnachtsferien und 150 € am Ende des Versuchs. Die Probanden wurden angehalten immer anwesend und pünktlich zu sein. Ab zweimal Fehlen bzw. Verspätung drohte der Studienausschluss. Im ersten Teil in 2016 verließen 4 Probanden (resultierendes N = 82) den Versuch und im zweiten Teil in 2017 14 Probanden (resultierendes N = 67). 8 Probanden nahmen nur an einer Vorlesung pro Woche teil. Der Chronotyp-Fragebogen ergab 12 moderate Morgentypen, 18 moderate Abendtypen, 52 Neutraltypen und 2-mal keine Angabe.

Den Probanden wurde als offizieller Hintergrund „eine Untersuchung der Konzentration im Verlauf der Jahreszeit und unter Einfluss der Umgebungsbedingungen“ genannt. Die wechselnden Lichtszenen wurden nicht erwähnt, allerdings war der Wechsel zur aktuellen Lichtszene zum Beginn der Vorlesung sichtbar und konnte von Probanden wahrgenommen werden. Eine anschließende Befragung ergab, dass sowohl einige Probanden den wahren Zusammenhang erahnt hatten als auch einige Probanden die Änderung der Beleuchtung überhaupt nicht bemerkt hatten.

4.5.3 Versuchsaufbau und Lichtszenen

Die unabhängigen Variablen im Versuch sind die vertikale Beleuchtungsstärke (E_v) auf Augenhöhe und die spektrale Verteilung, die durch den melanopischen Wirkungsfaktor (a_{mel}) und die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) charakterisiert wird. Im Hörsaal HE101 der TU Berlin war folgende Beleuchtung mit fünf einzeln regelbaren Leuchtstofflampentypen vorhanden: kaltweiß 5100 K, warmweiß

2 700 K, rot, grün und blau. Damit wurden vier verschiedene Lichtszenen zusammengestellt: eine Referenzszene, eine helle Szene, eine warmweiße Szene und eine kaltweiße Szene. Die lichttechnischen Parameter der Szenen befinden sich in Tabelle 4.5, Fotos und spektrale Verteilungen in Abbildung 4.18 bzw. Abbildung 4.19. Die Mindestbeleuchtungsstärke wurde dabei so gewählt, dass mindestens der Normwert 500 lx horizontal [76] erreicht wird. Alle Lichtszenen hatten einen Farbwiedergabeindex R_a von ca. 85. Die Probanden saßen in einem Bereich des Hörsaals (siehe Abbildung 4.17), in dem die Beleuchtungssituation nahezu konstant war (siehe dazu Anhang B3). Details zur messtechnischen Charakterisierung der lichttechnischen Bedingungen des Hörsaals, ein repräsentatives Leuchtdichtbild, Kontrollmessungen vor und nach den Vorlesungen und eine Messunsicherheitsbetrachtung finden sich im Anhang B3). Der Hörsaal besitzt keine Fenster, sodass es keinen Tageslichteinfluss gab.

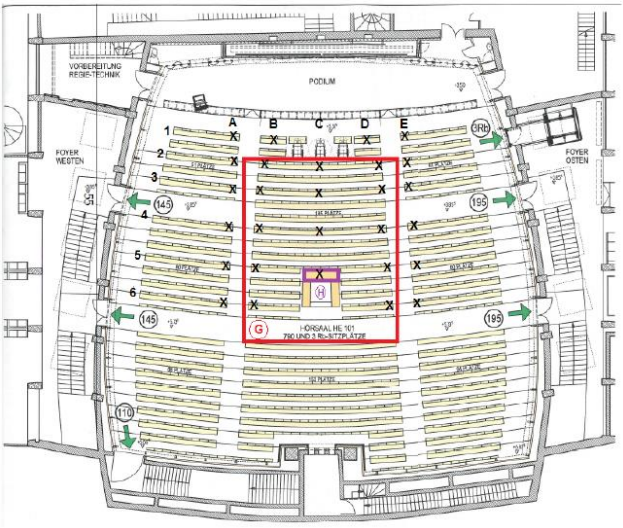


Abbildung 4.17: Grundriss des Hörsaals mit rot markiertem Sitzbereich der Probanden und lila markierter Position der Kontrollmessung

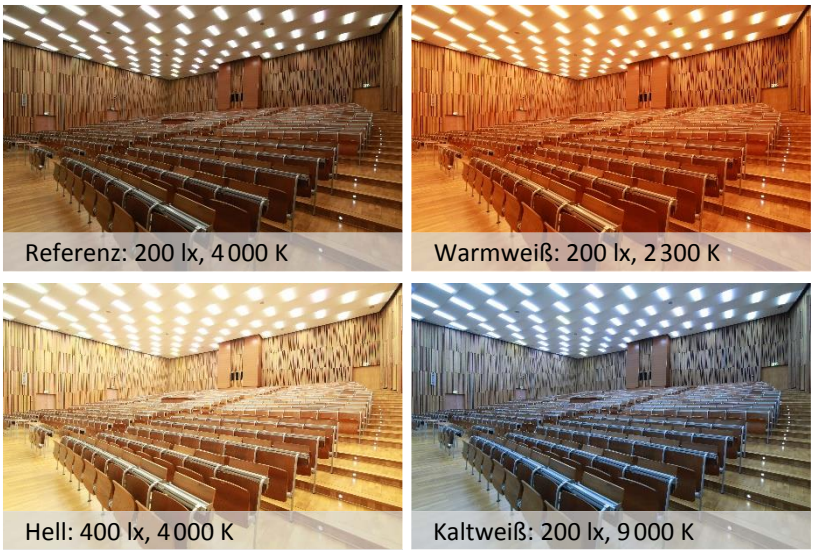


Abbildung 4.18: Fotos des Hörsaals unter den vier Lichtszenen

Tabelle 4.5: Lichttechnische Parameter der Lichtszenen , vertikal auf Augenhöhe gemessen ($E_{\alpha\text{-opic}}$ wurde mit der Toolbox von [79] berechnet.)

Lichtszenen	Referenz	Hell	Warmweiß	Kaltweiß
E_v [lx]	200 ± 20	400 ± 40	200 ± 20	200 ± 20
CCT [K]	4 000 ± 100	4 000 ± 100	2 300 ± 50	9 000 ± 1 000
a_{mel}	0,5	0,5	0,3	1,0
$E_{melanopic}$ [µW/cm²]	15,20	31,62	8,22	25,04
$E_{cyanopic}$ [µW/cm²]	9,47	20,66	4,11	20,93
$E_{rhodopic}$ [µW/cm²]	20,69	43,82	13,15	29,18
$E_{chloropic}$ [µW/cm²]	27,61	59,38	23,00	31,33
$E_{erythropic}$ [µW/cm²]	32,06	68,90	32,38	31,38
Photonendichte [1/(s·cm²)]	$1{,}6\cdot10^{14}$	$3{,}5\cdot10^{14}$	$1{,}6\cdot10^{14}$	$1{,}8\cdot10^{14}$
R_a	86	85	83	85
E_H [lx]	600	1 520	650	580

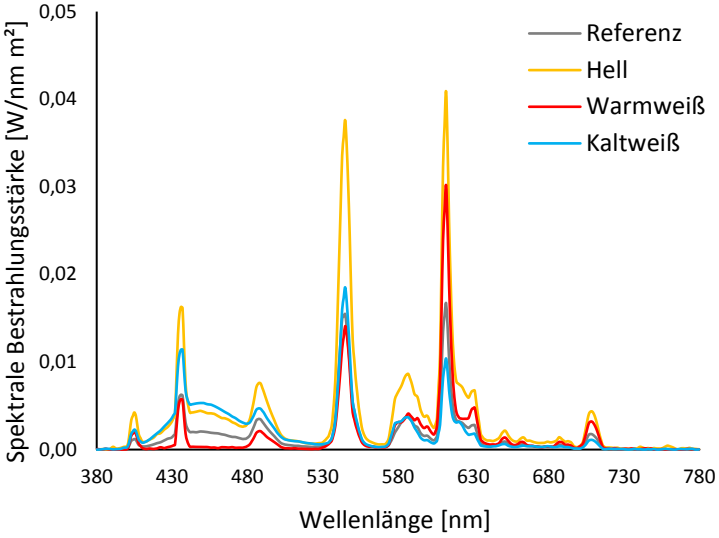


Abbildung 4.19: Spektrale Verteilungen der Lichtszenen

4.5.4 Messgrößen

Die abhängige Variable Aufmerksamkeit wurde operationalisiert durch den d2R-Test und die Karolinska-Sleepiness-Scale (KSS) innerhalb eines Fragebogens (im Anhang einsehbar). Der Fragebogen enthielt außerdem die Testschwierigkeit, das Wohlbefinden, die Lichthistorie, den Koffeinkonsum, die Einnahme von Mahlzeiten, besondere Umstände wie z. B. eine Erkältung und die Akzeptanz der Beleuchtung, welche zwischen weiteren Fragen zu Umgebungsbedingungen versteckt war. Der Fragebogen konnte sowohl auf Papier als auch online (inhaltlich identisch) ausgeführt werden. Beide Methoden wurden nach ihrer einfachen und schnellen Nutzung in großen Gruppen ausgesucht. Zu Beginn des Experiments wurde der Vorabfragebogen online zuhause ausgefüllt. Weitere Informationen zu den verwendeten Tests und Fragebögen befinden sich in den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3.

4.5.5 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wurde so einfach und effizient wie möglich gestaltet, damit er in der großen Gruppe und in der geringen Zeit immer korrekt verlief. Der d2R-Test und der Fragebogen wurden stets 15 min vor und direkt nach der 90-minütigen Vorlesung von den Probanden bearbeitet. Der detaillierte Ablauf mit den Inhalten der Fragebögen ist in Tabelle 4.6 aufgelistet.

Tabelle 4.6: Zeitlicher Ablauf eines Versuchsdurchlaufs (VL = Vorlesung)

Zeit	Ablauf
25 min vor VL	Einstellen der Lichtszene und Kontrollmessung
15 min vor VL	Begrüßung der Probanden, Verteilung der Test- und Fragebögen
10 min vor VL	Durchführung des d2R-Tests
5 min vor VL	Beantwortung des Fragebogens (Testschwierigkeit, Wohlbefinden, KSS, Bett- und Aufstehzeit, Aufenthalt im Freien, Koffeinkonsum, Essen ja/nein, Ungewöhnliches)
0 – 90 min VL	Hören der Vorlesung (kein Teil des Versuchs)
5 min nach VL	Durchführung des d2R-Tests
10 min nach VL	Beantwortung des Fragebogens (Testschwierigkeit, Wohlbefinden, KSS, Veränderung wahrgenommen?, Umgebungsbedingungen)
15 min nach VL	Ende und Einsammeln der Test- und Fragebögen, Kontrollmessung und Ausschalten der Lichtszene

Die Probanden waren angehalten mindestens 5 min früher anwesend zu sein, um einen pünktlichen Start zu gewährleisten. Es fanden zwei Vorlesungen pro Woche statt: donnerstags von 14:15 bis 15:45 Uhr und freitags von 8:15 bis 9:45 Uhr. Während dieser beiden Vorlesungen wurde eine der vier Lichtszenen eingestellt. In den ersten zwei Wochen unter Referenzbeleuchtung wurde der Ablauf trainiert. Diese Trainingsphase diente einerseits dem Üben eines reibungslosen Ablaufs und andererseits dem Ausgleich des Einflusses durch Lerneffekte beim d2R-Test. Nach insgesamt acht durchgeführten d2R-Tests wurde kein

Lerneffekt mehr erwartet (siehe Abschnitt 4.2.2.1). Anschließend folgten drei Wochen mit den Test-Lichtszenen. Eine Woche Referenz-Lichtszene schloss den ersten Teil des Experiments ab. Als zweiter Teil wurde dieser Ablauf mit einer anderen Reihenfolge der Test-Lichtszenen nach drei Wochen Weihnachtsferien wiederholt. Der Grund war eine erhoffte Minimierung anderer Einflüsse wie z. B. die Schwierigkeit der Vorlesungen und individuelle Schwankungen.

4.5.6 Umgebungsbedingungen

Da Störeinflüsse durch die Umgebungsbedingungen auf die Aufmerksamkeit in der Feldstudie erwartet wurden, wurde das Raumklima und der Lärmpegel protokolliert.

Das Raumklima wurde mit dem Messgerät TROTEC BZ30 überwacht. Es protokollierte die Temperatur, die relative Luftfeuchte und den CO_2-Gehalt. Die Messwerte für alle Vorlesungen befinden sich im Anhang B3). Die Mittelwerte der CO_2-Konzentration befanden sich im Bereich von 600 ppm bis 840 ppm. Das fällt in die Kategorie mäßige Luftqualität laut Tabelle 4.1 in Abschnitt 4.2.3. Ab 1000 ppm spricht man von niedriger Luftqualität. Generell ließ sich eine Verschlechterung der CO_2-Konzentration im Verlaufe der Vorlesung feststellen. Maximalwerte über 1000 ppm wurden jedoch nur an drei Vorlesungstagen gemessen.

Die Temperatur schwankte zwischen 23 °C und 25 °C bei einer mittleren Temperatur von 24 °C. Die relative Luftfeuchte schwankte zwischen 19 % und 42 % bei einer mittleren relativen Luftfeuchte von 28 %. Diese Werte liegen im Behaglichkeitsfeld Raumlufttemperatur – relative Feuchte [184] zwar nicht im optimalen Bereich, aber immerhin im Bereich „noch behaglich“, wie Abbildung 4.20 zeigt.

Während der Testdurchführung sollte idealerweise Ruhe herrschen. Insgesamt herrschte allerdings eine etwas lautere und unruhige Umgebung, vor allem durch Studierende, die nicht an der Studie teilnahmen. Insbesondere donnerstags vor der Vorlesung kamen schon

Studierende herein und suchten Sitzplätze oder unterhielten sich mit ihren Nachbarn. Auch Unpünktlichkeit der Probanden besonders Freitagfrüh war eine Herausforderung und sorgte für eine gewisse Unruhe.

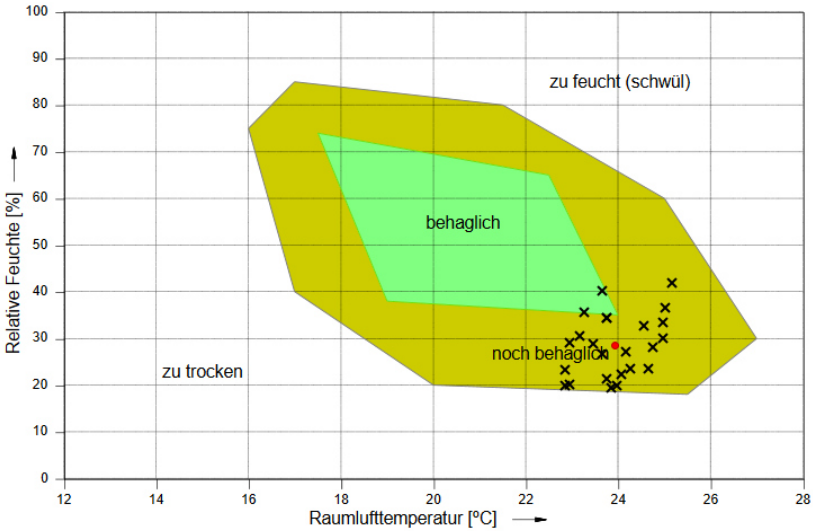


Abbildung 4.20: Eingetragene Messwerte (schwarze Kreuze) der Temperatur und relativen Luftfeuchte und gesamter Mittelwert (roter Punkt) im Behaglichkeitsfeld nach [184]

Als subjektive Messgröße für den Lärm steht das Fragebogen-Item zum Geräuschpegel auf der 7-stufigen Likert-Skala mit 1 – sehr leise und 7 – sehr laut zur Verfügung. Es wurde für jede Vorlesung ein Mittelwert über alle Probanden gebildet: der minimale Mittelwert trat bei der Vorlesung am 09.12.16 mit 3,7 auf, der maximale Mittelwert trat bei der Vorlesung am 01.12.16 mit 4,4 auf und der gesamte Mittelwert lag bei 4,1. Dies entspricht also einer mittleren Lärmbelastung, die pro Vorlesung kaum schwankt.

Eine andere Möglichkeit Lärmbelästigungen abzuschätzen, besteht aus den angegebenen Gründen für Ablenkungen beim d2R-Test z. B. „Lärm“

oder „redende Nachbarn“. Die Häufigkeiten solcher Äußerungen wurde pro Vorlesung jeweils vorher und nachher gezählt und können im Anhang B3) eingesehen werden. Im Mittel beschwerten sich 7 Personen über Lärm als Ablenkung vor der Vorlesung und 4 Personen nach der Vorlesung. An fünf Tagen (alles Donnerstage) gab es vor der Vorlesung mit 16 bis 24 besonders viele Beschwerden.

5 Ergebnisse

5.1 Auswertung Laborversuch 1: Extreme Lichtbedingungen

Für die Auswertung des ersten Laborversuchs wurden zunächst die Versuchsdaten aufbereitet, Ausreißer behandelt und die statistischen Voraussetzungen für die Varianzanalyse geprüft. Anschließend wurde jede abhängige Variable separat ausgewertet. Die zu untersuchenden Hypothesen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1 Hypothesen für die abhängigen Variablen der Laborstudie 1: Extreme Lichtbedingungen

Hypothesen für:	**Aufmerk-samkeit**	**Wohlbefinden**	**Akzeptanz der Beleuchtung**
	• d2R-Test • Audiotest • Tablettest • KSS	• 6 Items des Fragebogens • Veränderung	• angenehm • Helligkeit • Farbe • Blendung
0. Nullhypothese	Keine Veränderung		
1. Eine erhöhte E_v bewirkt …	Steigerung	Veränderung	Steigerung
2. Eine erhöhte CCT bzw. a_{mel} bewirkt …	Steigerung	Veränderung	Verminderung
3. Es besteht eine Interaktion zwischen E_v und CCT bzw. a_{mel}.			

Die Auswertung geschieht anhand folgenden Designs: eine Varianzanalyse (ANOVA) mit den 2 * 2 Zwischensubjektfaktoren vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe E_v (200 lx vs. 1 000 lx) * ähnlichste Farbtemperatur CCT (2 200 K vs. 12 000 K) und der Zeit als Innersubjektfaktor. Der korrespondierende melanopische Wirkungsfaktor a_{mel} kann im Abschnitt 4.3.3 nachgelesen werden. Berichtet werden die Innersubjekteffekte und die Interaktionseffekte (Multivariate Tests, Pillai-Spur) sowie die Zwischensubjekteffekte. Zusätzlich

wird als Spezialfall in Abschnitt 5.1.8 eine 3-stufige ANOVA für E_v (200 lx vs. 500 lx vs. 1000 lx) bei 2200 K durchgeführt, um eine feinere Abstufung der Beleuchtungsstärke zu untersuchen. Die Effektstärke wird nach Cohen (1988) [185] durch das partielle Eta-Quadrat (η^2) interpretiert: $\eta^2 > 0{,}01$ = schwacher Effekt, $\eta^2 > 0{,}06$ = mittlerer Effekt und $\eta^2 > 0{,}14$ = starker Effekt. Abschließend werden weitere Ergebnisse wie der Einfluss von Covariablen dargestellt und eine Zusammenfassung geliefert.

5.1.1 Datenaufbereitung

Zunächst wurden die Daten anhand der Personenfragebögen aufbereitet und die Testergebnisse auf Ausreißer überprüft.

Allgemein

Acht Probanden gaben Vorkenntnisse zum Thema Beleuchtung im Rahmen von Vorlesungen oder Experimenten am Fachgebiet an. Weitere 19 Probanden hatten Vorkenntnisse bei Konzentrationstests und -spielen und jeweils 30 gaben Erfahrung mit dem d2R-Test oder dem Audio-Test an.

Es wurde gefragt, ob an dem Versuchstag etwas ungewöhnlich sei: 29 Probanden hatten schlecht geschlafen und neun waren erkältet bzw. krank. Der Gesundheitsfragebogen SF12 besitzt einen Normbereich von 50 ± 10 [171]. Im körperlichen Bereich lagen zwei Probanden unter dem Normalbereich und neun lagen darüber. Im psychischen Bereich lag ein Proband darüber und 30 Probanden lagen unter dem Normalbereich. Dies ist möglicherweise durch Stress in der Prüfungsphase zu erklären.

Nach Durchsicht der Testergebnisse, die keine Auffälligkeiten aufwiesen, wurden keine Probanden aufgrund der eben genannten Punkte ausgeschlossen. Zwei Probanden wirkten auf die Versuchsleitung sehr unmotiviert und bearbeiteten die Tests nicht ordnungsgemäß. Diese beiden wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

D2R-Test

Der erste Test wurde als Übungstest angekündigt und der zweite Test diente inoffiziell als weiterer Trainingstest. Diese wurden daher nicht ausgewertet. Dreimal fehlte ein d2R-Test wegen fehlerhafter Bearbeitung (z. B. Blatt verkehrt herum ausgefüllt). Ausreißer in der Fehlerrate F% können ein Hinweis auf eine fehlerhafte Bearbeitung sein. Ein Wert von über 30 % wurde daher als Ausreißer definiert. Dies trat nur einmal im 2. Test auf, der jedoch ohnehin nicht ausgewertet wurde. Für die Geschwindigkeit BZO und die Konzentrationsleistung KL wurden Werte < 100 und > 270 als Ausreißer definiert, da ein Proband in dem Fall auffällig langsam gewesen wäre bzw. fast alles geschafft hätte. Letzteres trat nur einmal in Test 4 auf. Da der Proband sonst keine Auffälligkeiten aufwies, wurde der Test behalten.

Auditiver Go-NoGo-Test

Für die Auswertung wurde der Median der Reaktionszeit verwendet. Die Übungsphase fand zu Beginn statt, es wurden daher Test 1 und 2 ausgewertet. Als Kriterium für Ausreißer wurde der Mittelwert ± die 3-fache Standardabweichung verwendet. Dies wird auch in SPSS als Klassifizierung für extreme Ausreißer genutzt. Es gab einen Fall, wo dies zutraf (Reaktionszeit > 800 ms). Dieser Test wurde ausgeschlossen. Aufgrund technischer Probleme wurden insgesamt 11 Audiotests nicht abgespeichert und fehlen in der Analyse. Die Fehlerrate des Audio-Tests war nicht auswertbar, da zu wenige Fehler von den Probanden gemacht wurden. Der Median der Fehler lag bei 0 (siehe Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Anzahl Fehler der Audio-Tests #1 und #2

	Auslass-fehler #1	Falsch positive #2	Auslass-fehler #1	Falsch positive #2
Gültige N	160	160	158	158
Median	0	0	0	0
Minimum	0	0	0	0
Maximum	8	6	7	10

Tablet-Test

Bei der Tablet-Aufgabe fehlten drei Tests aufgrund fehlerhafter Abspeicherung. Ebenso wie bei der Audio-Aufgabe wurden die Mediane der Reaktionszeiten verwendet und Test 1 und 2 ausgewertet. Mit Ausreißern wurde ebenso verfahren wie bei der Audio-Aufgabe. Fünf Fälle überschritten das Kriterium (Reaktionszeit > 700 ms). Diese Fälle wurden ausgeschlossen. Auch hier war die Fehlerrate des Tablet-Tests nicht auswertbar, da zu wenige Fehler von den Probanden gemacht wurden. Der Median der Genauigkeit bei lag 100 % (siehe Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Genauigkeit in Prozent der Tablet-Tests #1 und #2

	Genauigkeit Zielreiz #1	Genauigkeit Fehlerreiz #1	Genauigkeit Zielreiz #2	Genauigkeit Fehlerreiz #2
Gültige N	163	163	164	164
Median	100 %	100 %	100 %	100 %
Minimum	65 %	93 %	75 %	94 %
Maximum	100 %	100 %	100 %	100 %

Fragebögen (KSS, subjektive Aufmerksamkeit und Wohlbefinden, Akzeptanz der Beleuchtung)

Die Probanden nutzten die gesamte Skala der Fragebögen aus. Ausreißer waren somit nicht sinnvoll festzulegen. Die Antworten wurden auf eine nicht ehrliche Bearbeitung (z. B. immer die Mitte angekreuzt) untersucht und keine offensichtlichen Mängel entdeckt.

5.1.2 Überprüfung der statistischen Voraussetzungen

Um eine Varianzanalyse durchführen zu können, müssen zunächst folgende Voraussetzungen überprüft werden: Intervallskalierung der abhängigen Variablen, Normalverteilung und Varianzhomogenität. Eine gleiche Gruppengröße ist zwar keine formale Voraussetzung, ist jedoch von Vorteil, um die Robustheit der ANOVA gegenüber Verletzungen ihrer Voraussetzungen sicherzustellen.

Intervallskalierung

Die abhängige Variable muss mindestens intervallskaliert sein. Die Ergebnisse der drei Testverfahren d2R-Test, Audiotest und Tablettest sind metrische Skalen. Für die Fragebögen wurden 7- bzw. 9-stufige Likertskalen verwendet. Streng genommen sind diese nicht intervallskaliert. Nehmen die Probanden die Skalenpunkte jedoch als gleichabständig wahr, kann eine Intervallskalierung angenommen werden [186]. Es wurde darauf geachtet, die Skalenpunkte optisch gleichabständig zu platzieren und nur die Extrempunkte zu beschriften. Nach [186] wird daher hier von einer Intervallskalierung ausgegangen.

Normalverteilung

Die Residuen der Stichproben müssen normalverteilt sein. Dies kann mit dem Kolmogorov-Smirnov- und dem Shapiro-Wilk-Test für jede Probandengruppe getestet werden. Fällt das Ergebnis signifikant ($p < 0,05$) aus, so weicht die Stichprobe von einer Normalverteilung ab. Beide Tests sind konservativ und zeigen bei großen Stichproben schon kleine Abweichungen von der Normalverteilung als signifikant an [187]. Daher werden bei einem signifikanten Testurteil die Daten zusätzlich mittels Q-Q-Plot visuell beurteilt. Dabei werden die erwarteten Werte bei Normalverteilung als Gerade dargestellt und die realen Werte sollten möglichst nah an dieser idealen Geraden liegen. Die Kolmogorov-Smirnov- und Shapiro-Wilk-Testergebnisse und Q-Q-Plots des jeweiligen Worstcase jeder Variable befinden sich im Anhang.

Für die Geschwindigkeit und Konzentrationsleistung des d2R-Tests, die Reaktionszeit des Audiotests und die Reaktionszeit des Tablettests sind die Normalverteilungstests außer in bis zu 2 Fällen pro Variable nicht signifikant. Die Sichtkontrolle mittels Q-Q-Plot zeigt nur geringe Abweichungen zur Normalverteilung. Für diese abhängigen Variablen wird die Normalverteilung angenommen.

Der Fehlerrate des d2R-Tests ist jedoch stark linksschief und die Normalverteilung kann nicht angenommen werden. Die Mehrheit der Normalverteilungstests für die KSS-Werte, die Wohlbefinden-Items und die Items der Lichtakzeptanz sind signifikant. Die Sichtkontrolle mittels Q-Q-Plot zeigt jedoch nur geringe Abweichungen zur Normalverteilung. In diesen Fällen kann mit nichtparametrischen Tests gearbeitet werden oder auf die Robustheit der ANOVA gegenüber Verletzungen der Normalverteilung [187–190] verwiesen werden. Letzteres wird in dieser Arbeit angewandt, d.h. trotz Verletzung wird eine ANOVA zur Auswertung verwendet. Weiterführende Literatur zur Kontroverse bezüglich der Verwendung von nichtparametrischen Tests und parametrischen Tests wie der ANOVA findet sich in Hyvärinen 2015 [44].

Varianzhomogenität

Homogenität der Varianzen bedeutet, dass die Varianz über die Abstufungen einer Variablen gleichbleibt. Das Gegenteil Heterogenität wäre beispielsweise der Fall, wenn sich bei erhöhter Beleuchtungsstärke die Varianz der Konzentrationsleistung verändert. Varianzhomogenität wird mit dem Levene-Test im Zwischensubjektdesign und mit dem Box-R-Test im Innersubjektdesign überprüft. Beide Tests befinden sich im Anhang. Sind diese nicht signifikant ($p > 0{,}05$), wird Varianzhomogenität angenommen. Auch bei einer Verletzung der Varianzhomogenität kann auf die Robustheit der ANOVA [191] verwiesen werden, sodass trotz signifikanter Fälle eine ANOVA angewendet wird.

5.1.3 D2R-Test

Die Ergebnisparameter des d2R-Tests sind die Konzentrationsleistung KL, die Geschwindigkeit BZO und die Fehlerrate F%. Es wurden der 3. und 4. Test ausgewertet. Zur Unterscheidung ist dies stets mit #3 bzw. #4 bezeichnet. Tabelle 5.4 zeigt die deskriptive Statistik pro Lichtszene. Für die statistische Analyse wurde für KL, BZO und F% jeweils eine ANOVA mit den beiden Zwischensubjektfaktoren E (200 lx vs. 1 000 lx) * CCT (2 200 K vs. 12 000 K) und dem Innersubjektfaktor Zeit (#3 vs. #4)

durchgeführt. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 5.5. Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 zeigen die graphische Darstellung mit markierten signifikanten Effekten.

Tabelle 5.4: Deskriptive Statistik der Messgrößen KL, BZO und F%; N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung

Licht-szene		KL #3	KL #4	BZO #3	BZO #4	F% #3	F% #4
2 200K 200 lx	N	32	32	32	32	32	32
	M	154,6	157,3	163,8	164,5	5,5	4,4
	SD	26,0	24,9	26,1	24,7	6,3	4,5
2 200K 1 000 lx	N	32	32	32	32	32	32
	M	172,0	175,7	175,1	178,9	1,8	1,8
	SD	27,8	28,3	27,5	28,7	1,8	1,5
12 000K 200 lx	N	37	37	37	37	37	37
	M	153,7	159,1	159,9	165,4	3,8	3,7
	SD	22,8	22,8	23,7	24,2	3,3	3,6
12 000K 1 000 lx	N	30	30	30	30	30	30
	M	162,3	164,8	170,2	172,5	4,5	4,4
	SD	26,2	23,0	26,8	23,8	5,3	4,3

Die Analyse ergab einen signifikanten Effekt der Beleuchtungsstärke für KL ($F = 8{,}177$, $p = 0{,}005$, $\eta^2 = 0{,}060$) und BZO ($F = 5{,}873$, $p = 0{,}017$, $\eta^2 = 0{,}044$). Eine Steigerung von 200 lx auf 1 000 lx wirkte sich demnach positiv auf KL und BZO aus. Die Farbtemperatur ergab keine signifikanten Effekte ($p > 0{,}260$). Für F% gab es jedoch einen signifikanten Interaktionseffekt E * CCT ($F = 8{,}145$, $p = 0{,}005$, $\eta^2 = 0{,}060$). Die Post-hoc-Analyse (Bonferroni) hinsichtlich E zeigte, dass die Steigerung von 200 lx auf 1 000 lx nur bei 2 200 K ($p = 0{,}001$) zu einer verringerten Fehlerrate führte, nicht jedoch bei 12 000 K ($p = 0{,}467$). Eine weitere Post-hoc-Analyse (Bonferroni) hinsichtlich der CCT zeigte, dass bei 1 000 lx ($p = 0{,}007$) 12 000 K eine höhere Fehlerrate aufwies als 2 200 K. Bei 200 lx ($p = 0{,}205$) gab es keinen Unterschied der CCTs.

Der Faktor Zeit war im Falle von KL ($F = 24{,}541$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}162$) und BZO ($F = 16{,}536$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}115$) signifikant. Die Geschwindigkeit und damit auch die Konzentrationsleistung nahm im Testverlauf zu. Nach Cohen (1988) [185] ist dies ein starker Effekt im Vergleich zu den mittleren bis schwachen Effektstärken der Beleuchtung. Für die Fehlerrate wurde kein signifikanter Effekt ($p = 0{,}136$) der Testzeit gefunden.

Tabelle 5.5: D2R-Test: Report der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Zwischensubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η^2**
KL: E	1	8,177	0,005	0,060
KL: CCT	1	1,283	0,260	0,010
KL: E * CCT	1	1,526	0,219	0,012
BZO: E	1	5,873	0,017	0,044
BZO: CCT	1	0,651	0,421	0,005
BZO: E * CCT	1	0,221	0,639	0,002
F%: E	1	3,353	0,069	0,026
F%: CCT	1	1,207	0,274	0,009
F%: E * CCT	1	8,145	0,005	0,060
Innersubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η^2**
KL: Zeit	1	24,541	<0,001	0,162
KL: Zeit * E	1	0,417	0,520	0,003
KL: Zeit * CCT	1	0,245	0,621	0,002
KL: Zeit * E * CCT	1	1,841	0,177	0,014
BZO: Zeit	1	16,536	<0,001	0,115
BZO: Zeit * E	1	0,000	0,995	0,000
BZO: Zeit * CCT	1	1,085	0,299	0,008
BZO: Zeit * E * CCT	1	4,265	0,041	0,032
F%: Zeit	1	2,254	0,136	0,017
F%: Zeit * E	1	1,228	0,270	0,010
F%: Zeit * CCT	1	0,730	0,395	0,006
F%: Zeit * E * CCT	1	1,232	0,269	0,010

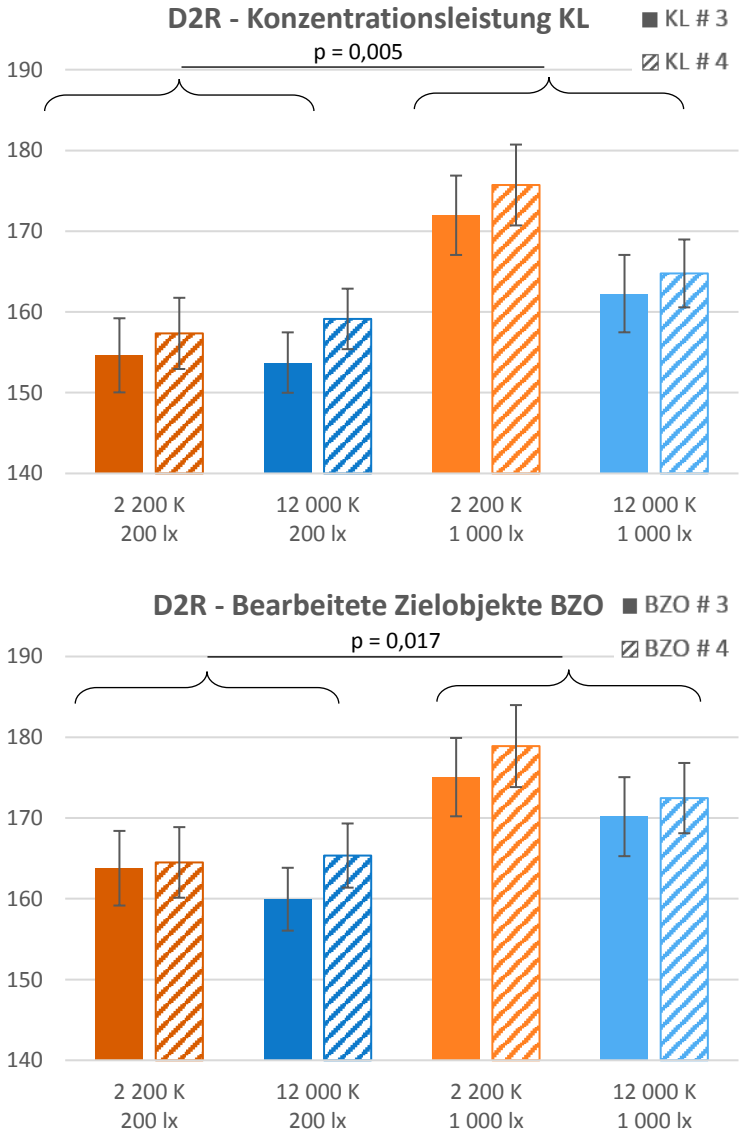


Abbildung 5.1: D2R-Test Konzentrationsleistung KL (oben) und Bearbeitete Zielobjekte BZO (unten) für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Haupteffekte der Beleuchtung sind markiert.

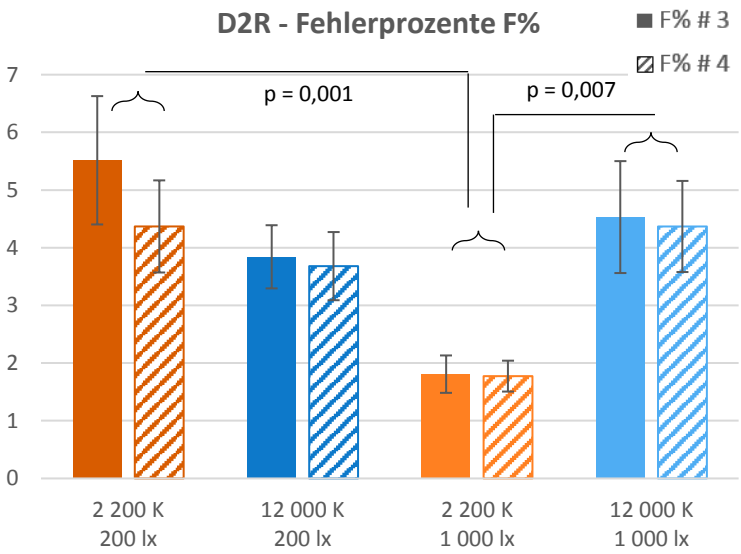


Abbildung 5.2: D2R-Test Fehlerprozente F% für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Interaktionseffekte der Beleuchtung sind markiert.

Weiterhin wurde ein signifikanter Interaktionseffekt von BZO für Zeit * E * CCT gefunden ($F = 4{,}265$, $p = 0{,}041$, $\eta^2 = 0{,}032$). Eine dreifache Interaktion lässt sich schwer interpretieren, daher wurde jeweils eine Post-hoc-Analyse (Bonferroni) hinsichtlich der Zeit, E und CCT durchgeführt. BZO stieg von Zeit #1 zu Zeit #2 nur in den Fällen 200 lx 12 000 K ($p < 0{,}001$) und 1 000 lx 2 200 K ($p = 0{,}013$) signifikant an. In den anderen beiden Fällen gab es keinen signifikanten Zeiteffekt ($p > 0{,}146$). BZO stieg außerdem von 200 lx zu 1 000 lx nur im Falle von 2 000 K und Zeit #2 ($p = 0{,}025$) signifikant an. Zu Zeit #1 sowie bei 12 000 K war der Effekt von E nicht signifikant ($p > 0{,}085$). Der Effekt der CCT war unabhängig von der Zeit und der Effekt von E stets nicht signifikant ($p > 0{,}321$).

5.1.4 Auditiver Go-NoGo-Test und Vigilanzaufgabe Tablet

Als Ergebnisparameter des auditiven Go-NoGo-Tests und der Vigilanzaufgabe Tablet wurden die Mediane der Reaktionszeit (kurz RT) des Probanden auf die Zielreize verwendet, da der Median weniger anfällig für Ausreißer ist als das arithmetische Mittel. Es wurden jeweils beide durchgeführten Tests ausgewertet. Zur Unterscheidung ist dies stets mit #1 bzw. #2 bezeichnet. Tabelle 5.6 zeigt die deskriptive Statistik pro Lichtszene. Die statistische Analyse erfolgte analog zum d2R-Test. Es wurde für beide Tests eine ANOVA mit den beiden Zwischensubjektfaktoren E (200 lx vs. 1 000 lx) * CCT (2 200 K vs. 12 000 K) und dem Innersubjektfaktor Zeit (#1 vs. #2) durchgeführt. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 5.7 und Tabelle 5.8. Abbildung 5.3 zeigt die graphische Darstellung mit markierten signifikanten Effekten.

Tabelle 5.6: Deskriptive Statistik der Messgrößen Audio RT und Tablet RT; N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung

Licht-szene		Audio RT #1	Audio RT #2	Tablet RT #1	Tablet RT #2
2 200K 200 lx	N	32	32	30	30
	M	440,0	438,0	418,9	432,8
	SD	128,9	132,8	71,3	68,8
2 200K 1 000 lx	N	31	30	30	31
	M	426,9	401,1	420,6	412,0
	SD	111,0	108,8	65,9	53,7
12 000K 200 lx	N	35	32	35	36
	M	387,2	389,7	413,4	409,8
	SD	76,6	85,4	57,2	61,3
12 000K 1 000 lx	N	28	29	29	29
	M	469,6	422,2	429,1	423,8
	SD	139,9	117,9	60,9	61,3

Tabelle 5.7: Audiotest: Report der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Innersubjekteffekte	df	F	p	Partielles η^2
Audio RT: Zeit	1	6,163	0,014	0,050
Audio RT: Zeit * E	1	5,577	0,020	0,045
Audio RT: Zeit * CCT	1	0,225	0,636	0,002
Audio RT: Zeit * E * CCT	1	0,381	0,538	0,003
Zwischensubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η^2**
Audio RT: E	1	0,757	0,386	0,006
Audio RT: CCT	1	0,246	0,621	0,002
Audio RT: E * CCT	1	4,295	0,040	0,035

Tabelle 5.8: Tablettest: Report der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Innersubjekteffekte	df	F	p	Partielles η^2
Tablet RT: Zeit	1	0,037	0,847	0,000
Tablet RT: Zeit * E	1	2,919	0,090	0,024
Tablet RT: Zeit * CCT	1	1,520	0,220	0,012
Tablet RT: Zeit * E * CCT	1	2,901	0,091	0,023
Zwischensubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η^2**
Tablet RT: E	1	0,032	0,858	0,000
Tablet RT: CCT	1	0,406	0,525	0,003
Tablet RT: E * CCT	1	2,292	0,133	0,019

Für den auditiven Go-NoGo-Test wurden keine signifikanten Haupteffekte der Beleuchtung gefunden ($p > 0,386$). Es gab jedoch einen signifikanten Interaktionseffekt E * CCT ($F = 4,295$, $p = 0,040$, $\eta^2 = 0,035$). Die Tendenz des Effekts ähnelt dem Interaktionseffekt des F%-Wertes aus dem d2R-Effekt. Bei dem geringen E von 200 lx führte ein erhöhter kurzwelliger Spektralanteil von 12 000 K zu einer kürzeren Reaktionszeit. Beim hohen E von 1 000 lx führte dies jedoch zu einer längeren Reaktionszeit. Andersherum betrachtet, zeigte eine Steigerung von E auf 1 000 lx bei 2 200 K keinen Effekt, bei 12 000 K jedoch eine Verschlechterung der Reaktionszeit. Es trat außerdem ein signifikanter Haupteffekt der Zeit auf ($F = 6,163$, $p = 0,014$, $\eta^2 = 0,050$).

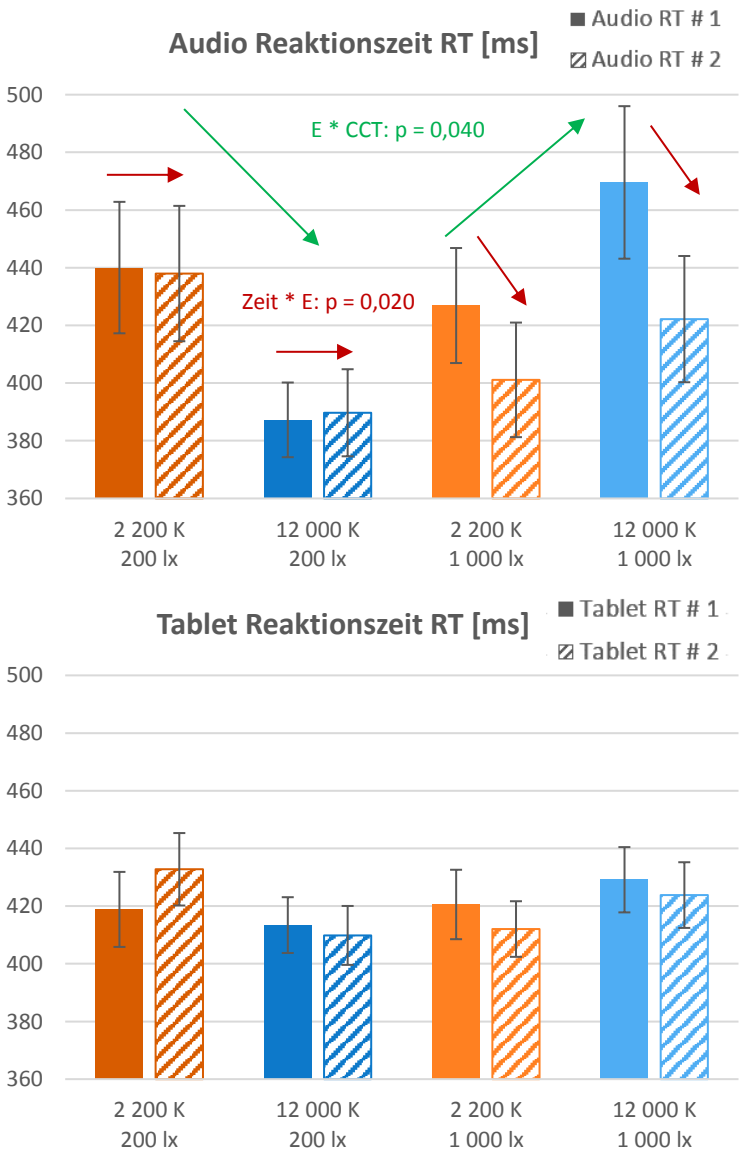


Abbildung 5.3: Reaktionszeit RT des Audiotests (oben) und des Tablettests (unten) für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Interaktionseffekte der Beleuchtung sind markiert.

Ein signifikanter Interaktionseffekt der Zeit * E ($F = 5{,}577$, $p = 0{,}020$, $\eta^2 = 0{,}045$) ergab folgendes: Bei 1 000 lx schnitten die Probanden im 2. Test besser ab als im 1. Test. Bei 200 lx war das Abschneiden in beiden Tests gleich gut. Für die Vigilanzaufgabe Tablet wurden keine signifikanten Effekte gefunden ($p > 0{,}090$). Die grafische Tendenz ähnelt den Ergebnissen des Audiotests.

5.1.5 Karolinska-Sleepiness-Scale (KSS)

Die KSS (1 – extrem wach bis 9 – extrem müde) wurde zu Beginn (#1), zur Hälfte (#2) und am Ende des Versuchs (#3) eingesetzt. Die Analyse wurde mit einer ANOVA mit den beiden Zwischensubjektfaktoren E (200 lx vs. 1 000 lx) * CCT (2 200 K vs. 12 000 K) und dem Innersubjektfaktor Zeit (#1 vs. #2 vs. #3) durchgeführt. Die deskriptive Statistik befindet sich in Tabelle 5.9 und die Ergebnisse der ANOVA in Tabelle 5.10. Abbildung 5.4 zeigt die grafische Darstellung.

Tabelle 5.9: Deskriptive Statistik der Messgröße KSS, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung

Lichtszene		KSS #1	KSS #2	KSS #3
2 200K 200 lx	N	32	33	33
	M	4,3	4,7	5,1
	SD	1,8	1,8	1,7
2 200K 1 000 lx	N	31	32	32
	M	4,6	4,5	4,5
	SD	2,0	1,7	1,8
12 000K 200 lx	N	36	37	37
	M	4,1	4,1	4,2
	SD	1,5	1,6	1,6
12 000K 1 000 lx	N	29	30	30
	M	4,7	4,8	5,0
	SD	2,0	1,7	1,7

Tabelle 5.10: KSS: Report der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit)

Innersubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η²**
KSS: Zeit	2	2,717	0,070	0,042
KSS: Zeit * E	2	0,738	0,480	0,012
KSS: Zeit * CCT	2	0,119	0,888	0,002
KSS: Zeit * E * CCT	2	2,627	0,076	0,041
Zwischensubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η²**
KSS: E	1	1,084	0,300	0,009
KSS: CCT	1	0,071	0,791	0,001
KSS: E * CCT	1	2,494	0,117	0,020

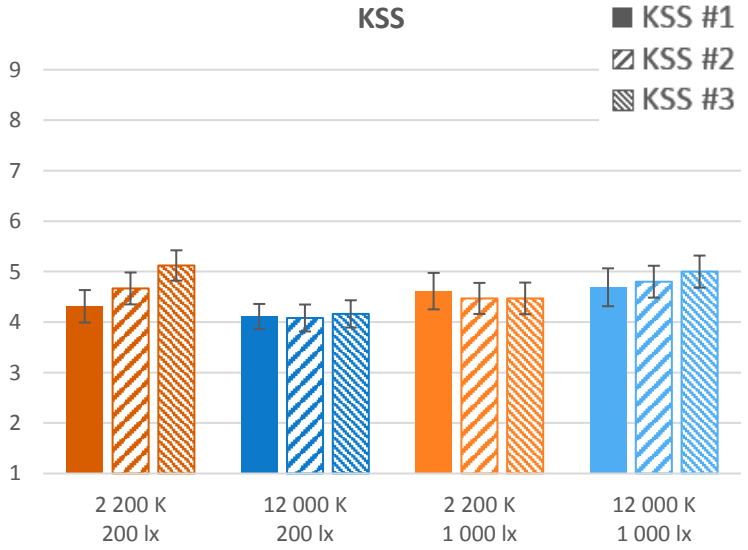


Abbildung 5.4: KSS für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler

Die ANOVA lieferte keine signifikanten Effekte ($p > 0{,}070$). In der Grafik ist zu erkennen, dass die Mittelwerte ca. im Bereich einer Skalenstufe variierten. Für die Lichtszene 2 200 K und 200 lx zeigte sich ein Anstieg der Müdigkeit mit der Zeit, dieser war jedoch für die anderen Lichtszenen nicht vorhanden.

5.1.6 Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden

Der Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden wurde zu Beginn (#1), zur Hälfte (#2) und am Ende des Versuchs (#3) abgefragt und enthielt folgende Items: 1 unwohl … 7 wohl, 1 unkonzentriert … 7 konzentriert, 1 interessiert … 7 gelangweilt, 1 unruhig … 7 ruhig, 1 demotiviert … 7 motiviert und 1 erschöpft … 7 munter. Die Analyse wurde mit einer ANOVA mit den beiden Zwischensubjektfaktoren E (200 lx vs. 1000 lx) * CCT (2200 K vs. 12000 K) und dem Innersubjektfaktor Zeit (#1 vs. #2 vs. #3) durchgeführt. Die deskriptive Statistik befindet sich im Anhang C1) und die Ergebnisse der ANOVA in Tabelle 5.11 und Tabelle 5.12.

Tabelle 5.11: Fragebogen zum Wohlbefinden: Report der Zwischensubjekteffekte der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen $p < 0,05$ sind hervorgehoben

Zwischensubjekteffekte		df	F	p	Partielles η^2
Wohl:	E	1	0,070	0,792	0,001
Wohl:	CCT	1	0,003	0,959	0,000
Wohl:	E * CCT	1	1,445	0,232	0,012
Konzentriert:	E	1	0,457	0,500	0,004
Konzentriert:	CCT	1	0,007	0,935	0,000
Konzentriert:	E * CCT	1	2,376	0,126	0,019
Gelangweilt:	E	1	0,197	0,658	0,002
Gelangweilt:	CCT	1	0,013	0,908	0,000
Gelangweilt:	E * CCT	1	4,738	0,031	0,037
Ruhig:	E	1	0,935	0,335	0,007
Ruhig:	CCT	1	2,787	0,098	0,022
Ruhig:	E * CCT	1	0,627	0,430	0,005
Motiviert:	E	1	0,014	0,905	0,000
Motiviert:	CCT	1	0,302	0,584	0,002
Motiviert:	E * CCT	1	2,640	0,107	0,021
Munter:	E	1	0,229	0,633	0,002
Munter:	CCT	1	0,165	0,686	0,001
Munter:	E * CCT	1	1,424	0,235	0,011

Tabelle 5.12: Fragebogen zum Wohlbefinden: Report der Innersubjekteffekte der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Innersubjekteffekte		df	F	p	Partielles η^2
Wohl:	Zeit	2	1,714	0,184	0,027
Wohl:	Zeit * E	2	0,300	0,741	0,005
Wohl:	Zeit * CCT	2	0,163	0,849	0,003
Wohl:	Zeit * E * CCT	2	0,402	0,670	0,006
Konzentriert:	Zeit	2	6,103	0,003	0,090
Konzentriert:	Zeit * E	2	0,086	0,918	0,001
Konzentriert:	Zeit * CCT	2	0,342	0,711	0,006
Konzentriert:	Zeit * E * CCT	2	0,310	0,734	0,005
Gelangweilt:	Zeit	2	11,342	<0,001	0,156
Gelangweilt:	Zeit * E	2	2,296	0,105	0,036
Gelangweilt:	Zeit * CCT	2	0,279	0,757	0,005
Gelangweilt:	Zeit * E * CCT	2	0,041	0,960	0,001
Ruhig:	Zeit	2	0,021	0,980	0,000
Ruhig:	Zeit * E	2	0,573	0,565	0,009
Ruhig:	Zeit * CCT	2	0,078	0,925	0,001
Ruhig:	Zeit * E * CCT	2	1,068	0,347	0,017
Motiviert:	Zeit	2	7,183	0,001	0,105
Motiviert:	Zeit * E	2	4,177	0,018	0,064
Motiviert:	Zeit * CCT	2	1,987	0,141	0,031
Motiviert:	Zeit * E * CCT	2	0,807	0,449	0,013
Munter:	Zeit	2	8,892	<0,001	0,126
Munter:	Zeit * E	2	0,947	0,391	0,015
Munter:	Zeit * CCT	2	2,284	0,106	0,036
Munter:	Zeit * E * CCT	2	0,490	0,614	0,008

Ein signifikanter Effekt der Versuchszeit wurde für die Items konzentriert ($F = 6{,}103$, $p = 0{,}003$, $\eta^2 = 0{,}090$), gelangweilt ($F = 11{,}342$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}156$), motiviert ($F = 7{,}183$, $p = 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}105$) und munter ($F = 8{,}892$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}126$) gefunden. In Abbildung 5.5 sind alle Items pro Versuchszeitpunkt dargestellt. Alle Effekte zeigten eine Verschlechterung des Befindens über die Zeit. Die Probanden waren zum Ende unkonzentrierter, gelangweilter, demotivierter und erschöpfter als zu Beginn des Versuchs.

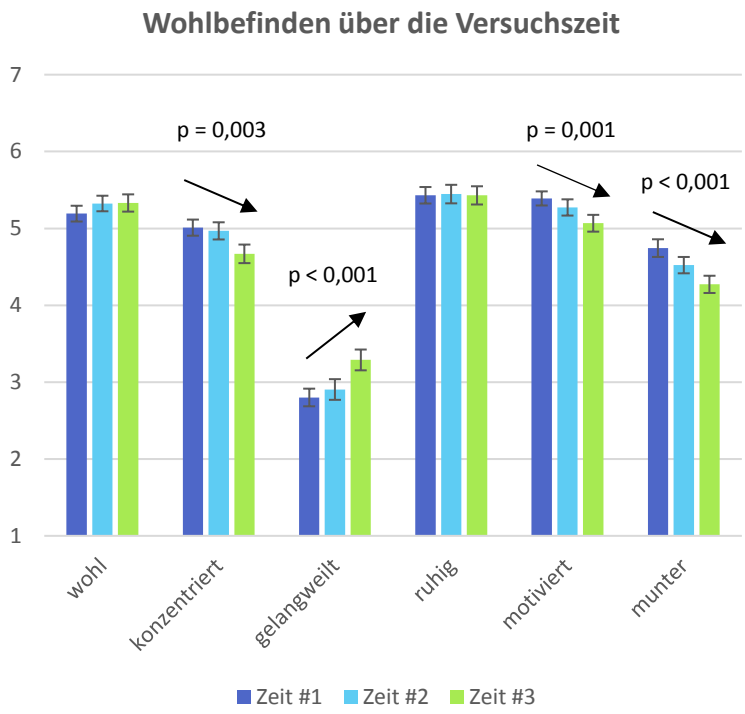


Abbildung 5.5: Items des Fragebogens zum Wohlbefinden pro Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Zeit sind markiert.

Für das Item motiviert trat außerdem ein signifikanter Interaktionseffekt der Zeit * E ($F = 4{,}177$, $p = 0{,}018$, $\eta^2 = 0{,}064$) auf. Dieser ist in Abbildung 5.7 aufgeschlüsselt. Als post-hoc Analyse wurde ein einfacher Kontrast mit Referenzniveau Zeit #1 durchgeführt. Er enthüllt, dass sich Zeit #1 und #2 signifikant unterschieden ($p = 0{,}009$) und Zeit #1 und #3 nicht ($p = 0{,}359$). Die Gruppen bei niedriger Beleuchtungsstärke 200 lx starteten mit einem leicht geringeren Motivationslevel zur Zeit #1 und dieses stieg leicht an zur Zeit #2. Bei höherer E von 1 000 lx war es genau umgekehrt. Die maximale Mittelwertdifferenz betrug nur 0,3 Skalenkategorien, der Effekt ist also klein. Zu Zeit #3 war die Motivation außerdem in beiden Gruppen auf ein niedrigeres Niveau abgesunken.

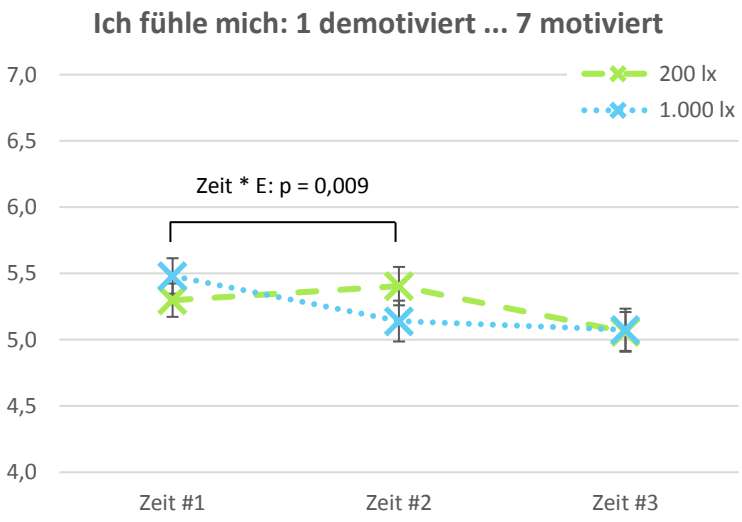


Abbildung 5.7: Item motiviert für Zeit * E, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Beleuchtung sind markiert.

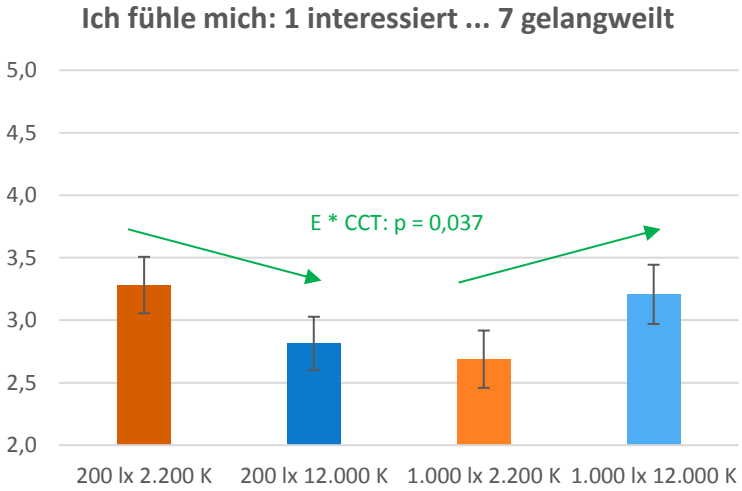


Abbildung 5.6: Item gelangweilt für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Beleuchtung sind markiert.

Die Analyse der Zwischensubjekteffekte ergab einen signifikanten Interaktionseffekt E * CCT für das Item gelangweilt ($F = 4{,}738$, $p = 0{,}031$, $\eta^2 = 0{,}037$). Dieser ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Bei 200 lx waren Probanden bei 12 000 K weniger gelangweilt als bei 2 200 K und bei 1 000 lx war es andersherum. Mit einer maximalen Mittelwertdifferenz von 0,6 Skalenkategorien ist dieser Effekt allerdings eher klein.

Am Ende des Versuchs wurde außerdem danach gefragt, ob die Probanden eine Veränderung in ihrem Wohlbefinden bemerkt haben und wenn ja, sollte dies näher beschrieben werden. In Tabelle 5.13 wurden die genannten Veränderungen gezählt und in positive (z. B. „Bin wacher/motivierter/usw. geworden“), negative (z. B. „Bin müder/ unkonzentrierter/usw. geworden“ o. „Kopfschmerzen bekommen“) und gemischte (z. B. „Bin erst wacher und dann müder geworden“) Effekte eingeteilt. Im Mittel gaben 64 % keine Veränderung an. 3 % - 10 % gaben eine positive Veränderung an und 16 % - 30 % eine negative. Ein Unterschied zwischen den Lichtszenen ist jedoch nicht vorhanden.

Tabelle 5.13: Veränderung des Wohlbefindens pro Lichtszene

Lichtszene	2 200K 200 lx	2 200K 1 000 lx	12 000K 200 lx	12 000K 1 000 lx
Keine Veränderung	21	20	25	19
positiver Effekt	1	2	2	3
negativer Effekt	10	8	6	7
gemischter Effekt	0	2	3	0
Keine Angabe	1	0	1	1
Gesamt	33	32	37	30

5.1.7 Fragebogen zur Akzeptanz der Beleuchtung

Die Akzeptanz der Beleuchtung wurde mit vier 7-stufigen Items abgefragt: angenehm, Helligkeit, Farbe, Blendung. In Tabelle 5.14 findet sich die deskriptive Statistik und in Abbildung 5.8 die grafische Darstellung. Es wurde für jedes Item eine ANOVA mit den

Zwischensubjektfaktoren E (200 lx vs. 1000 lx) * CCT (2200 K vs. 12000 K) durchgeführt (Ergebnis in Tabelle 5.15).

Für das Item angenehm ergab sich ein signifikanter Effekt der CCT ($F = 6{,}617$, $p = 0{,}011$, $\eta^2 = 0{,}049$) und ein signifikanter Interaktionseffekt der E * CCT ($F = 5{,}505$, $p = 0{,}021$, $\eta^2 = 0{,}041$). Am besten bewertet wurde die Lichtszene 2200 K bei 1000 lx, während 12000 K bei 1000 lx am schlechtesten bewertet wurden. Die Differenz betrug 1,4 Skalenkategorien. Bei 200 lx wurden beide CCTs nahezu gleich gut bewertet. Während bei 2200 K eine Steigerung von E auf 1000 lx die Bewertung verbesserte, verschlechterte sich die Bewertung im Falle von 12000 K.

Tabelle 5.14: Deskriptive Statistik der Items Angenehm, Helligkeit, Lichtfarbe, Blendung, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standard-abweichung

Lichtszene		Angenehm	Helligkeit	Farbe	Blendung
2200K 200 lx	N	33	33	33	33
	M	3,6	3,9	3,9	2,3
	SD	1,5	1,1	1,1	1,6
2200K 1000 lx	N	32	32	32	32
	M	4,2	4,5	3,9	2,3
	SD	1,6	0,7	0,9	1,6
12000K 200 lx	N	37	37	37	37
	M	3,5	4,2	2,6	2,2
	SD	1,6	0,9	1,0	1,6
12000K 1000 lx	N	30	30	30	30
	M	2,8	5,0	2,6	3,0
	SD	1,7	1,3	1,1	1,8

Tabelle 5.15: Akzeptanz der Beleuchtung: Report der ANOVA (E * CCT), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Zwischensubjekteffekte		df	F	p	Partielles η²
Angenehm:	E	1	0,015	0,901	0,000
Angenehm:	CCT	1	6,617	0,011	0,049
Angenehm:	E * CCT	1	5,505	0,021	0,041
Helligkeit:	E	1	12,519	0,001	0,089
Helligkeit:	CCT	1	5,128	0,025	0,039
Helligkeit:	E * CCT	1	0,300	0,585	0,002
Lichtfarbe:	E	1	0,051	0,822	0,000
Lichtfarbe:	CCT	1	51,227	<0,001	0,286
Lichtfarbe:	E * CCT	1	0,002	0,966	0,000
Blendung:	E	1	1,946	0,165	0,015
Blendung:	CCT	1	1,328	0,251	0,010
Blendung:	E * CCT	1	1,577	0,211	0,012

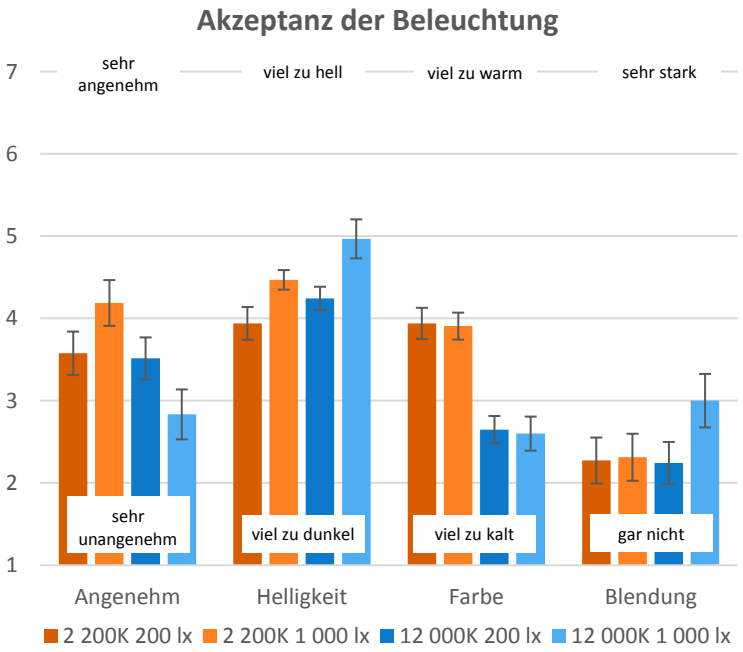


Abbildung 5.8: Akzeptanz der Beleuchtung für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler

Sowohl ein signifikanter Effekt von E ($F = 12{,}519$, $p = 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}089$) als auch ein signifikanter Effekt der CCT ($F = 5{,}128$, $p = 0{,}025$, $\eta^2 = 0{,}039$) fand sich für das Item Helligkeit. Eine Steigerung von E führte erwartungsgemäß zu einer höheren Bewertung. Jedoch führte auch eine Steigerung der CCT zu einer erhöhten Wahrnehmung der Helligkeit. Mit einem Mittelwert von 5,0 Skalenpunkten hatte die Lichtszene 12 000 K bei 1 000 lx die höchste Bewertung und wurde tendenziell als zu hell eingestuft.

Die Analyse der Lichtfarbe weist einen signifikanten Effekt der CCT ($F = 51{,}227$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}286$) auf. Nach Cohen (1988) [185] ist dies mit $\eta^2 > 0.14$ ein starker Effekt. Die CCT von 2 200 K wies einen Mittelwert von 3,9 Skalenpunkten auf und wurde damit als weder zu warm noch zu kalt bewertet. Bei 12 000 K war der Mittelwert bei 2,6 Skalenpunkten und wurde als deutlich zu kalt bewertet. E hatte offensichtlich keinen Einfluss auf die Bewertung der Lichtfarbe.

Kein signifikanter Effekt ($p > 0{,}165$) wurde für das Item Blendung gefunden. In Abbildung 5.8 zeigt sich die Tendenz, dass die Lichtszene 12 000 K bei 1 000 lx mit einem Mittelwert von 3,0 Skalenpunkten etwas stärker blendend bewertet wurde als die anderen Szenen mit Mittelwerten von 2,2 bis 2,3 Skalenpunkten.

Zusammenfassend wurden die Lichtszenen als mittelmäßig angenehm und wenig blendend bewertet. Warmweiße Szenen wurden etwas besser bewertet als kaltweiße Szenen. Eine erhöhte Beleuchtungsstärke war im Falle der niedrigen CCT von Vorteil, im Falle der hohen CCT jedoch von Nachteil. Die Lichtszene 12 000 K bei 1 000 lx wurde insgesamt am schlechtesten bewertet.

5.1.8 Analyse der Beleuchtungsstärken (200 lx vs. 500 lx vs. 1 000 lx)

In diesem Abschnitt soll nun die Beleuchtungsstärke in drei Stufen 200 lx, 500 lx und 1 000 lx (alles bei 2 200 K) genauer analysiert werden.

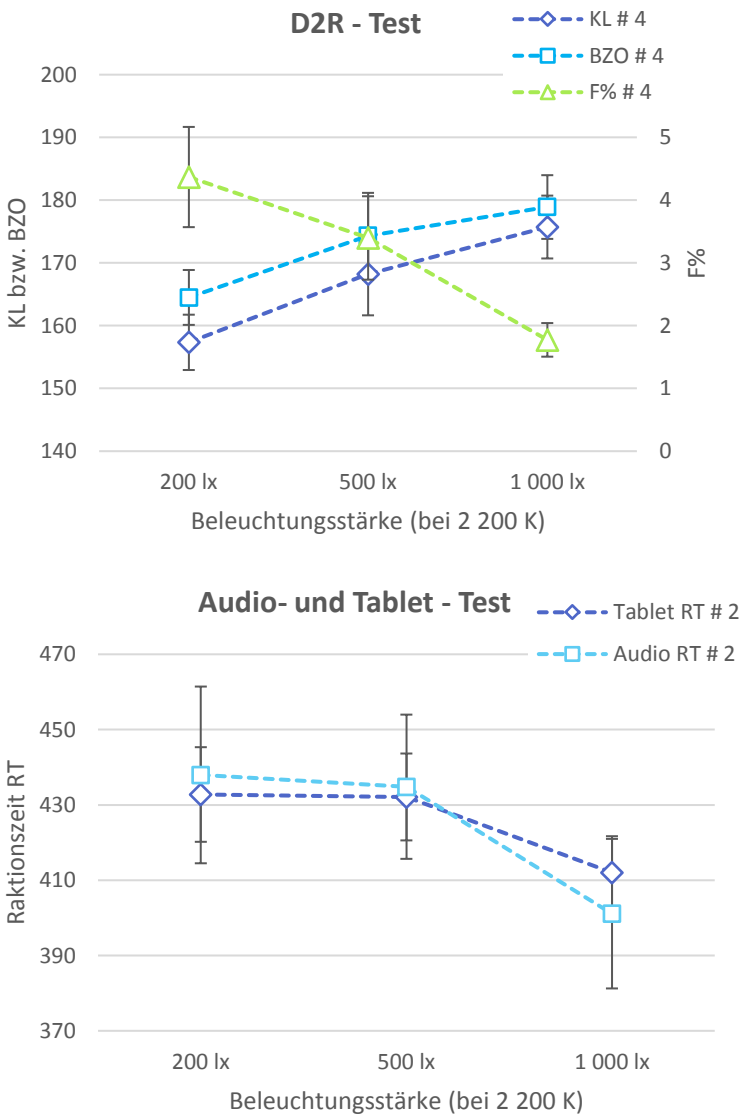


Abbildung 5.9: Beleuchtungsstärkeniveaus für d2R-Test (oben) und Audio- und Tablettest (unten), Fehlerbalken = Standardfehler

Der Faktor Zeit wurde in den vorangegangenen Analysen schon betrachtet und wird hier nicht erneut aufgenommen. Es wurde stets der letzte durchgeführte Test für die Analyse verwendet. Eine 3-stufige ANOVA enthüllt keine neuen Erkenntnisse, die Ergebnisse befinden sich im Anhang C3). Der einzige signifikante Effekt fand sich für die Fehlerprozente F% des d2R-Tests ($F = 4{,}490$; $p = 0{,}014$). Der post-hoc-Test (Bonferroni) zeigt jedoch, dass sich lediglich die 200 lx und die 1 000 lx Szene ($p = 0{,}012$) signifikant unterschieden. Die 500 lx Szene unterschied sich nicht signifikant ($p > 0{,}201$) von den anderen beiden Szenen. Die graphische Auswertung in Abbildung 5.9 zeigt, dass sich die 500 lx Szene stets zwischen den beiden anderen Szenen befand. Für den d2R-Test lag die 500 lx Szene ungefähr in der Mitte zwischen 200 lx und 1 000 lx. Sowohl für den Audio- als auch den Tablettest lag die 500 lx näher an der 200 lx Szene. Ob 500 lx bereits eine ausreichend hohe Beleuchtungsstärke darstellen, um einen Effekt auf die Aufmerksamkeit zu erzielen, kann anhand dieser Ergebnisse nicht festgestellt werden.

5.1.9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für den BZO- und KL-Wert des d2R-Tests fand sich ein signifikanter Effekt der Versuchszeit (= Lerneffekt) und der Beleuchtungsstärke (1 000 lx > 200 lx). Die Fehlerrate ergab einen signifikanten Interaktionseffekt von E * CCT: Für 2 200 K war die Fehlerrate bei 1 000 lx niedriger als bei 200 lx und für 1 000 lx war die Fehlerrate bei 2 200 K niedriger als bei 12 000 K. Der Interaktionseffekt E * CCT zeigte sich auch bei der Reaktionszeit des Audio-Tests. Bei der Reaktionszeit des Tablet-Tests war der Effekt grafisch als Tendenz erkennbar, jedoch nicht signifikant. Weiterhin gab es einen Interaktionseffekt Zeit * E des Audio-Tests: Bei 1 000 lx sank die Reaktionszeit und bei 200 lx blieb sie konstant mit zunehmender Zeit. Die KSS zeigte keine signifikanten Effekte.

Für den d2R-Test bestätigt sich die Hypothese, dass eine stark erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe eine Steigerung der Aufmerksamkeit bewirkt. Die Hypothese, dass ein stark erhöhter kurzwelliger Anteil in der spektralen Verteilung die Aufmerksamkeit

ebenfalls steigert, kann anhand dieser Ergebnisse nicht belegt werden. Im Gegensatz dazu wird die Hypothese der Interaktion zwischen Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung für die Fehlerrate des d2R-Tests und die Reaktionszeit des Go-NoGo-Tests bestätigt.

Ein signifikanter Zeiteffekt zeigte sich für mehrere Items des Fragebogens zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden: Die Probanden wurden zum Ende des Versuchs hin unkonzentrierter, gelangweilter, demotivierter und erschöpfter. Es gab außerdem einen signifikanten Interaktionseffekt E * CCT für das Item Gelangweilt und einen signifikanten Interaktionseffekt Zeit * E für Motivation. Die beobachteten Mittelwertdifferenzen beider Effekte waren jedoch klein. Die Hypothese, dass Licht das Wohlbefinden beeinflusst, wird dennoch abgelehnt, weil für alle anderen Items keine Effekte der Lichtszene auf das Wohlbefinden festgestellt wurden.

Die Lichtszenen wurden als mittelmäßig angenehm und wenig blendend bewertet. Es gab einen signifikanten Effekt für die CCT und E * CCT für das Item angenehm. Warmweiße Szenen wurden etwas besser bewertet als kaltweiße Szenen. Eine erhöhte Beleuchtungsstärke war im Falle der warmweißen CCT von Vorteil, im Falle der hohen CCT jedoch von Nachteil. Für das Item Helligkeit gab es je einen signifikanten Haupteffekt für E und CCT und für das Item Lichtfarbe einen signifikanten Effekt der CCT. Das Item Blendung zeigte keine signifikanten Unterschiede der Lichtszenen. Jedoch wurde in der grafischen Auswertung für die Lichtszene 12 000 K bei 1 000 lx eine stärkere Blendungsbewertung als für die anderen Szenen festgestellt. Diese Szene wurde außerdem insgesamt am schlechtesten bewertet. Die Hypothese der schlechteren Akzeptanz kaltweißer Lichtfarben wurde bestätigt.

Eine detailliertere Analyse der Beleuchtungsstärken inklusive der Lichtszene mit 500 lx brachte keine neuen Informationen hervor. Weiterhin wurden die Anstrengung bei der Testdurchführung und die genannten Beschwerden pro Lichtszene ausgewertet. Auch hier gabt es keine signifikanten Unterschiede der Lichtszenen.

5.2 Auswertung Laborversuch 2: Dynamische Lichtbedingungen

Die statistische Analyse erfolgt analog zur Analyse des ersten Laborversuchs. Es wird eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Die unabhängige Variable ist die Lichtszene mit drei Stufen: statisch 200 lx 2200 K, statisch 1000 lx 12000 K und dynamischer Wechsel. Die Analysen werden einzeln für jedes Test- und Fragebogenergebnis als abhängige Variable berechnet. Die morgendliche Übungsphase wurde nicht betrachtet, da hier immer die gleiche Lichtszene eingestellt war. Die wiederholten Testzeitpunkte im Versuchszeitraum am Nachmittag werden als Messwiederholung in die ANOVA aufgenommen. Damit handelt es sich um ein gemischtes Design: Lichtszene (3 Stufen) * Zeitpunkt (3 bzw. 5 Stufen). Berichtet werden die Innersubjekteffekte und die Interaktionseffekte (Multivariate Tests, Pillai-Spur) sowie die Zwischensubjekteffekte. Die Effektstärke wird nach Cohen (1988) [185] durch das partielle Eta-Quadrat (η^2) interpretiert: $\eta^2 > 0{,}01$ = schwacher Effekt, $\eta^2 > 0{,}06$ = mittlerer Effekt und $\eta^2 > 0{,}14$ = starker Effekt.

Tabelle 5.16 Hypothesen für die abhängigen Variablen der Laborstudie 2

Hypothesen für:	**Aufmerk-samkeit**	**Wohlbefinden**	**Akzeptanz der Beleuchtung**
	• d2R-Test • Audiotest • KSS	• 7 Items des Fragebogens • Veränderung	• angenehm • Helligkeit • Farbe • Blendung
0. Nullhypothese	Keine Veränderung		
1. Ein dynamischer Lichtwechsel bewirkt …	Steigerung	Veränderung	Veränderung

5.2.1 Datenaufbereitung

Allgemein

Vorkenntnisse zum Thema Beleuchtung z. B. der Besuch einer lichttechnischen Vorlesung gaben sechs Probanden an. Weitere 11 Probanden hatten Vorkenntnisse bei Konzentrationstests und -spielen. 56 Probanden hatten schon an anderen Probandenstudien teilgenommen. Es wurde weiterhin gefragt, ob an dem Versuchstag etwas ungewöhnlich sei: elf Probanden hatten schlecht geschlafen, neun waren erkältet bzw. krank und sieben waren besonders gestresst oder hatten eine schlechte Stimmung. Der Gesundheitsfragebogen SF12 besitzt einen Normbereich von 50 ± 10 [171]. Im körperlichen Bereich lagen vier Probanden unter dem Normalbereich und drei lagen darüber. Im psychischen Bereich lagen 21 Probanden unter dem Normalbereich. Dies ist wahrscheinlich durch erhöhten Stress am Ende des Semesters zu erklären. Da die Testergebnisse keine Auffälligkeiten aufwiesen, wurden keine Probanden aufgrund der eben genannten Punkte ausgeschlossen.

D2R-Test

Der erste Test am Nachmittag wurde als weiterer Übungstest angekündigt. Dieser Test wurde daher nicht ausgewertet. Ausreißer wurden analog zur ersten Laborstudie behandelt. Für die Geschwindigkeit BZO und die Konzentrationsleistung KL gab es keine Ausreißer. Ausreißer in der Fehlerrate F% (> 30 %) können ein Hinweis auf eine fehlerhafte Bearbeitung sein. Dies trat viermal auf. Da die Probanden sonst keine Auffälligkeiten aufwiesen, wurden die Tests beibehalten.

Auditiver Go-NoGo-Test

In drei Fällen fehlten die Audiotests aufgrund technischer Schwierigkeiten. Die Auswertung erfolgt analog zur vorherigen Studie. Es wurde der Median der Reaktionszeit verwendet. Die Fehlerrate war wiederum nicht auswertbar. Ebenso wie beim d2R-Test wurde der erste

Test am Nachmittag als weiterer Übungstest nicht ausgewertet. Als Kriterium für Ausreißer wurde der Mittelwert ± die 3-fache Standardabweichung verwendet. Hier gab es einen Probanden, wo dies zutraf (Reaktionszeit > 700 ms). Dieser Proband wurde ausgeschlossen.

Fragebögen (KSS, subjektive Aufmerksamkeit und Wohlbefinden, Akzeptanz der Beleuchtung)

Ebenso wie in der ersten Laborstudie wurden die Antworten auf Plausibilität überprüft und keine offensichtlichen Mängel entdeckt.

5.2.2 Überprüfung der statistischen Voraussetzungen

An dieser Stelle werden analog zur ersten Studie die statistischen Voraussetzungen geprüft. Intervallskalierung wurde für alle Variablen, auch für die Fragebogenergebnisse, angenommen.

Normalverteilung

Die Voraussetzung der Normalverteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov- und Shapiro-Wilk-Test überprüft. Außerdem fand eine Sichtkontrolle mittels Q-Q-Plots statt. Tests und Plots sind im Anhang aufgelistet. Die Voraussetzung war für die Reaktionszeit des Go-NoGo-Tests sowie für den BZO- und KL-Wert des d2R-Tests (bis auf jeweils eine Verletzung) gegeben. Signifikante Testergebnisse wiesen der F%-Wert des d2R-Tests sowie alle Fragebogenergebnisse auf. Die Q-Q-Plots zeigten jedoch nur geringe Abweichungen zur idealen Verteilung, sodass hier auf die Robustheit der ANOVA verwiesen wird [187–190].

Varianzhomogenität

Varianzhomogenität wurde mit dem Levene-Test im Zwischensubjektdesign und mit dem Box-R-Test im Innersubjektdesign überprüft. Beide Testergebnisse sind im Anhang nachzulesen. Auch bei einer Verletzung der Varianzhomogenität kann auf die Robustheit der

ANOVA [191] verwiesen werden, sodass trotz einzelner signifikanter Fälle eine ANOVA angewendet wurde.

5.2.3 D2R-Test

Es wurden KL, BZO und F% zu den Testzeitpunkten #I, #II und #V ausgewertet. Zu den Zeiten #III und #IV fanden andere Aufgaben statt. Die deskriptive Statistik pro Lichtszene ist in Tabelle 5.17 aufgelistet.

Tabelle 5.17: Deskriptive Statistik der Messgrößen KL, BZO und F%; M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung, N Anzahl gültiger Fälle

Variable	Lichtszene								
	Statisch I 200 lx + 2 200 K			Statisch II 1 000 lx + 12 000 K			Dynamischer Wechsel		
	M	SD	N	M	SD	N	M	SD	N
KL #I	157,9	25,9	31	165,3	30,0	31	164,8	26,1	30
KL #II	164,5	27,3	31	170,6	30,6	31	167,9	25,2	30
KL #V	165,0	27,2	31	169,8	31,7	31	168,9	27,1	30
BZO #I	167,5	23,4	31	173,6	27,3	31	173,0	30,0	30
BZO #II	176,0	25,0	31	178,8	29,6	31	177,3	30,2	30
BZO #V	177,6	25,4	31	179,0	29,3	31	178,1	31,5	30
F% #I	5,7	8,1	31	4,8	7,4	31	4,3	6,4	30
F% #II	6,4	9,3	31	4,5	7,3	31	4,8	6,7	30
F% #V	6,8	10,1	31	5,1	8,1	31	4,8	6,1	30

Es wurde jeweils eine ANOVA mit dem Zwischensubjektfaktor Lichtszene (Statisch I 200 lx + 2 200 K vs. Statisch II 1 000 lx + 12 000 K vs. Dynamischer Wechsel) und dem Innersubjektfaktor Zeit (#I vs. #II vs. #V) durchgeführt. Die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 5.18 und die graphische Darstellung in Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11.

Die Analyse ergab einen signifikanten Effekt der Zeit für KL ($F = 20{,}212$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}315$) und BZO ($F = 29{,}970$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}405$). Im post-hoc-Test (Bonferroni) sowie in der Grafik zeigt sich, dass der

zeitliche Verlauf eine Verbesserung vom Zeitpunkt #I zu #II aufwies und zu Zeitpunkt #V stagnierte. Die Lichtszene hatte keinen Einfluss ($p > 0{,}203$).

Tabelle 5.18: D2R-Test: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Zwischensubjekteffekte	df	F	p	Partielles η²
KL: Lichtszene	2	0,417	0,660	0,009
BZO: Lichtszene	2	0,126	0,882	0,003
F%: Lichtszene	2	0,450	0,639	0,010
Innersubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η²**
KL: Zeit	2	20,212	<0,001	0,315
KL: Zeit * Lichtszene	4	0,901	0,464	0,020
BZO: Zeit	2	29,970	<0,001	0,405
BZO: Zeit * Lichtszene	4	1,505	0,203	0,033
F%: Zeit	2	2,670	0,075	0,057
F%: Zeit * Lichtszene	4	0,846	0,498	0,019

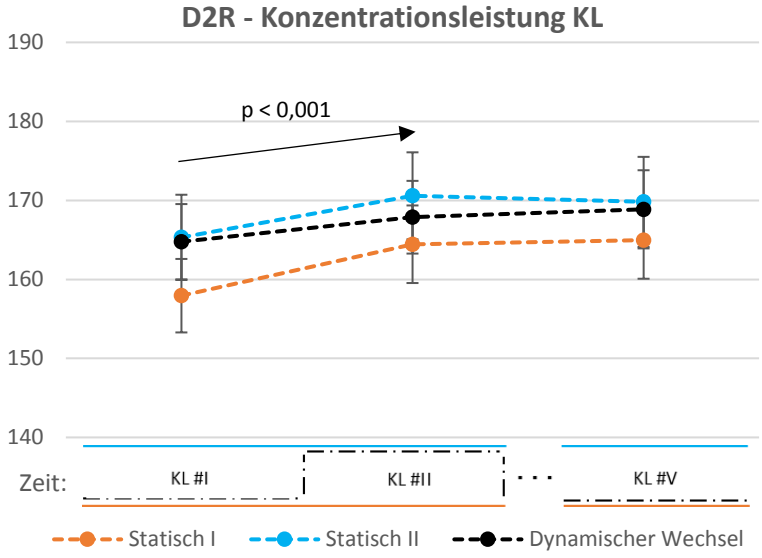


Abbildung 5.10: D2R-Test KL für Lichtszene * Zeit, Fehlerbalken = Standard-fehler, signifikante Effekte der Zeit sind markiert.

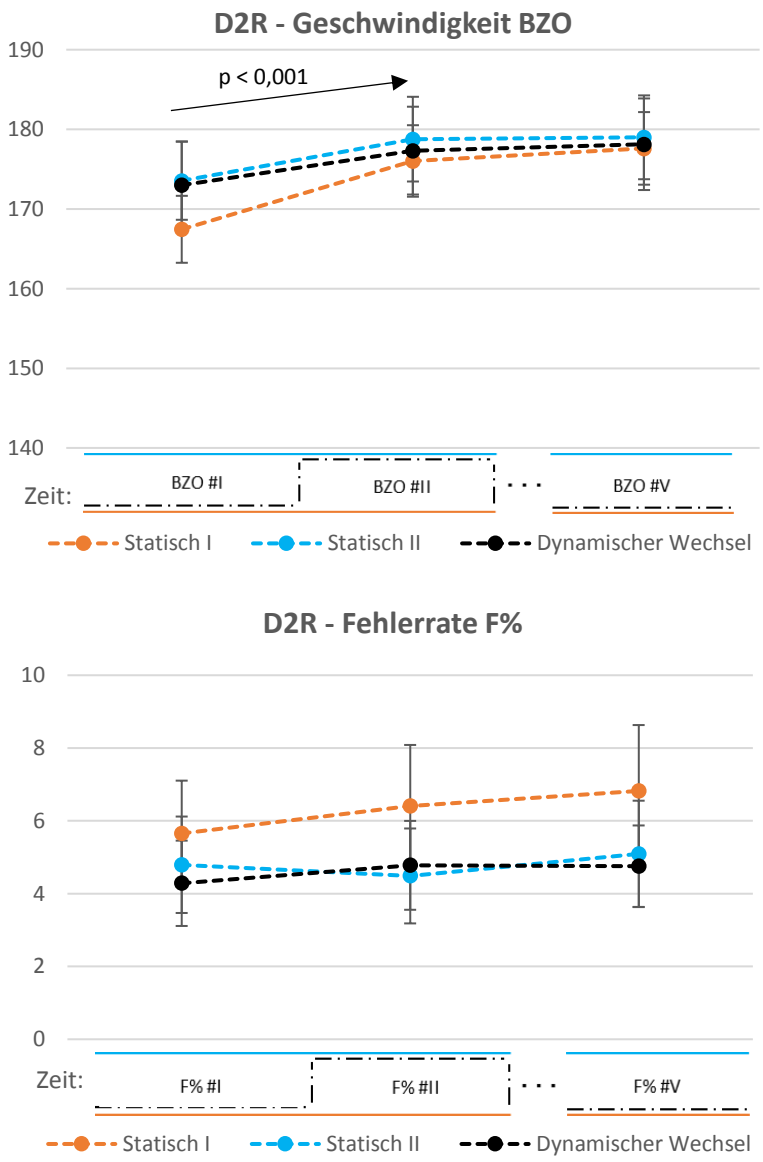


Abbildung 5.11: D2R-Test BZO (oben) und F% (unten) für Lichtszene * Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Zeit sind markiert.

5.2.4 Auditiver Go-NoGo-Test

Der Go-NoGo-Test wurde stets nach dem d2R-Test ausgeführt und die Analyse der Reaktionszeit (Audio RT) erfolgte dementsprechend analog. Die deskriptive Statistik befindet sich in Tabelle 5.19, das Ergebnis der ANOVA Lichtszene * Zeit in Tabelle 5.20 und das Diagramm in Abbildung 5.13. Wie beim d2R-Test gab es auch hier einen signifikanten Effekt der Zeit ($F = 12{,}246$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}226$) sowie keine Effekte der Lichtszene ($p = 0{,}330$). Die Reaktionszeit nahm über die Versuchszeit ab, d.h. auch hier wurden die Probanden besser. Die post-hoc-Analyse zeigt, dass der Unterschied zwischen den Zeitpunkten #I und #V ($p < 0{,}001$) sowie #II und #V ($p < 0{,}001$) signifikant war.

Tabelle 5.19: Deskriptive Statistik der Messgrößen Audio RT; M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung, N Anzahl gültiger Fälle

Variable	Lichtszene								
	Statisch I 200 lx + 2 200 K			Statisch II 1 000 lx + 12 000 K			Dynamischer Wechsel		
	M	SD	N	M	SD	N	M	SD	N
Audio RT #I	386,1	61,4	29	388,3	85,2	31	348,5	73,0	29
Audio RT #II	382,4	73,9	29	378,6	87,6	31	367,3	79,9	28
Audio RT #V	360,6	68,1	29	357,8	69,2	31	333,9	67,7	29

Tabelle 5.20: Auditiver Go-NoGo-Test: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Zwischensubjekteffekte	df	F	p	Partielles η^2
Audio RT: Lichtszene	2	1,123	0,330	0,026
Innersubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η^2**
Audio RT: Zeit	2	12,246	<0,001	0,226
Audio RT: Zeit * Lichtszene	4	1,017	0,400	0,046

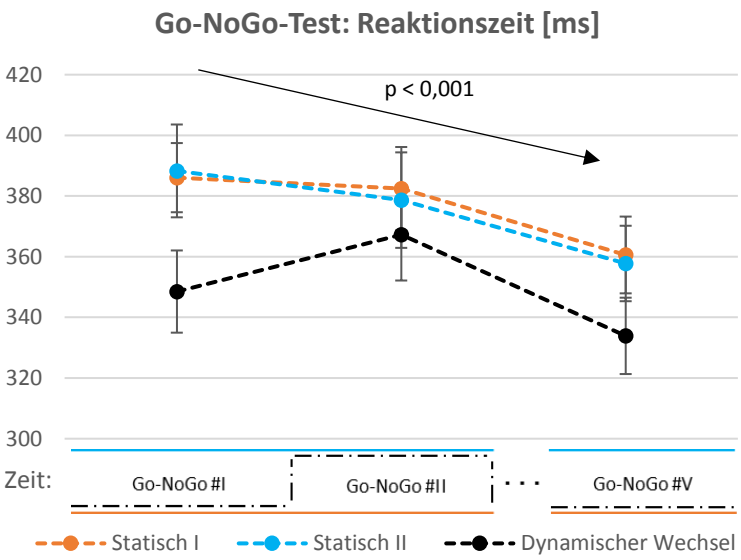


Abbildung 5.13: Go-NoGo-Test Reaktionszeit für Lichtszene * Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Zeit sind markiert.

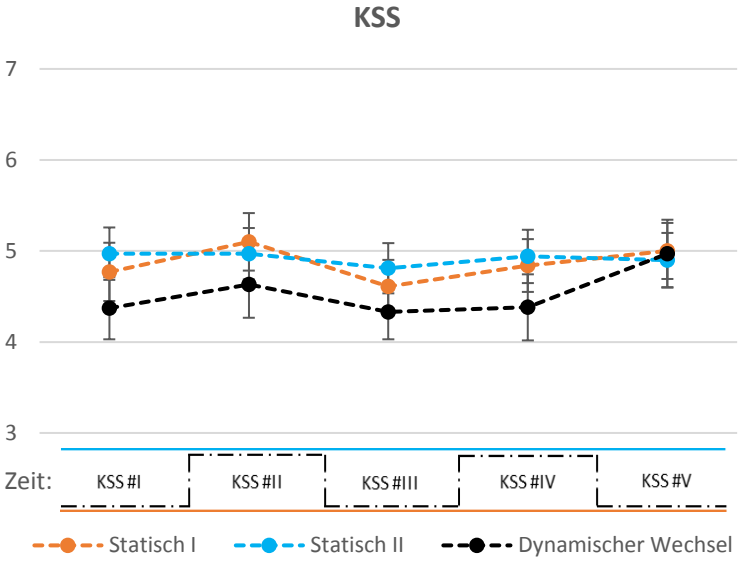


Abbildung 5.12: KSS für Lichtszene * Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler

5.2.5 Karolinska-Sleepiness-Scale

Die KSS wurde zu allen Testzeitpunkten (#I bis #V) abgefragt. In Tabelle 5.21 und Tabelle 5.22 sind die deskriptive Statistik sowie die Ergebnisse der ANOVA Lichtszene * Zeit aufgelistet. Der Effekt der Zeit war wiederum signifikant ($F = 4{,}069$, $p < 0{,}005$, $\eta^2 = 0{,}164$) und der Effekt der Lichtszene nicht ($p = 0{,}718$). Der graphische Verlauf in Abbildung 5.12 zeigt, dass die Gruppe Dynamischer Wechsel tendenziell etwas wacher war. Dies könnte jedoch auch an einem bereits zu Beginn bestehenden Unterschied liegen. Der zeitliche Trend war eine leichte Ermüdung von Zeit #I zu #II, etwas wacher zu #III und anschließend wieder eine Ermüdung. Am Ende des Versuchs waren alle Gruppen gleich müde.

Tabelle 5.21: Deskriptive Statistik der Messgrößen KSS; M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung, N Anzahl gültiger Fälle

Variable	Lichtszene								
	Statisch I 200 lx + 2 200 K			Statisch II 1 000 lx + 12 000 K			Dynamischer Wechsel		
	M	SD	N	M	SD	N	M	SD	N
KSS #I	4,8	1,8	31	5,0	1,6	31	4,4	1,9	30
KSS #II	5,1	1,7	30	5,0	1,5	30	4,6	2,0	30
KSS #III	4,6	1,6	31	4,8	1,5	31	4,3	1,6	30
KSS #IV	4,8	1,6	31	4,9	1,6	31	4,4	2,0	29
KSS #V	5,0	1,7	31	4,9	1,7	31	5,0	2,0	30

Tabelle 5.22: KSS: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen $p < 0{,}05$ sind hervorgehoben

Zwischensubjekteffekte	df	F	p	Partielles η^2
KSS: Lichtszene	2	0,332	0,718	0,008
Innersubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η^2**
KSS: Zeit	4	4,069	0,005	0,164
KSS: Zeit * Lichtszene	8	0,937	0,488	0,043

5.2.6 Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden

Der Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden wurde zu allen Zeitpunkten #I bis #V abgefragt. Die deskriptive Statistik befindet sich im Anhang D3). In Tabelle 5.23 sind die Ergebnisse der ANOVA Lichtszene * Zeit dargestellt.

Tabelle 5.23: Fragebogen Aufmerksamkeit und Wohlbefinden: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Zwischensubjekteffekte		**df**	**F**	**p**	**Partielles η²**
Wohl:	Lichtszene	2	0,564	0,571	0,013
Konzentriert:	Lichtszene	2	3,060	0,052	0,066
Gestresst:	Lichtszene	2	0,025	0,975	0,001
Gelangweilt:	Lichtszene	2	1,789	0,173	0,040
Ruhig:	Lichtszene	2	0,171	0,843	0,004
Motiviert:	Lichtszene	2	0,343	0,710	0,008
Munter:	Lichtszene	2	3,194	0,046	0,068
Innersubjekteffekte		**df**	**F**	**p**	**Partielles η²**
Wohl:	Zeit	4	1,800	0,136	0,079
Wohl:	Zeit * Lichtszene	8	1,809	0,078	0,078
Konzentriert:	Zeit	4	4,757	0,002	0,185
Konzentriert:	Zeit * Lichtszene	8	1,690	0,104	0,074
Gestresst:	Zeit	4	5,160	0,001	0,197
Gestresst:	Zeit * Lichtszene	8	1,047	0,403	0,047
Gelangweilt:	Zeit	4	14,425	<0,001	0,407
Gelangweilt:	Zeit * Lichtszene	8	1,617	0,123	0,071
Ruhig:	Zeit	4	3,481	0,011	0,142
Ruhig:	Zeit * Lichtszene	8	1,146	0,335	0,051
Motiviert:	Zeit	4	4,335	0,003	0,171
Motiviert:	Zeit * Lichtszene	8	0,944	0,482	0,043
Munter:	Zeit	4	2,355	0,060	0,101
Munter:	Zeit * Lichtszene	8	1,653	0,133	0,072

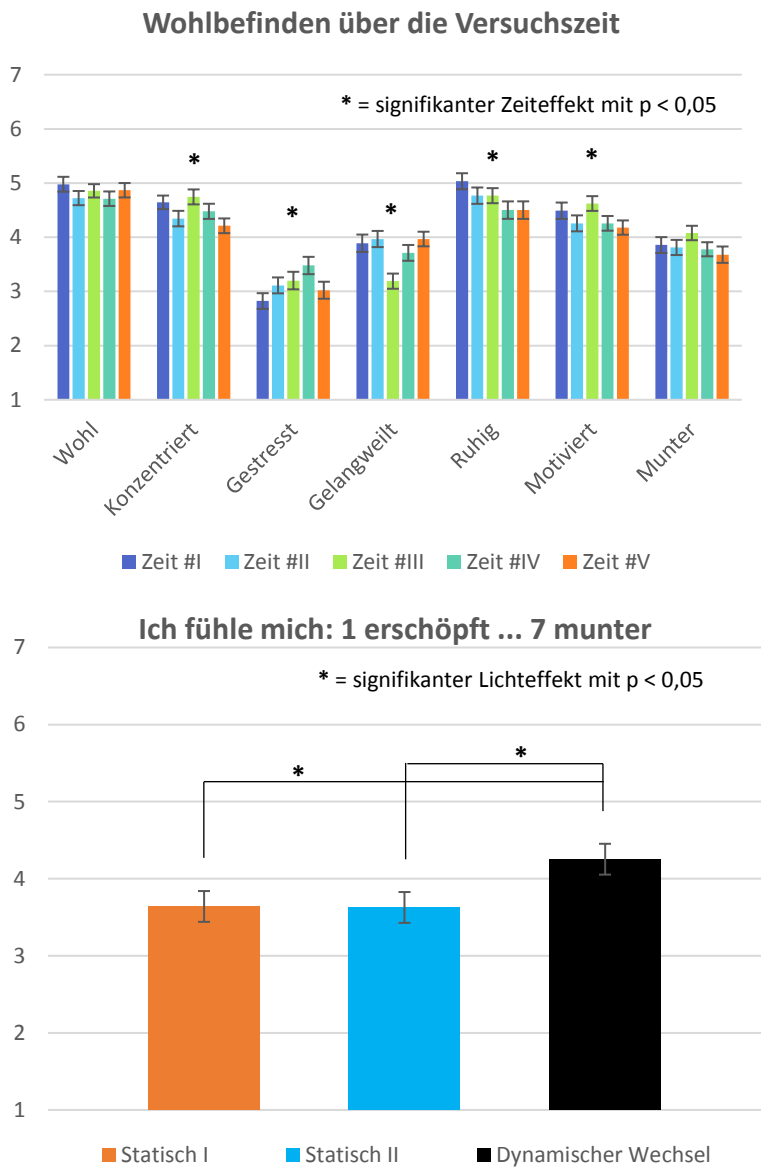


Abbildung 5.14: Wohlbefinden pro Zeit (oben) und Item munter pro Lichtszene (unten), Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte sind markiert.

Signifikante Zeiteffekte fanden sich für die Items konzentriert, gestresst, gelangweilt, ruhig und motiviert. Abbildung 5.14 zeigt den zeitlichen Verlauf aller Items und zusätzlich die Ausprägung des Items munter pro Lichtszene. Dieses Item wies einen signifikanten Effekt der Lichtszene auf. Ein post-hoc-Test (Bonferroni) war nicht signifikant ($p = 0{,}089$) und lieferte keine weiteren Informationen. Jedoch zeigte ein einfacher Kontrast mit der Referenzlichtszene Dynamischer Wechsel ($M = 4{,}3$) signifikante Unterschiede zu Statisch I 200 lx + 2 200 K ($p = 0{,}033$, $M = 3{,}6$) und Statisch II 1 000 lx + 12 000 K ($p = 0{,}030$, $M = 3{,}6$). Die durchschnittliche Differenz betrug in beiden Fällen 0,7 Skalenkategorien. Mit $\eta^2 = 0{,}068$ handelte es sich um einen mittleren Effekt.

Zu den Zeitpunkten #III und #V wurde außerdem danach gefragt, ob die Probanden eine Veränderung in ihrem Wohlbefinden bemerkt hatten und wenn ja, welcher Art. Tabelle 5.24 teilt die genannten Veränderungen nach Lichtszene in positive, negative, gemischte und keine Effekte ein. Im Mittel gaben 53 % keine Veränderung an. Positive Veränderungen reichten von 7 % bis 33 % und negative Veränderungen von 17 % bis 41 %. Zwischen den beiden statischen Lichtszenen gab es keine Unterschiede. Für den Dynamischen Wechsel fällt auf, dass zu Zeitpunkt #III die meisten negativen Effekte und die wenigsten positiven Effekte insgesamt berichtet wurden.

Tabelle 5.24: Veränderung des Wohlbefindens pro Lichtszene und Zeitpunkt

Lichtszene	**Statisch I 200 lx + 2 200 K**		**Statisch II 1 000 lx + 12 000 K**		**Dynamischer Wechsel**	
Zeitpunkt	**#III**	**#V**	**#III**	**#V**	**#III**	**#V**
Keine Veränderung	16	16	19	17	13	16
positiver Effekt	5	7	5	5	2	4
negativer Effekt	8	5	6	6	12	8
gemischter Effekt	0	0	0	3	0	0
Keine Angabe	1	2	0	0	2	1
Gesamt	30	30	30	31	29	29

5.2.7 Fragebogen zur Akzeptanz der Beleuchtung

Die Akzeptanz der Beleuchtung wurde direkt zu Beginn der Versuchsphase am Nachmittag (Zeit #0) sowie zu den Zeitpunkten #II und #V abgefragt. Die deskriptive Statistik befindet sich in Tabelle 5.25 und das Ergebnis der ANOVA Lichtszene * Zeit in Tabelle 5.26.

In diesem Fragebogen waren alle Effekte bis auf eine Ausnahme, der Zeiteffekt für das Item Angenehm, signifikant. Insbesondere die Interaktionseffekte für Zeit * Lichtszene waren für alle Items signifikant. Daher wurde eine detaillierte post-hoc Analyse (Bonferroni) hinsichtlich der Zeit und der Lichtszene durchgeführt. Die Ergebnisse befinden sich im Anhang und waren für die 4 Items nahezu identisch.

Tabelle 5.25: Deskriptive Statistik der Items Angenehm, Helligkeit, Lichtfarbe, Blendung, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung

Variable	Lichtszene								
	Statisch I 200 lx + 2200 K			Statisch II 1000 lx + 12000 K			Dynamischer Wechsel		
	M	SD	N	M	SD	N	M	SD	N
Angenehm #0	4,1	1,2	31	2,7	1,5	31	4,6	1,3	29
Angenehm #II	4,2	1,1	30	3,1	1,4	30	3,4	1,5	30
Angenehm #V	4,2	1,1	31	2,9	1,3	31	4,0	1,3	30
Helligkeit #0	4,1	0,8	31	5,8	0,9	31	4,2	0,7	29
Helligkeit #II	3,9	0,7	30	5,5	0,9	30	5,2	1,1	30
Helligkeit #V	4,1	0,8	31	5,6	0,9	31	4,0	1,3	30
Lichtfarbe #0	4,1	1,0	31	2,1	1,1	31	4,3	0,5	29
Lichtfarbe #II	4,4	0,7	30	2,5	1,2	30	2,7	0,9	30
Lichtfarbe #V	4,3	0,9	31	2,4	1,1	31	4,7	1,1	30
Blendung #0	2,6	1,6	31	4,1	1,8	31	2,2	1,3	29
Blendung #II	2,8	1,6	30	3,6	1,8	30	4,1	1,9	30
Blendung #V	2,8	1,6	31	3,9	1,9	31	2,1	1,3	30

Tabelle 5.26: Akzeptanz der Beleuchtung: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Zwischensubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η²**
Angenehm: Lichtszene	2	14,200	<0,001	0,248
Helligkeit: Lichtszene	2	40,512	<0,001	0,485
Lichtfarbe: Lichtszene	2	46,593	<0,001	0,520
Blendung: Lichtszene	2	5,950	0,004	0,122
Innersubjekteffekte	**df**	**F**	**p**	**Partielles η²**
Angenehm: Zeit	2	1,347	0,266	0,031
Angenehm: Zeit * Lichtszene	4	4,691	0,001	0,098
Helligkeit: Zeit	2	4,628	0,012	0,098
Helligkeit: Zeit * Lichtszene	4	9,837	<0,001	0,186
Lichtfarbe: Zeit	2	16,560	<0,001	0,280
Lichtfarbe: Zeit * Lichtszene	4	19,370	<0,001	0,311
Blendung: Zeit	2	7,601	0,001	0,152
Blendung: Zeit * Lichtszene	4	9,344	<0,001	0,179

Zunächst wurde der Haupteffekt **Lichtszene** nach Zeitpunkten aufgeschlüsselt: Die beiden statischen Lichtszenen wurden zu allen Zeitpunkten unterschiedlich bewertet (Ausnahme: Zum Zeitpunkt #II existierte für die Blendung kein Unterschied). Die Beleuchtung der dynamischen Lichtszene wechselte im 12 min Rhythmus zwischen den beiden statischen Lichtszenen hin und her. Zu den Abfragezeitpunkten #0 und #V entsprach die Beleuchtung Statisch I und zum Zeitpunkt #II Statisch II. Dies fand sich auch in der Bewertung der dynamischen Lichtszene wieder: Sie wurde abhängig vom Zeitpunkt stets gleich der entsprechenden statischen Szene bewertet.

Der Haupteffekt **Zeit** wurde nach Lichtszenen aufgeschlüsselt: Der Zeiteffekt existierte nur für die dynamische Lichtszene, aber nicht für die statischen Szenen. Ausnahme: Für Statisch II wurde die Lichtfarbe von Zeitpunkt #0 zu #II etwas besser bewertet, was eventuell auf eine Gewöhnung schließen lässt.

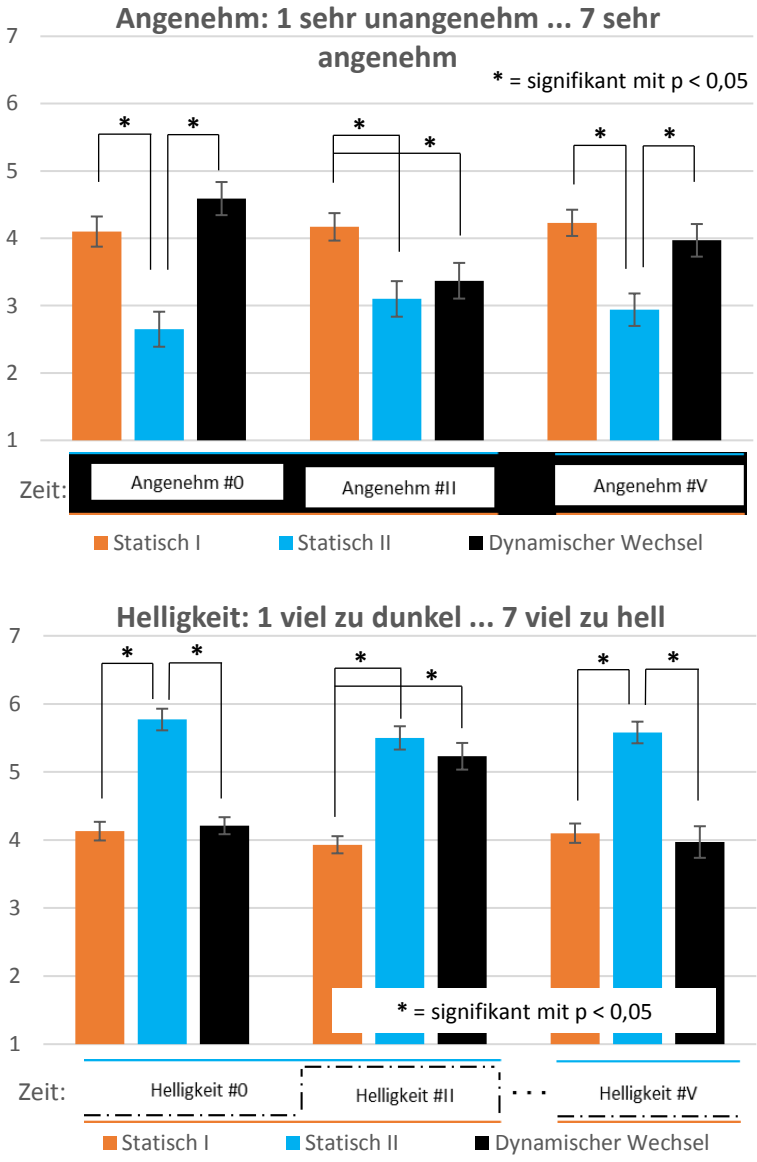


Abbildung 5.15: Akzeptanz: Angenehm (oben) und Helligkeit (unten) pro Lichtszene, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte sind markiert.

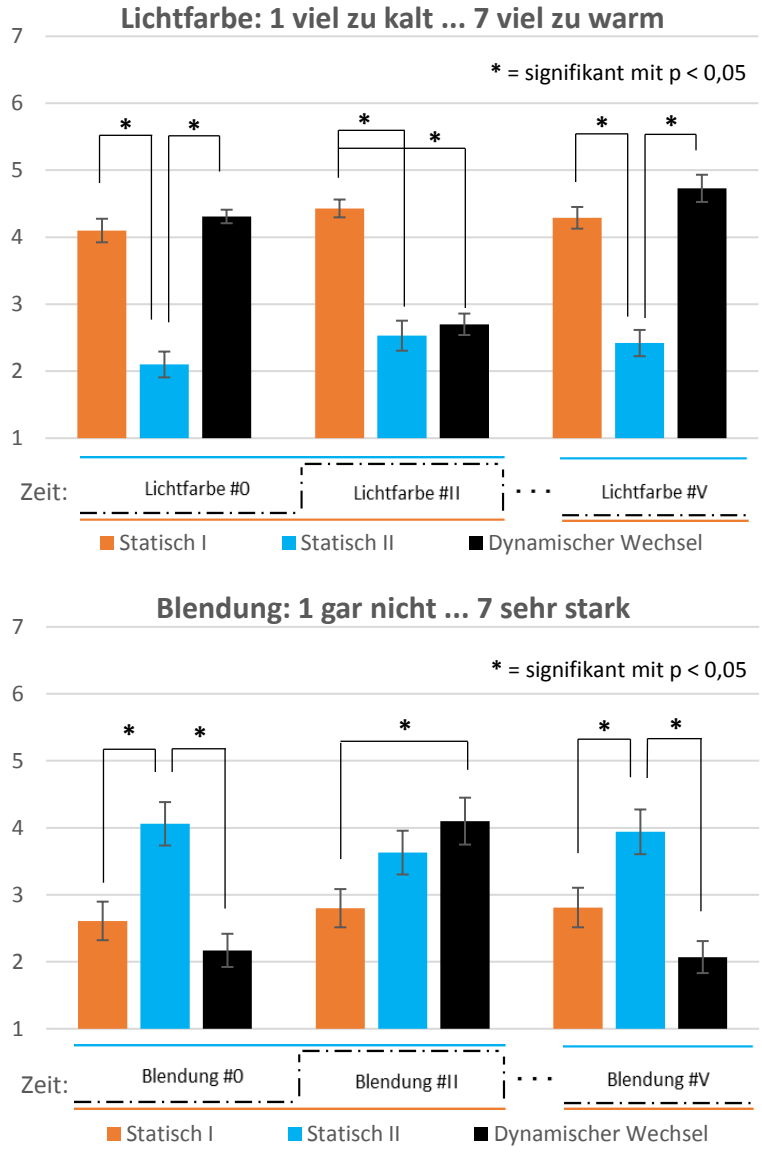


Abbildung 5.16: Akzeptanz: Lichtfarbe (oben) und Blendung (unten) pro Lichtszene, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte sind markiert.

Lichtszene Statisch I 200 lx 2 200 K wurde im Durchschnitt als mittelmäßig angenehm (M = 4,2), weder zu hell noch zu dunkel (M = 4,1), weder zu warm noch zu kalt (M = 4,3) und wenig blendend (M = 2,7) bewertet. Im Unterschied dazu wurde Lichtszene Statisch II 12 000 K 1 000 lx deutlich schlechter bewertet: etwas unangenehm (M = 2,9), zu hell (M = 5,6), zu kalt (M = 2,4) und mittelmäßig blendend (M = 3,9). Die Lichtszene dynamischer Wechsel wurde stets analog zur entsprechenden statischen Lichtszene zu dem jeweiligen Zeitpunkt bewertet.

5.2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messgrößen für die Aufmerksamkeit d2R-Test, Go-NoGo-Test und KSS unterschieden sich in diesem Versuch nicht zwischen den eingestellten Lichtszenen. Die Hypothese, dass eine dynamische Abfolge von Lichtszenen effektiver auf die Aufmerksamkeit wirkt als eine statische Lichtszene gleicher Dauer, kann nicht bestätigt werden.

Signifikante Effekte wurden lediglich für den Faktor Zeit gefunden. Im Falle BZO, KL und Reaktionszeit Go-NoGo fand eine Verbesserung über den Versuchszeitraum statt. Der zeitliche Verlauf der KSS schwankte, jedoch waren am Ende alle Gruppen am müdesten. Auch für die Items des Fragebogens Konzentriert, Gestresst, Gelangweilt, Ruhig und Motiviert wurde ein signifikanter Zeiteffekt gefunden. Einzig beim Item Munter gab es einen signifikanten Effekt mit mittlerer Effektstärke der Lichtszene: die Gruppe Dynamischer Wechsel war im Durchschnitt 0,7 Skalenpunkte munterer als die beiden statischen Gruppen. Diese Ausnahme wird als kein ausreichender Beleg für die Hypothese, dass Licht das Wohlbefinden beeinflusst, bewertet.

Wie in der vorangegangenen Studie wurde die Lichtszene Statisch I 200 lx 2 200 K deutlich besser bewertet als Statisch II 1 000 lx 12 000 K. Die dynamisch wechselnde Beleuchtung wurde stets analog zur entsprechenden statischen Lichtszene bewertet. Die Hypothese, dass hohe Farbtemperaturen schlechter akzeptiert werden, wird bestätigt.

5.3 Auswertung Hörsaalstudie

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Hörsaalstudie beschrieben und analysiert. Eine kurze Rekapitulation des Ablaufs: Die Tests und Fragebögen wurden jeweils vor und nach der 90-minütigen Vorlesung (VL) durchgeführt. Die Vorlesung fand zweimal pro Woche statt (donnerstags 14 bis 16 Uhr und freitags 8 bis 10 Uhr). Das Experiment lief über insgesamt 12 Wochen, wobei in jeder Woche eine andere Lichtszene eingestellt wurde.

Tabelle 5.27 Hypothesen für die abhängigen Variablen der Hörsaalstudie

Hypothesen für:	**Aufmerk-samkeit**	**Wohlbefinden**	**Akzeptanz Beleuchtung**
	• d2R-Test • KSS	• 7 Items des Fragebogens	• angenehm • Helligkeit • Farbe • Blendung • Lesbarkeit der Folien
0. Nullhypothese	Keine Veränderung		
1. Eine erhöhte E_v bewirkt …	Steigerung	Veränderung	Steigerung
2. Eine erhöhte CCT bzw. a_{mel} bewirkt …	Steigerung	Veränderung	Verminderung
3. Tageszeit und Tageszeit x Beleuchtung bewirken …	Veränderung	Veränderung	Veränderung

Zunächst wird die Aufbereitung der Daten und die statistische Methode erläutert. Anschließend werden nacheinander die Auswertungen des d2R-Tests, der Karolinska-Sleepiness-Skala, des Fragebogens zum Wohlbefinden und des Fragebogens zur Beleuchtung vorgestellt. Zum Schluss werden die Forschungsfragen zur explorativen Beobachtung der Korrelation der abhängigen Variablen miteinander und die potenziellen

Einflüsse verschiedener Kovariablen auf die akute Aufmerksamkeit untersucht.

5.3.1 Datenaufbereitung

Bei der Hörsaalstudie ist die gründliche Datenaufbereitung besonders wichtig, weil in einer Langzeit-Feldstudie viele Fehlerquellen auftreten können. Fehlerhafte Werte wurden sowohl im d2R-Test als auch im Fragebogen bereinigt und Ausreißer untersucht, wie im Folgenden näher erläutert wird.

Von den ursprünglich 85 Probanden schieden einige Probanden aus. Zwei Probanden verließen das Experiment gleich zu Beginn. Danach schieden im Jahr 2016 noch zwei weitere Probanden aus und im Jahr 2017 noch 15 Probanden. Diese Probanden wurden ausgeschlossen. Acht Probanden nahmen nur einmal wöchentlich teil, was zu reduzierten Datensätzen führte. Da sie regelmäßig teilnahmen, wurden diese Daten beibehalten. Die resultierende Anzahl Probanden war 67.

Fehlende Datensätze gab es vor allem wegen Verspätungen oder Nichterscheinen der Probanden. Beim d2R-Test wurde vereinzelt das Blatt verkehrt herum bearbeitet. Diese konnten nicht ausgewertet werden. Ebenso wie in den Laborstudien wurde eine Fehlerrate (F%) von über 30 % als fehlerhafte Bearbeitung (z. B. Aufgabe nicht verstanden, keine ernsthafte Durchführung, Schummeln) angesehen. Aufgrund der Länge der Feldstudie und der sehr häufigen Durchführung des monotonen d2R-Tests, wurde angenommen, dass die Motivation den Test ernsthaft durchzuführen bei einigen Probanden mit der Zeit abnahm. Daher wurde dieses Kriterium strenger gehandhabt als in den Laborstudien und alle d2R-Tests mit Fehlerraten F% > 30 % wurden ausgeschlossen. Ein Proband besaß überdurchschnittlich häufig Fehlerraten von über 30 % und wurde daher komplett ausgeschlossen, da hier entweder geschummelt oder die Aufgabenstellung nicht verstanden wurde. Drei Probanden erreichten einen Deckeneffekt, das heißt, sie erzielten fast immer das maximal mögliche Ergebnis. Sie

wurden ebenfalls ausgeschlossen. Für den d2R-Test blieben somit N = 63 Probanden erhalten.

Ein fehlender bzw. fehlerhafter d2R-Test bedeutet nicht automatisch auch fehlende bzw. fehlerhafte Fragebögen. Diese wurden zwar den entsprechenden d2R-Tests zugeordnet, aber separat auf Ihre Plausibilität untersucht. Es kam vor, dass der falsche Fragebogen ausgefüllt wurde z. B. Fragebogen 1 nach der Vorlesung statt vorher. In diesem Fall wurde der Teil der Wohlbefinden-Items behalten, der in beiden Fragebögen gleich war, und der Rest gelöscht. Trotz Ansage, den Fragebogen erst nach dem d2R-Test auszufüllen, füllten einige Probanden den Fragebogen schon vorher aus. Die Antworten auf die Fragen, wie anstrengend der d2R-Test war und ob es Ablenkungen gab, waren in diesem Fall nicht aussagekräftig. Beim Papierfragebogen konnte das nicht festgestellt werden. Die Onlinefragebögen speicherten die Uhrzeit der Bearbeitung, sodass zur falschen Zeit ausgefüllte Fragebögen aussortieren werden konnten. Onlinefragebögen, die donnerstags nach 16:30 Uhr bzw. freitags nach 10:30 Uhr ausgefüllt wurden, wurden aussortiert.

Die Probanden wurden außerdem vor jeder Vorlesung gefragt, ob an diesem Tag etwas Ungewöhnliches vorlag. Von insgesamt 1561 abgegeben Fragebögen vor der Vorlesung geben 303 etwas Ungewöhnliches an. Davon entfielen 128 auf Krankheit/Erkältung/ Schmerzen, 98 auf Schlafdefizite/-probleme, 44 auf seelische Probleme/ Stress und 33 auf Hunger. Diese Angaben waren über den Zeitraum gleichmäßig verteilt. Im zweiten Teil des Experiments im Jahr 2017 war jedoch eine Abnahme der Fälle festzustellen. Dies könnte auch an einer gesunkenen Motivation, die Fragen gründlich zu beantworten, liegen. Diese Daten wurden beibehalten, da keine Systematik zu erkennen ist, also eine zufällige Verteilung angenommen wurde. Das persönliche Befinden ist außerdem Teil der Realität, in der eine Feldstudie stattfindet, und sollte daher nicht einfach bei Nichtgefallen ausgeschlossen werden.

Der Gesundheitsfragebogen SF12 ergab im körperlichen Bereich vier Probanden oberhalb des Normbereichs von 50 ± 10 [171] und zwei Probanden unterhalb des Normbereichs. Im psychologischen Bereich lag ein Proband darüber und 23 Probanden besaßen Werte unterhalb des Normbereichs. Auch hier war dies wahrscheinlich durch ein hohes Stresslevel der Studierenden zu erklären.

5.3.2 Beschreibung der statistischen Methode linear gemischte Modelle

Grundsätzlich könnte auch hier die Methode aus den Laborversuchen verwendet werden. Der Datensatz ist jedoch nicht vollständig. Aufgrund der langfristigen Untersuchung und individueller Umstände wie Erkältungen oder Problemen bei der Anreise haben Probanden gefehlt oder waren zu spät, sodass der Versuchsteil vor der Vorlesung verpasst wurde. In der klassischen Varianzanalyse werden unvollständige Fälle komplett ausgeschlossen. Dadurch blieben von den 86 Probanden nur 10 für die Analyse übrig, was die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich reduzieren würde.

Daher wird die Methode der linear gemischten Modelle (LMM, auch hierarchische oder Multi-Level-Modelle) angewendet (Literatur: Field (2013) [187]). LMMs eignen sich besser für die Auswertung, weil sie keine vollständigen Daten voraussetzen und einige Annahmen bezüglich Unabhängigkeit der Fehler und Homogenität der Varianzen nicht mehr nötig sind [187]. Die Überprüfung der Voraussetzungen befindet sich im Anhang E1).

Ein linear gemischtes Modell erweitert die klassische ANOVA um die Möglichkeit eine Hierarchie zu betrachten. Hier wird eine Hierarchie aus zwei Leveln verwendet, siehe dazu Abbildung 5.17. Das übergeordnete Level 2 bzw. Subjekt ist der Proband, da sich seine jeweiligen Messwerte ähneln (das heißt die Messwerte sind abhängig vom Probanden). Jedem Probanden werden als Level 1 Variablen die Messwerte zugeordnet (z. B. Konzentrationsleistung KL, KSS, Fragebogen, …).

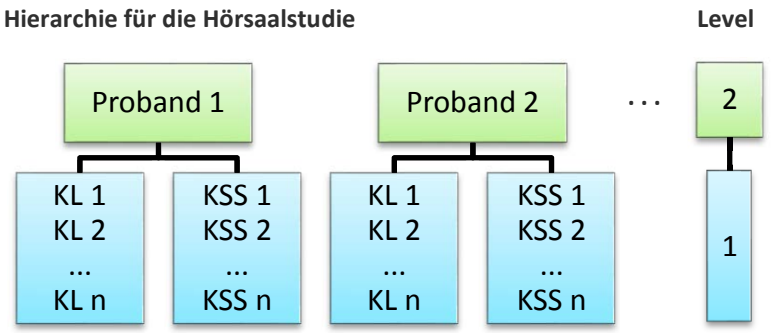


Abbildung 5.17: Hierarchie Beispiel für zwei Probanden und die abhängigen Variablen Konzentrationsleistung KL und Karolinska-Sleepiness-Scale KSS

Weiterhin können die Parameter eines LMMs in *feste* und *zufällige* Effekte eingeteilt werden. Dies lässt sich anhand der linearen Regressionsgleichung $y = a\,x + b$ erklären. Bei *festen* Effekten sind der Anstieg a und der Achsenabschnitt b für alle Probanden konstant. Dies entspricht einer klassischen ANOVA. Ein Beispiel zur besseren Verdeutlichung des Prinzips findet sich in Abbildung 5.18. Es beschreibt die Konzentrationsleistung in Abhängigkeit der Versuchswoche. Bei einem *festen* Effekt lautet die Regressionsgleichung $KL = a\,Woche + b$ und gilt für alle Probanden.

Ein *zufälliger* Effekt des Achsenabschnitts b_i bedeutet, dass jeder Proband i einen eigenen Wert für den Achsenabschnitt b_i erhält. Zusätzlich kann ein *zufälliger* Anstieg a_i für jeden Probanden betrachtet werden. Im Beispiel in Abbildung 5.18 erhalten drei Probanden jeweils ihre eigene Regressionsgerade mit $KL = a_i\,Woche + b_i$. So werden die vom Individuum abhängigen Unterschiede der Level 2 Variable Proband modelliert.

Für jede abhängige Variable wurde ein eigenes LMM schrittweise aufgebaut (empfohlene Vorgehensweise nach [187]). Die unabhängigen Variablen, Kovariablen und zufälligen Effekte wurden nacheinander ins Modell eingefügt. Bei jedem Schritt wurde die Modellgüte -2 Log-Likelihood des Modells betrachtet. Verbesserte sie sich signifikant

gegenüber dem vorherigen Schritt, wurde der hinzugefügte Parameter beibehalten. Signifikanz wurde hier mit der Chi-Quadrat-Verteilung überprüft. Das Ziel war ein Modell, das sowohl eine hohe Modellgüte besitzt (d.h. es enthält alle einflussreichen Parameter) als auch keine unnötig komplexe Struktur aufweist (d.h. möglichst einfach interpretierbar ist).

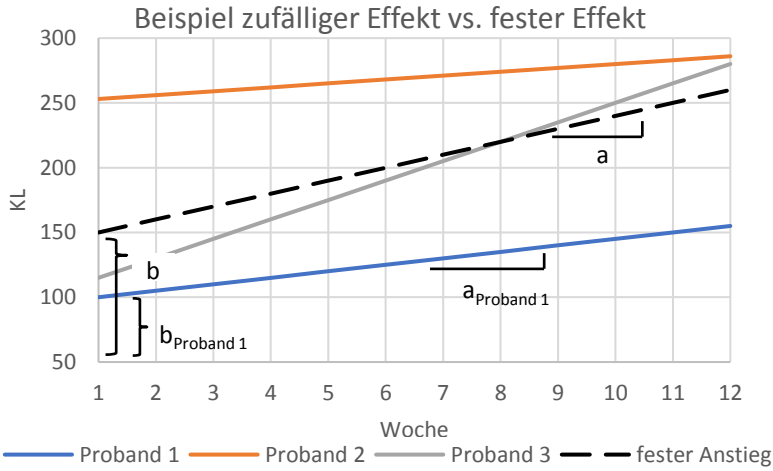


Abbildung 5.18: Beispiel Modell für KL pro Woche: Regressionsgerade (gestrichelt) für ein Modell mit festem Anstieg a und Achsenabschnitt b sowie 3 Regressionsgeraden (durchgezogen) für 3 Probanden für ein Modell mit zufälligen Anstiegen $a_{Proband\ i}$ und Achsenabschnitten $b_{Proband\ i}$

Die unabhängige Variable ist die:

- Lichtszene.

Folgende Kovariablen wurden betrachtet:

- Versuchswoche (1 - 12),
- Tag (Donnerstag vs. Freitag),
- Zeitpunkt (vor bzw. nach der Vorlesung),
- Jahr (2016 vs. 2017),
- Baseline KL (nur für d2R-Test).

Es wurden stets alle Variablen sowie sämtliche 2-Wege Interaktionen zwischen den Variablen untersucht. Das endgültige Modell enthielt zur besseren Übersichtlichkeit nur diejenigen Variablen, die die Modellgüte signifikant beeinflussten, und wird in den jeweiligen Abschnitten der abhängigen Variablen beschrieben.

5.3.3 D2R-Test

Das Ergebnis des d2R-Tests ist die ermittelte Konzentrationsleistung (KL). Die Geschwindigkeit BZO und die Fehlerrate F% führten zu keinen weiteren Erkenntnissen und werden daher nicht berichtet. Zunächst wurde KL graphisch untersucht, um einen Eindruck zu erhalten, was über den Zeitraum des Experiments passiert ist. In Abbildung 5.19 ist die mittlere KL pro Zeitpunkt aufgetragen. Ein Zeitpunkt entspricht einer d2R-Durchführung. Pro Woche bzw. Lichtszene gab es stets vier Zeitpunkte: Donnerstag vor der Vorlesung, Do. nach der Vorlesung, Fr. vor der Vorlesung und Fr. nach der Vorlesung. Die jeweilige Lichtszene ist farbig markiert sowie die Ferien zum Jahreswechsel durch eine Linie.

Als Erstes fällt auf, dass die Werte mit der Zeit zunahmen. Die Annahme, der Lerneffekt wäre nach zwei Übungswochen ausgeglichen, erwies sich somit als falsch. Auch ein Blick in die zweite Hälfte im Jahr 2017 zeigt weiterhin steigende Werte, was angesichts von bis dahin über 20 Durchführungen des monotonen Tests doch überrascht. Ein Effekt des Lichts ist in der Graphik hingegen nicht zu erkennen. Die Lichtszenen bzw. Wochen unterscheiden sich zwar, doch geht dies auf den zeitlichen Anstieg zurück.

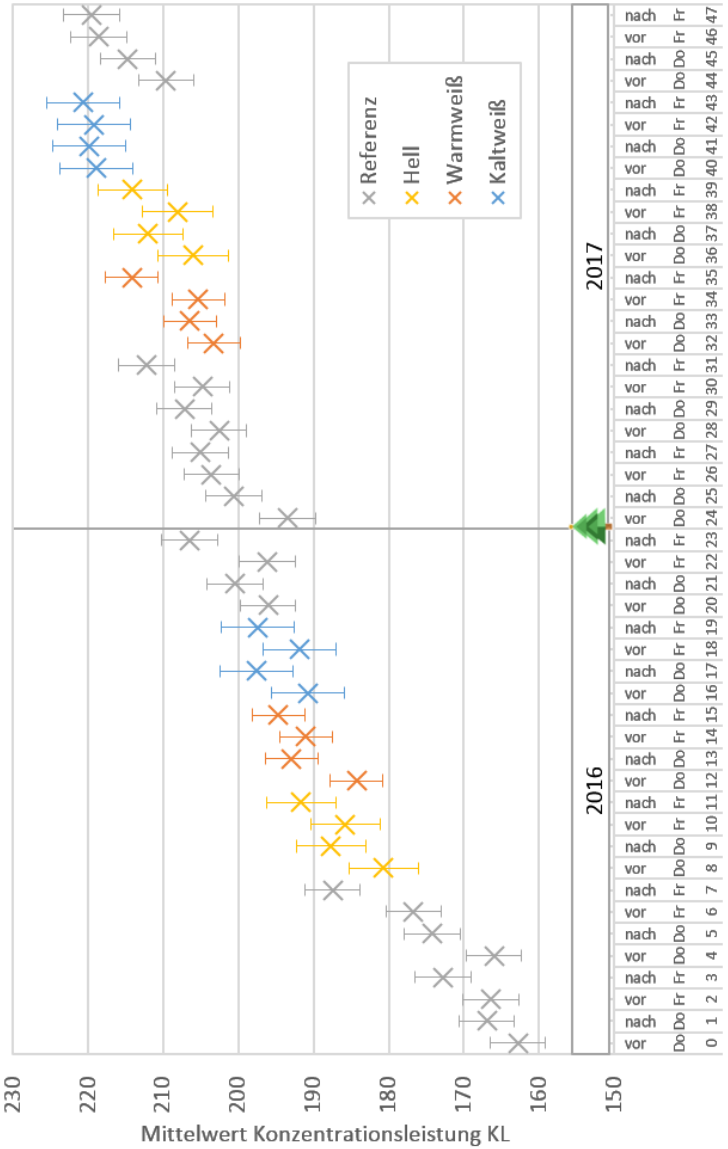


Abbildung 5.19: Mittelwerte der Konzentrationsleistung aller Probanden pro Zeitpunkt. Je vier Zeitpunkte ergeben eine Woche: Do. vor VL, Do. nach VL, Fr. vor VL und Fr. nach VL. Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Innerhalb der Wochen scheint es eine Tendenz der Verbesserung von vor der VL zu nach der VL zu geben. Das häufigste Muster lässt sich folgendermaßen beschreiben: KL verbesserte sich von Do. vor der VL zu Do. nach der VL deutlich. Fr. vor der VL verschlechterte KL sich etwas und verbesserte sich nach der VL zum Maximalwert der Woche. Die nächste Woche begann dann etwas schlechter, wahrscheinlich wegen der fast einwöchigen Pause, und das Muster wiederholte sich. Eine Ausnahme bildeten hier die erste Woche in 2016 und 2017. Diese wurden als Woche für Training und Gewöhnung verwendet und daher nicht betrachtet. Eine weitere Ausnahme bildeten die letzten beiden Wochen im Jahr 2017. Die letzte Woche ist mit Vorsicht zu betrachten, da das baldige Studienende nachlassende Motivation und Sorgfalt bedeuten könnte. Die vorletzte Woche fand unter der kaltweißen Lichtszene statt und KL war hier fast konstant. Der fehlende Anstieg innerhalb der Woche könnte bedeuten, dass die Probanden entweder schon zu Beginn sehr gut waren und sich nicht steigern konnten oder dass die Steigerung aus verschiedenen Gründen ausblieb. Das Licht als Grund ist jedoch eher unwahrscheinlich, da im Jahr 2016 bei der kaltweißen Lichtszene die Anstiege von vor der VL zu nach der VL vorhanden waren.

Die Reihenfolge der warmweißen und hellen Lichtszene wechselte in 2017. Wenn das Licht einen Einfluss auf die KL aufweisen würde, sollte diese Reihenfolgeänderung einen Unterschied im Verlauf von KL zeigen. In Abbildung 5.19 zeigt sich allerdings kein Unterschied. In beiden Fällen waren die Werte der zeitlich späteren Woche höher als in der früheren Woche. Aus der Abbildung 5.19 lässt sich folgendes ableiten: Falls es einen Effekt des Lichts auf die KL gibt, so ist dieser klein. Er wurde hier komplett vom Lerneffekt überlagert.

Für die statistische Analyse wurde ein linear gemischtes Modell (LMM) aufgebaut. Zunächst wurden die zwei Trainingswochen je zu Beginn des Versuchs und nach Neujahr sowie die ausgeschiedenen Probanden herausgefiltert. Die abhängige Variable war die Konzentrationsleistung KL. Die Lichtszene wurde als fester Faktor hinzugefügt. Folgende feste Kovariablen wurden ebenfalls untersucht: Versuchswoche (1 - 12), Tag

(Donnerstag oder Freitag), Testzeitpunkt (vor oder nach der VL) und Baseline-KL (KL Startwert des Probanden). Das Jahr, als Unterscheidung der beiden Versuchshälften, führte zu keiner Verbesserung der Modellgüte, denn dieser Unterschied war bereits durch die Variable Woche abgedeckt. Das Jahr wurde daher nicht betrachtet. Interaktionen zwischen den Variablen wurden untersucht, brachten aber keine Verbesserung der Modellgüte. Es werden daher nur die einfachen Haupteffekte berichtet.

Der Proband wurde als Level 2 Variable hinzugefügt. Der zufällige Achsenabschnitt b_i erlaubte jedem Probanden seinen individuellen Startwert für KL. Der zufällige Anstieg $a_{1,i}$ des Faktors Lichtszene ermöglichte den Probanden eine individuelle Reaktion auf die Beleuchtung und verbesserte die Modellgüte. Zusätzlich wurde ein zufälliger Anstieg $a_{2,i}$ der Kovariable Woche eingefügt. Dieser Schritt verbesserte die Modellgüte wesentlich und ermöglichte jedem Probanden einen individuellen Anstieg $a_{2,i}$ über die Versuchswochen. Abbildung 5.18 verdeutlicht dies anschaulich. Dieser Anstieg entspricht dem Lerneffekt pro Woche. Damit wurde der individuelle Lerneffekt jedes Probanden im Modell berücksichtigt. Die endgültige Modellgleichung lautete:

$$KL = b_i + a_{1,i}Lichtszene + a_{2,i}Woche + a_3Tag + a_4Zeitpunkt + a_5BaselineKL + Fehler$$

Das Ergebnis des Tests der festen Effekte ist in Tabelle 5.28 zusammengefasst. Alle betrachteten Variablen zeigten einen signifikanten Effekt $p < 0{,}05$. Die drei Trends aus der Graphik sind damit statistisch belegt: KL stieg mit jeder Woche an, Probanden erzielten ein besseres KL am Freitag als am Donnerstag (Mittelwertdifferenz = 1,9 ± 0,7) sowie ein besseres KL nach der Vorlesung als vor der Vorlesung (Mittelwertdifferenz = 5,9 ± 0,7). Außerdem zeigte sich, dass der Baseline-KL-Wert des Probanden seine zukünftige Leistung vorhersagte.

Tabelle 5.28: Test auf feste Effekte für KL Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Variable	Zähler-df	Nenner-df	F	p
Lichtszene	3	182,5	3,042	0,030
Woche	1	64,3	103,443	<0,001
Tag	1	1518,7	7,360	0,007
Zeitpunkt	1	1490,4	71,780	<0,001
Baseline-KL	1	57,0	119,495	<0,001

Tabelle 5.29: Geschätzte Randmittel für KL pro Lichtszene

Lichtszene	Mittelwert	Standardabweichung	N
Referenz	198,3	3,078	441
Hell	195,7	3,074	447
Warmweiß	197,9	3,073	446
Kaltweiß	199,6	3,070	453

Tabelle 5.30: Bericht der Signifikanzen der paarweisen Vergleiche (Bonferroni), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Signifikanz p	Referenz	Hell	Warmweiß	Kaltweiß
Referenz	-	0,326	1,000	1,000
Hell	0,326	-	0,576	0,020
Warmweiß	1,000	0,576	-	1,000
Kaltweiß	1,000	0,020	1,000	-

Auch der Faktor Lichtszene wies einen signifikanten Einfluss auf. Der paarweise Vergleich (Bonferroni) zeigt in Tabelle 5.29 und Tabelle 5.30, dass sich die Lichtszenen hell und kaltweiß signifikant unterschieden bei einer Mittelwertdifferenz von 3,8 ± 1,2. Die geschätzten Mittelwerte der anderen beiden Lichtszenen Referenz und warmweiß zeigten keine Signifikanzen und lagen tendenziell nahe der kaltweißen Szene. Ein gutes Modell besitzt einen hohen F-Wert [187]. Der Vergleich der F-Werte zeigt, dass der Effekt der Lichtszene (F = 3,0) jedoch klein gegenüber den anderen Effekten war (z. B. Woche: F = 103,4 oder Zeitpunkt: F = 71,8).

5.3.4 Karolinska-Sleepiness-Skala

Die Auswertung der Karolinska-Sleepiness-Skala (KSS) erfolgte analog zur Auswertung des d2R-Tests. Zunächst zeigt Abbildung 5.20 die gleiche graphische Darstellung für die Mittelwerte der KSS über die Zeit. Die Lichtszenen sind wieder farbig markiert und es gab wieder je vier Zeitpunkte pro Woche: Donnerstag vor der Vorlesung, Do. nach der Vorlesung, Fr. vor der Vorlesung und Fr. nach der Vorlesung.

Im Vergleich zum d2R-Test fällt sofort auf, dass es keinen Anstieg über die Zeit gab. Dies entspricht der Annahme, dass die Müdigkeit der Probanden keine systematische Veränderung über das Semester erfährt. Im Verlauf einer Woche schwankten die Werte. Der dritte Wert, Freitag früh vor der VL, zeigte tendenziell höhere KSS-Werte als die restlichen Wochenwerte. Eine erhöhte Müdigkeit freitags um 8 Uhr im Vergleich zu späteren Uhrzeiten ist bei Studierenden nachvollziehbar. Ausnahmen bildeten hier die ersten zwei Wochen in 2016 und die erste Woche in 2017. Dies könnte an einem unterschiedlichen Tagesrhythmus zu Beginn der Vorlesungszeit im Vergleich zum Alltag während des Semesters liegen.

Die statistische Analyse erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie beim d2R-Test mit der neuen abhängigen Variablen KSS-Wert. Die ersten zwei Trainingswochen zu Experimentbeginn und Neujahr wurden jeweils ausgeschlossen sowie die ausgeschiedenen Probanden. Das linear gemischte Modell (LMM) wurde wieder schrittweise aufgebaut. Die Lichtszene wurde als fester Faktor betrachtet. Die Variablen Tag und Testzeitpunkt wurden als feste Kovariablen hinzugefügt. Die Interaktionen Tag * Testzeitpunkt und Lichtszene * Tag führten zu einer signifikanten Verbesserung der Modellgüte. Folgende Variablen wurden ebenfalls untersucht, lieferten jedoch keine Verbesserung der Modellgüte: Versuchswoche und Jahr. Dies ist sinnvoll, da in der Grafik keine Veränderung über die Wochen beobachtet wurde.

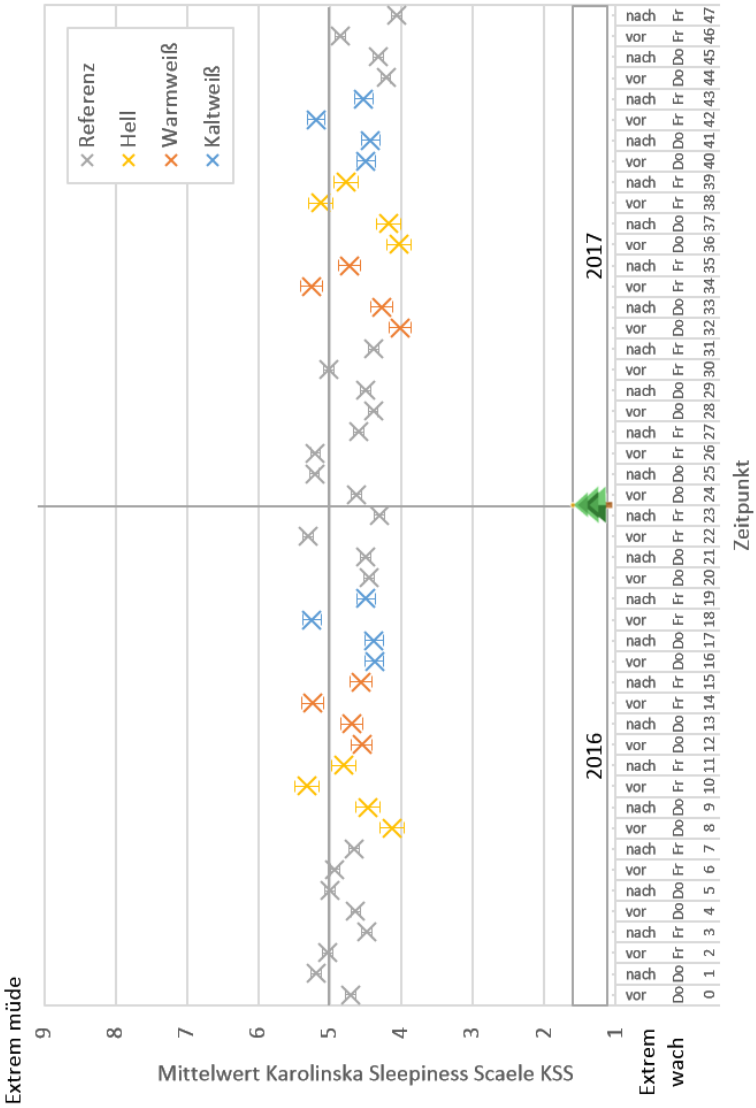


Abbildung 5.20: Mittelwerte der KSS pro Zeitpunkt. Je vier Zeitpunkte ergeben eine Woche: Do. vor VL, Do. nach VL, Fr. vor VL und Fr. nach VL. Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler.

Der Proband wurde als Level 2 Variable mit zufälligem Achsenabschnitt b_i hinzugefügt. Für den Faktor Lichtszene ermöglichte der zufällige Anstieg $a_{1,i}$ den Probanden eine individuelle Reaktion auf die Beleuchtung und verbesserte die Modellgüte. Die endgültige Modellgleichung lautete:

$$KSS = b_i + a_{1,i}Lichtszene + a_2Tag + a_3Zeitpunkt + a_4Tag \times Zeitpunkt + a_5Lichtszene \times Tag + Fehler$$

Das Ergebnis findet sich in Tabelle 5.31. Der Effekt des Tages und die Interaktion Tag * Zeitpunkt waren signifikant (siehe Tabelle 5.33). Paarweise Vergleiche (Bonferroni) zeigten, dass der KSS Mittelwert freitags um 0,6 höher lag als donnerstags. Am Donnerstag stieg der KSS Mittelwert von 4,2 auf 4,4 an und am Freitag sank er von 5,2 auf 4,6. Das heißt, wie in der Grafik beobachtet, wurden die Probanden Donnerstagnachmittag im Verlauf der Vorlesung ein wenig müder, während sie Freitagvormittag zu Beginn deutlich müder waren und dann wacher wurden.

Die Lichtszene selbst war nicht signifikant, jedoch die Interaktion Lichtszene * Tag. Paarweise Vergleiche (Bonferroni) lieferten keine weiteren Signifikanzen, sodass die Interpretation schwierig ist. Die geschätzten Randmittel in Tabelle 5.32 zeigen, dass der Unterschied zwischen Donnerstag und Freitag bei der hellen Lichtszene am größten war. Ein Blick auf den F-Wert von 2,7 zeigt, dass der Effekt deutlich kleiner als die Effekte Tag (F = 114,4) oder Tag x Zeitpunkt (F = 34,6) war.

Tabelle 5.31: Test auf feste Effekte für KSS Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Variable	Zähler-df	Nenner-df	F	p
Lichtszene	3	472,4	1,285	0,279
Tag	1	1592,7	114,396	<0,001
Zeitpunkt	1	1579,6	2,236	0,135
Tag * Zeitpunkt	1	1578,4	34,602	<0,001
Lichtszene * Tag	1	1642,3	2,709	0,044

Tabelle 5.32: Geschätzte Randmittel Lichtszene * Tag

Lichtszene	Donnerstag			Freitag		
	M	SD	N	M	SD	N
Referenz	4,3	0,2	233	4,7	0,2	212
Hell	4,1	0,2	237	5,0	0,2	222
Warmweiß	4,3	0,2	232	5,0	0,2	224
Kaltweiß	4,4	0,2	244	4,9	0,2	218

Tabelle 5.33: Geschätzte Randmittel Tag * Zeitpunkt

Zeitpunkt	Donnerstag			Freitag		
	M	SD	N	M	SD	N
Vorher	4,2	0,2	491	5,2	0,2	444
Nachher	4,4	0,2	451	4,6	0,2	431
Gesamt	4,3	0,1	942	4,9	0,1	875

5.3.5 Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden

Der Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden enthielt sieben Items auf einer 7-stufigen Likert-Skala: wohl, konzentriert, gelangweilt, gestresst, ruhig, motiviert und munter. Die resultierenden Mittelwerte pro Item und Lichtszene sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Unterschiede zwischen den Lichtszenen sind dort nicht zu erkennen. Die durchschnittliche Bewertung der Items lag bei der mittleren Kategorie 4. Wohl und ruhig lagen eine halbe Kategorie darüber und gestresst eine halbe Kategorie darunter. Die statistische Analyse ergab keine signifikanten Effekte der Beleuchtung und kann im Anhang E2) nachgelesen werden.

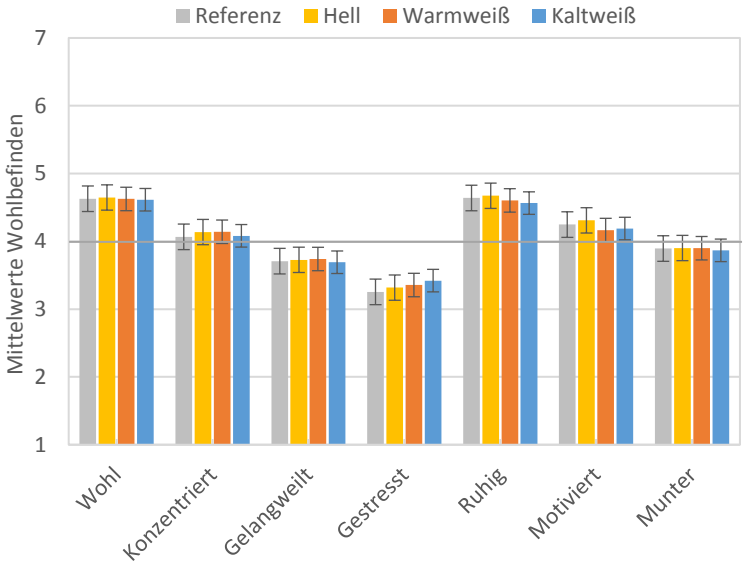


Abbildung 5.21: Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden, Fehlerbalken = Standardfehler

5.3.6 Fragebogen zur Akzeptanz der Beleuchtung

Im Beleuchtungsfragebogen nach der Vorlesung sollten die Probanden die Beleuchtung anhand von fünf Items auf einer Likert-Skala bewerten: Beleuchtung allgemein, Helligkeit, Lichtfarbe, Blendung und Lesbarkeit der Vorlesung. In Abbildung 5.22 sind die mittlere Bewertung der Probanden pro Item und Lichtszene dargestellt. Statistisch signifikante Unterschiede sind markiert. Die Analyse kann im Anhang E3) eingesehen werden.

Die kaltweiße Lichtszene wurde in Bezug auf die allgemeine Beleuchtung im Vergleich zu den anderen Lichtszenen (Differenz von 0,6 bis 0,9 Skalenkategorien) signifikant schlechter empfunden. Negative mündliche Äußerungen einiger Probanden nach dem Einschalten dieser Lichtszene ergänzten dieses Resultat. Auch in der Bewertung der

Lichtfarbe unterschied sich die kaltweiße Lichtszene signifikant, sie wurde als zu kalt empfunden.

Die helle Lichtszene und überraschenderweise auch die kaltweiße Szene wurden signifikant heller empfunden als die Referenz- und die warmweiße Szene. Zur Erinnerung: E_v war mit 400 lx bei der hellen Szene doppelt so groß wie E_v aller anderen Szenen mit 200 lx – das galt auch für die kaltweiße Lichtszene. Daraus resultierend ergab sich für die helle und kaltweiße Lichtszene eine signifikant stärkere Blendung als für die anderen beiden Szenen. Die Zunahme der Blendung entsprach jedoch maximal einer halben Skalenkategorie. Ebenso war die Lesbarkeit der Folien für die helle und kaltweiße Lichtszene signifikant schlechter als bei der warmweißen und Referenzlichtszene. Auch hier betrug der maximale Mittelwertunterschied weniger als eine halbe Skalenkategorie.

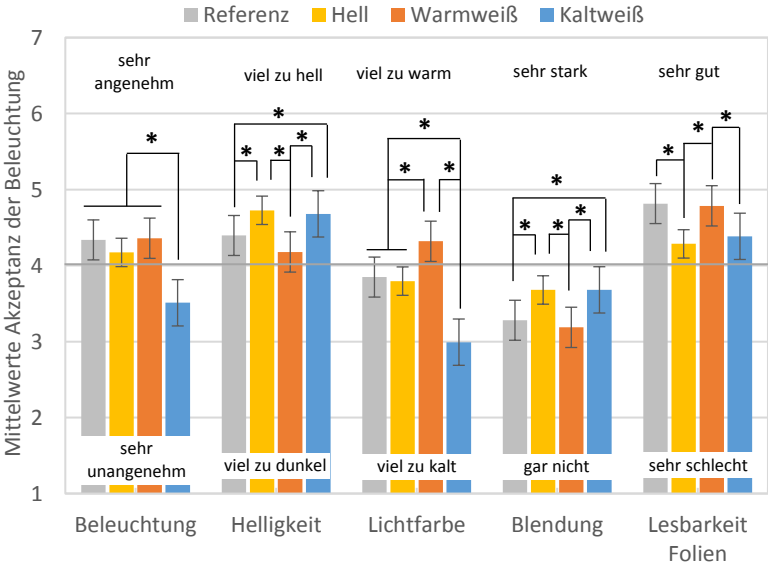


Abbildung 5.22: Akzeptanz der Beleuchtung, Fehlerbalken = Standardfehler. Signifikante Effekte p < 0,05 sind mit * markiert.

Die warmweiße Lichtszene unterschied sich nur in der Bewertung der Lichtfarbe signifikant von der Referenzszene. Sie wurde als etwas wärmer empfunden, aber befand sich noch in der mittleren Kategorie.

5.3.7 Weitere Ergebnisse

Im diesem Abschnitt werden sowohl Einflüsse weiterer Kovariablen als auch Beeinflussungen der abhängigen Variablen untereinander untersucht. Dabei wurde explorativ vorgegangen. Das heißt, es wurden keine vorab hergeleiteten Hypothesen überprüft, sondern viele Kombinationen von Variablen getestet und auffällige Befunde genauer analysiert. Dabei ist die Gefahr des „p-value fishings“ zu beachten: Werden sehr viele Variablen untersucht, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit falsch-positiver Effekte (Test ergibt Signifikanz, obwohl in der Realität kein Effekt vorhanden ist) zu finden. Gefundene signifikante Einzelfälle wurden daher nur äußerst vorsichtig interpretiert. Trat ein signifikanter Einfluss dagegen häufiger auf, ist zu vermuten, dass es sich um tatsächliche Effekte handelt. Anhand der Ergebnisse können dann neue Hypothesen generiert werden oder ein Ausblick in zukünftige Forschungsaspekte gegeben werden.

Die Schwierigkeit der Vorlesung war ursprünglich als Kovariable geplant. In einem eigenen linear gemischten Modell (Lichtszene fester Faktor und Proband zufälliger Achsenabschnitt) zeigte sich jedoch, dass die Referenzlichtszene ($M = 3{,}7 \pm 0{,}1$) signifikant ($F(3; 824{,}1) = 16{,}581$, $p < 0{,}001$) leichter empfunden wurde als andere Szenen ($M = 4{,}1–4{,}4 \pm 0{,}1$). Obwohl der Tag als Kovariable selbst nicht signifikant war ($p > 0{,}05$), war die Interaktion Lichtszene * Tag signifikant ($F(3; 823{,}5) = 4{,}278$, $p = 0{,}005$). Paarweise Vergleiche zeigen, dass bei der hellen Lichtszene am Freitag die Vorlesung besonders schwer war ($M = 4{,}6 \pm 0{,}1$). Ein Blick in die zeitliche Abfolge zeigt, dass die Referenz-Lichtszene stets zuletzt kam: die letzte Vorlesung vor Weihnachten und die letzte Vorlesung im Semester. Dann waren eventuell tatsächlich leichtere Themen (z. B. Wiederholung oder Klausurvorbereitung) Vorlesungsgegenstand. Die Schwierigkeit der Vorlesung wird für diesen

Abschnitt sowohl als eigene abhängige Variable als auch als Kovariable betrachtet.

Teil 1: Beeinflussen sich die abhängigen Variablen gegenseitig?

Der Einfluss anderer abhängiger Variablen auf die KL und die KSS wurde untersucht, indem die linear gemischten Modelle aus den Abschnitten 5.3.3 und 5.3.4 um weitere abhängige Variablen ergänzt wurden. Alle betrachteten Variablen und etwaige Signifikanzen sind in Tabelle 5.34 zusammengefasst. Die Richtung der Abhängigkeiten wurde anhand von Grafiken analysiert. KL und KSS beeinflussten sich nicht gegenseitig und wurden beide nicht von der Bewertung Beleuchtung beeinflusst, auch nicht von der in Abschnitt 5.3.6 erwähnten Blendung. Probanden, die den d2R-Test als sehr anstrengend empfanden, erzielten eine geringere KL (siehe Abbildung 5.23). Sehr konzentrierte Probanden (ab Skalenstufe 6) erzielten eine bessere KL und je gelangweilter die Probanden waren desto schlechter schnitten sie bei KL ab (beide Grafiken im Anhang E4).

Tabelle 5.34: Bericht von signifikanten Einflüssen (sign.) der abhängigen Variablen im KL- und KSS-Modell sowie maximale Mittelwertdifferenzen Δ_{max}

Abhängige Variable	Im KL-Modell	Im KSS-Modell
KL bzw. KSS	-	-
Wohlfühlen	-	sign., $\Delta_{max} = -3{,}2$
Konzentration	sign., $\Delta_{max} = 20{,}4$	sign., $\Delta_{max} = -2{,}8$
Langeweile	sign., $\Delta_{max} = 40{,}5$	sign., $\Delta_{max} = 2{,}4$
Stress	-	-
Ruhe	-	-
Motivation	-	-
Munterkeit	-	sign., $\Delta_{max} = -4{,}6$
Anstrengung des d2R-Tests	sign., $\Delta_{max} = -31{,}3$	sign., $\Delta_{max} = 1{,}7$
Beleuchtung	-	-
Helligkeit	-	-
Lichtfarbe	-	-
Blendung	-	-
Lesbarkeit der Folien	-	-
Schwierigkeit der Vorlesung	-	-

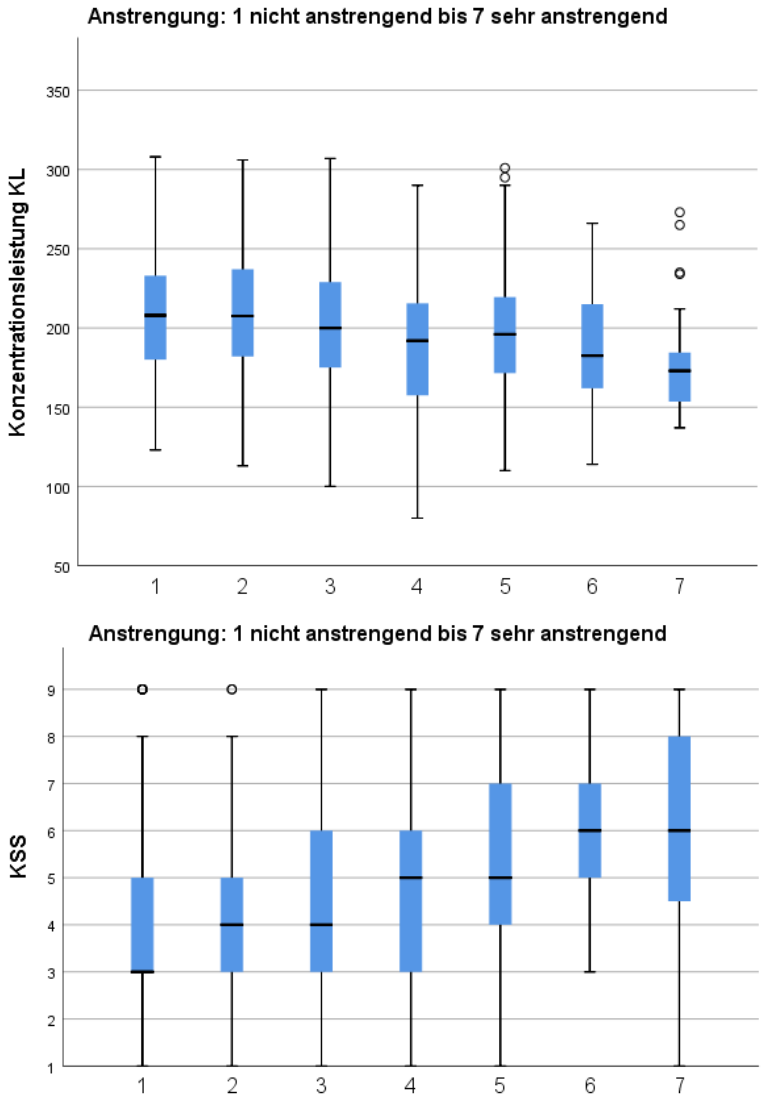


Abbildung 5.23: Konzentrationsleistung KL (oben) und KSS (unten) vs. empfundene Anstrengung beim d2R-Test

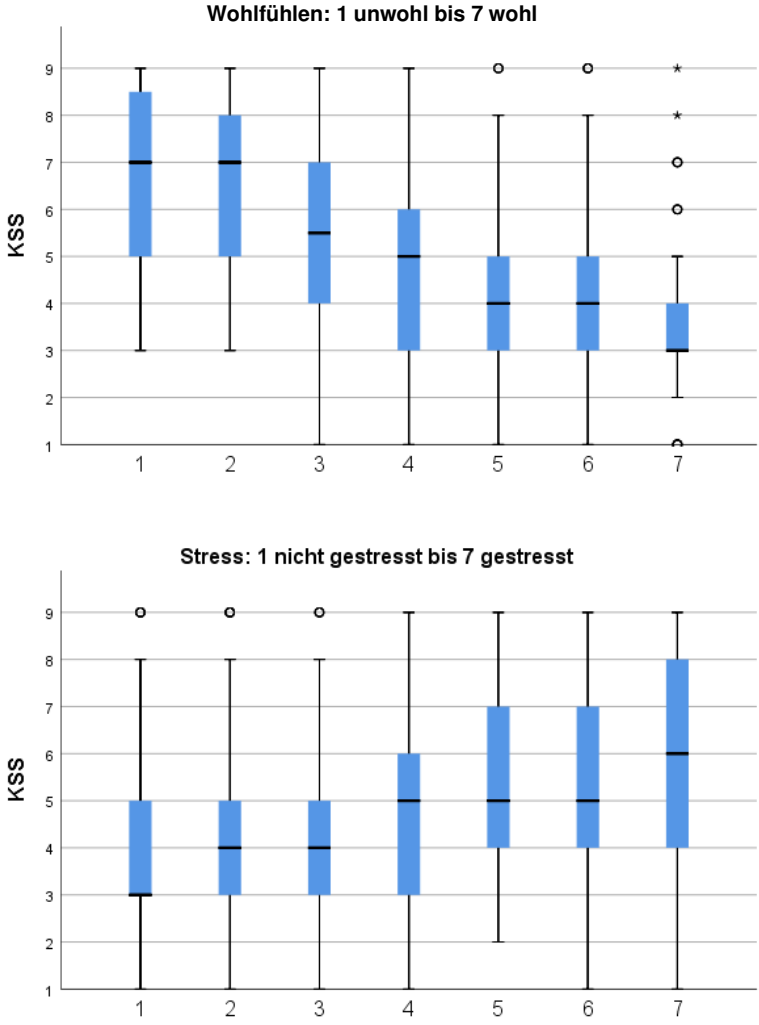


Abbildung 5.24: KSS vs. Wohlfühlen (oben) und KSS vs. Stress (unten)

Für die KSS fand sich folgender Trend: Probanden waren wacher je wohler, konzentrierter und munterer sie sich fühlten. Der gleiche Trend zeigte sich für die Motivation (maximale Mittelwertdifferenz $\Delta_{max} = -3{,}1$), auch wenn er nicht signifikant war. Als Beispiel ist die KSS

vs. Wohlfühlen in Abbildung 5.24 dargestellt. Die restlichen Grafiken finden sich in Anhang E4). Eine gegensätzliche Abhängigkeit der KSS bestand folgendermaßen: Probanden waren müder je anstrengender sie den d2R-Test empfanden (Abbildung 5.23), je gelangweilter sie waren (Anhang E4), Ausnahme bei Stufe 7) und je gestresster sie sich fühlten (maximale Mittelwertdifferenz Δ_{max} = 1,8, nicht signifikant, Abbildung 5.24).

Teil 2: Einfluss durch Kovariablen

Folgende Kovariablen der Versuchsperson wurden untersucht:

- Alter ($M = 20{,}2 \pm 2{,}4$ Jahre, Einschränkung 18 bis 30 Jahre)
- Geschlecht (59 männlich und 8 weiblich)
- DMEQ (Chronotyp Score, $M = 47{,}7 \pm 8{,}2$ Neutraltyp)
- PSS (Perceived Stress Scale, $M = 19{,}1 \pm 4{,}6$)
- Koffein (ja $M = 26\,\%$ / nein $M = 74\,\%$)
- Nahrung (Frühstück bzw. Mittagessen, ja $M = 64\,\%$ / nein $M = 36\,\%$)
- Krankheit (z. B. Erkältung, Schmerzen, 136 x ja / 1795 x nein)
- Schlafprobleme/-defizite (88 x ja / 1843 x nein)
- Seelische Probleme (z. B. Stress, 48 x ja / 1883 x nein)
- Hunger (34 x ja / 1897 x nein)
- Lichthistorie (Aufenthalt im Freien in h, $M = 0{,}5 \pm 1{,}4$ h)
- Schwierigkeit der Vorlesung (1 sehr einfach – 7 sehr schwierig, $M = 4{,}3 \pm 1{,}3$)

Diese Kovariablen wurden in die linear gemischten Modelle der abhängigen Variablen aus den Abschnitten 5.3.3 bis 5.3.6 integriert. Alle

gefundenen signifikanten Effekte sind in Tabelle 5.35 zusammengefasst. Post-hoc Analysen wurden durch paarweise Vergleiche mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt.

Tabelle 5.35: Einfluss von Kovariablen, * = signifikant mit p < 0,05, ** = Licht x Krankheit signifikant mit p < 0,05

Abhängige Variable	Kovariablen					
	Geschlecht	Koffein	Nahrung	Schlaf-probleme	Seelische Probleme	Krankheit
KL		*	*			
Anstrengung						*
KSS				*		*
Wohlfühlen				*	*	*, **
Konzentration			*			*
Langeweile		*	*			
Stress				*	*	*, **
Ruhe					*	*
Motivation					*	*
Munterkeit		*	*	*		*
Lichtfarbe	*					

Folgende Kovariablen hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse: Alter, DMEQ, PSS, Hunger, Lichthistorie und Schwierigkeit der Vorlesung. Dabei ist zu bemerken, dass das Alter auf eine junge Teilnehmergruppe von 18 bis 30 Jahren beschränkt war und der DMEQ und die PSS nur einmalig zu Versuchsbeginn abgefragt wurden. Die restlichen Kovariablen wurden täglich abgefragt und geben demnach einen aktuelleren Zustand der Probanden wieder. Kein signifikanter Einfluss durch Kovariablen zeigte sich für die abhängigen Variablen Bewertung der Beleuchtung, Helligkeit, Blendung und Lesbarkeit der Folien. Einzig für die Lichtfarbe ergab sich ein signifikanter Effekt des Geschlechts. Frauen bewerteten die Lichtfarbe mit durchschnittlich 3,3

etwas schlechter als Männer mit 3,7. Bei 8 Frauen im Vergleich zu 59 Männern ist dieses Ergebnis jedoch wenig aussagekräftig.

Eine Erkrankung des Probanden beeinflusste alle Wohlbefinden Items negativ (außer Langeweile). Diese Probanden waren außerdem müder und strengten sich beim d2R-Test mehr an. Eine Übersicht der Mittelwerte für Gesunde und Kranke findet sich in Abbildung 5.25. Schlafprobleme und seelische Probleme zeigten die gleiche Tendenz wie Krankheit. Signifikanz trat jedoch seltener auf, was an der geringeren Anzahl dieser Probleme liegen kann.

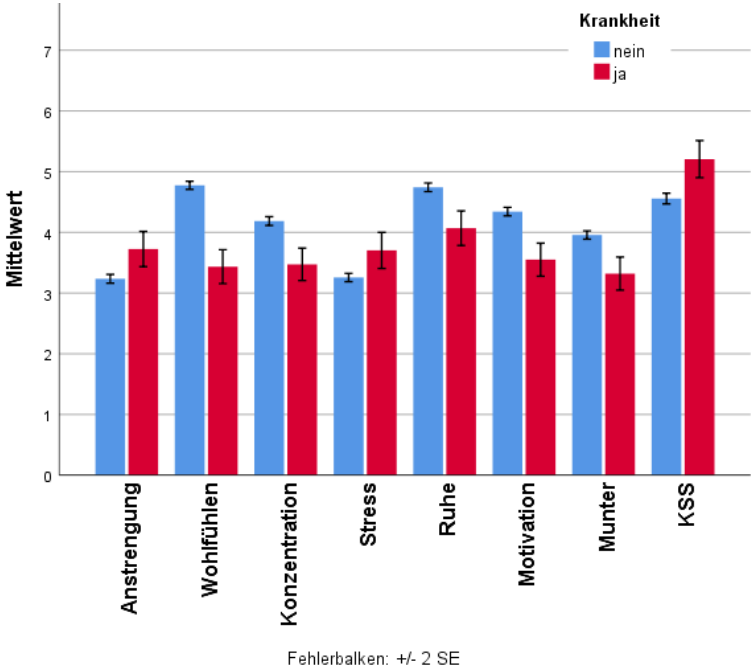


Abbildung 5.25: Einfluss von Krankheit auf abhängige Variablen

Der Einfluss von Krankheit wird nun detaillierter betrachtet, denn die Interaktion von Krankheit x Lichtszene war für die Items Wohlfühlen und Stress signifikant. Abbildung 5.26 verdeutlicht die Unterschiede grafisch.

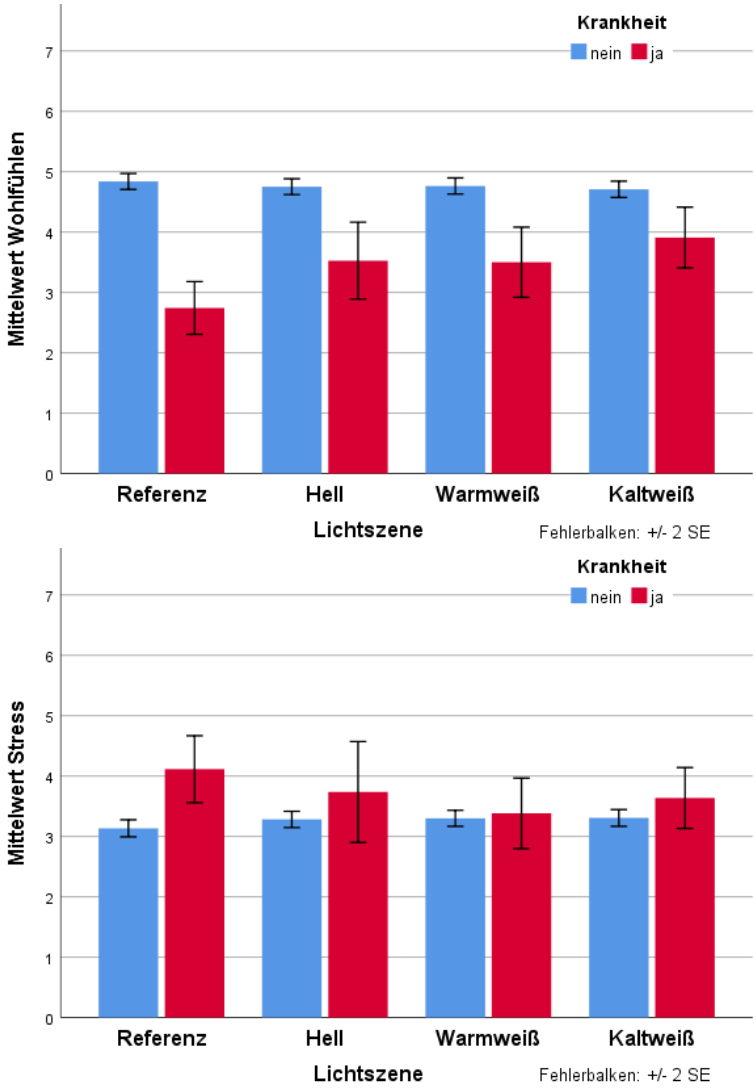


Abbildung 5.26: Einfluss von Krankheit auf Wohlfühlen (oben) und Stress (unten) pro Lichtszene

Kranke Probanden fühlten sich unwohler als gesunde Probanden. Für die Referenz-Lichtszene war dieser Unterschied besonders stark ausgeprägt.

Kranke bei Referenzlicht fühlten sich um 0,5 bis 1,0 Stufen schlechter als bei anderen Lichtszenen. Außerdem fühlten sich kranke Probanden bei den Lichtszenen Referenz und Hell gestresster als zu anderen Lichtszenen und als Gesunde. Für die anderen beiden Lichtszenen war das Stressgefühl für Gesunde und Kranke ähnlich. Die Referenzlichtszene wurde jeweils zu Ende des Versuchsabschnitts gezeigt und zu diesen Zeiträumen sind häufig Prüfungsphasen, was ebenfalls Einfluss gehabt haben könnte.

Die Konzentrationsleistung KL, Langeweile und Munterkeit wurden signifikant von Koffein- und Nahrungszufuhr beeinflusst. Subjektive Konzentration wurde ebenfalls signifikant von der Nahrungszufuhr beeinflusst. Als Auswahl wird nun KL detaillierter analysiert: Probanden, die vor oder während der VL Koffein zu sich nahmen, erzielten eine durchschnittliche KL von 205,5 ± 34,9. Im Gegensatz dazu erreichten Probanden ohne Koffeinkonsum eine durchschnittliche KL von 197,7 ± 41,4. Für die Nahrungszufuhr gilt: der KL-Mittelwert ohne Nahrung von 195,0 ± 38,4 stieg mit Nahrung auf 202,2 ± 40,8. Dies entspricht Mittelwertdifferenzen von 8 im Falle des Koffeins und 7 im Falle von Nahrung.

Im Vergleich dazu betrug die KL-Mittelwertdifferenz bei Krankheit – 10 (Gesunde: 200,2 ± 39,6 und Kranke: 190,7 ± 45,5), obwohl keine Signifikanz vorlag. Wie oben beschrieben strengten sich kranke Probanden mehr an. Im ersten Teil dieses Abschnitts wurde gezeigt, dass bei hoher Anstrengung KL sank (Mittelwertdifferenz max. 30). Demnach ist es logisch, dass auch KL bei Krankheit sank. Die fehlende Signifikanz könnte an der großen Streuung liegen. Die Mittelwertdifferenzen von Krankheit, Koffeinkonsum und Nahrungszufuhr lagen in derselben Größenordnung wie die maximale Mittelwertdifferenz der Lichtszene von 9 aus Abschnitt 5.3.3.

5.3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die Konzentrationsleistung KL des d2R-Tests trat ein starker Lerneffekt über das komplette Semester auf. KL war nach der Vorlesung

besser als vor der Vorlesung und Freitagvormittag besser als Donnerstagnachmittag. Letzteres könnte möglicherweise die Hypothese einer Tageszeitabhängigkeit bestätigen oder ebenfalls durch einen anhaltenden Übungseffekt hervorgerufen worden sein, da die Reihenfolge stets gleich war. Ein hoher Baseline-KL-Wert führte zu einer höheren zukünftigen Leistung.

Dank einem linear gemischten Modell, welches den Lerneffekt einbezieht, fand sich für die Lichtszene ein signifikanter Effekt. Ein Vergleich der F-Werte zeigt, dass der Effekt jedoch sehr klein gegenüber dem Lerneffekt war. Die post-hoc-Analyse ist schwer zu interpretieren, da nur ein signifikanter Unterschied zwischen heller und kaltweißer Lichtszene bestand. Die Hypothesen des Effekts von vertikaler Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe (200 lx vs. 400 lx bei 4000 K) und spektraler Verteilung (2300 K vs. 4000 K vs. 9000 K) auf die Konzentrationsleistung können nicht bestätigt werden. Es war zwar ein kleiner Effekt der Lichtszene vorhanden, dieser lässt sich jedoch nicht in Beleuchtungsstärken und Spektren aufschlüsseln.

Die Karolinska-Sleepiness-Scale KSS zeigte eine deutliche Abhängigkeit von der Zeit: Probanden wurden Donnerstagnachmittag im Verlauf der Vorlesung ein wenig müder, während sie Freitagvormittag zu Beginn deutlich müder waren und dann wacher wurden. Die Hypothese zum Einfluss der Tageszeit auf die KSS wird somit bestätigt. Die Beleuchtung hatte keinen Einfluss. Es wurde eine Interaktion Lichtszene * Tag gefunden mit jedoch kleinem F-Wert im Vergleich zur Zeitabhängigkeit. Post-hoc-Analysen lieferten kein Ergebnis und keine Interpretation.

Beleuchtung und Tageszeit hatten keinen Einfluss auf die subjektive Aufmerksamkeit und das Wohlbefinden.

Insgesamt schwankten die Bewertungen der Beleuchtung um den Mittelwert. Das heißt, die Beleuchtung wurde mittelmäßig angenehm empfunden und es war weder zu hell / zu dunkel noch zu kalt / zu warm. Weiterhin wurde eine leicht störende Blendung wahrgenommen und die

Vorlesungsfolien waren mittelmäßig bis gut zu lesen. Kaltweiße Beleuchtung schnitt deutlich schlechter ab als die anderen Lichtszenen, sie wurde weniger angenehm und zu kalt bewertet. Sowohl die helle als auch die kaltweiße Lichtszene wurden heller bewertet, blendeten stärker und boten eine schlechtere Lesbarkeit der Folien als die warmweiße und Referenzlichtszene. Die warmweiße Lichtszene wurde, mit der Ausnahme, dass sie etwas in Richtung zu warm tendierte, stets gleich der Referenzbeleuchtung bewertet. Die Hypothese, dass hohe Farbtemperaturen schlechter akzeptiert werden, wird bestätigt.

Eine Analyse des Einflusses der abhängigen Variablen untereinander zeigte keinen Zusammenhang zwischen KL und KSS. Außerdem bestand für KL und KSS keine Abhängigkeit von der Bewertung der Lichtszene inklusive Blendung. KL besaß einen positiven Zusammenhang mit Konzentration und einen negativen Zusammenhang mit Anstrengung beim d2R-Test und Langeweile. Probanden bewerteten sich wacher auf der KSS je wohler, konzentrierter, munterer und motivierter sie sich fühlen. Im Gegensatz dazu fühlten sie sich müder je anstrengender sie den d2R-Test empfanden sowie je gelangweilter und je gestresster sie waren. Dies sind explorative Beobachtungen, die keine kausalen Zusammenhänge zeigen können und sollen.

Auch der Einfluss von Kovariablen wurde explorativ analysiert. Kovariablen besaßen keinen Einfluss auf die Bewertung der Beleuchtung. Der Effekt des Geschlechts bei der Bewertung der Lichtfarbe wurde als nicht aussagekräftig eingeschätzt, da die Gruppengröße der Frauen zu niedrig war. Probanden fühlten sich schlechter, wenn sie krank waren oder Schlaf- oder seelische Probleme hatten. Kranke Probanden waren außerdem müder bei der KSS. Der Einfluss von Krankheit auf die Konzentrationsleistung KL beim d2R-Test war nicht signifikant, jedoch indirekt belegbar, da KL bei hoher Anstrengung sank und kranke Probanden sich stärker anstrengten. KL wurde außerdem durch Einnahme von Koffein und Mahlzeiten beeinflusst. Der Effekt war vergleichbar mit dem Einfluss der Beleuchtung und eher klein (z. B. war der Einfluss von Anstrengung ca. dreimal größer).

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

6.1 Diskussion der Hypothesen

Anhand der Ergebnisse der drei durchgeführten Probandenstudien werden die Hypothesen aus Kapitel 4.1 bestätigt oder abgelehnt. Dies ist übersichtlich in Abbildung 6.1 zusammengefasst. Es folgen die Einordnung in bestehende Literatur und Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen.

Hypothese 1	**Bestätigt?**
Eine stark erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe bewirkt eine akute Steigerung der Aufmerksamkeit tagsüber im Vergleich zu einer Standardbeleuchtungsstärke.	Für KL und BZO des d2R-Tests

In der Laborstudie 1 wurden 200 lx mit 1 000 lx vertikal auf Augenhöhe verglichen. Die Konzentrationsleistung KL und die Geschwindigkeit BZO im d2R-Test waren unter 1 000 lx signifikant höher als unter 200 lx. Für die Fehlerprozente im d2R-Test galt dies nur bei 2 200 K und nicht bei 12 000 K. Unter 12 000 K verschlechterte sich die Reaktionszeit im Go-NoGo-Test von 200 lx auf 1 000 lx. Der Tablet-Test und die Karolinska-Sleepiness-Scale (KSS) zeigten keine signifikanten Effekte. Die Hypothese wird daher nur für den d2R-Test bestätigt.

Aktuelle Literatur zeigt ein ähnliches Bild. Die Reviews von Souman et al. (2018) [32] und Lok et al. (2018) [62] beschreiben überwiegend positive Effekte von erhöhter Beleuchtungsstärke auf die Aufmerksamkeit. Jedoch wurden in beiden Reviews und in weiteren Studien (u. a. Smolders und de Kort (2014) [86], siehe auch Abschnitt 2.3.2) weiterhin von ausbleibenden oder negativen Effekten berichtet. Die Ergebnisse der Laborstudie 1 waren ebenfalls gemischt, denn nicht alle Tests detektierten eine aufmerksamkeitsfördernde Wirkung von stark erhöhter vertikaler Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe. Eine Abhängigkeit des gefundenen Effekts von der Testmethode wurde auch

in Huiberts et al. (2016) [27] berichtet. Mögliche Erklärungen könnten die unterschiedliche Schwierigkeit bzw. Komplexität bezüglich beanspruchter kognitiver Funktionen der Tests sein. Hier ist ein besseres Verständnis erforderlich, wann bei welchen Aufgaben eine positive Wirkung von erhöhter Beleuchtungsstärke zu erwarten ist.

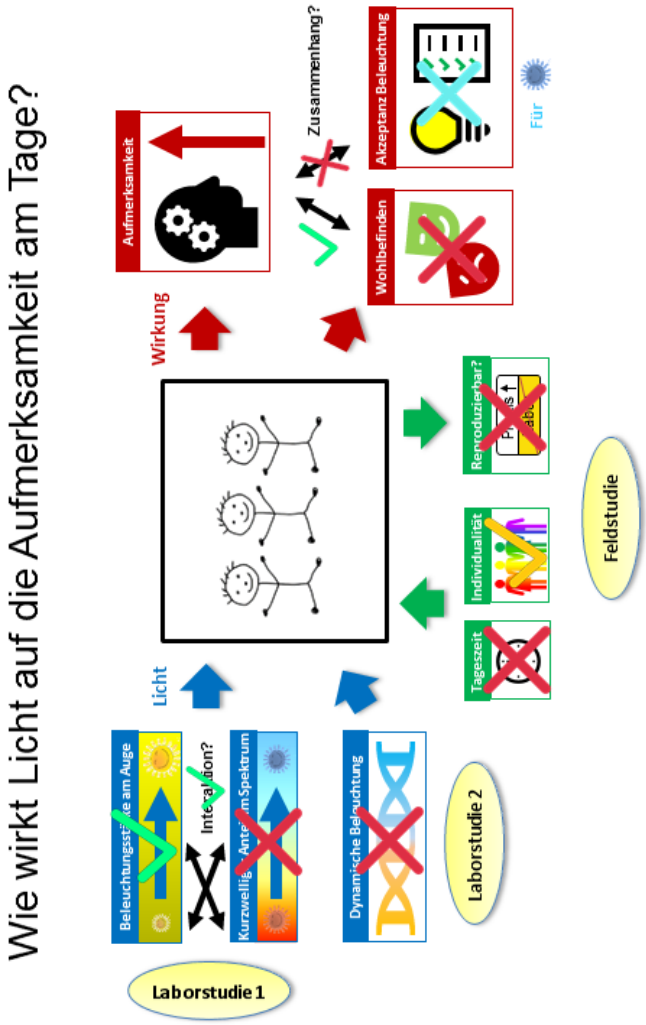


Abbildung 6.1: Übersicht der Überprüfung der Hypothesen

Hypothese 2	**Bestätigt?**
Eine spektrale Verteilung des Lichts mit stark erhöhtem kurzwelligem Anteil bewirkt eine akute Steigerung der Aufmerksamkeit tagsüber.	Nein

Weiterhin wurde in Laborstudie 1 eine Beleuchtung mit niedrigem kurzwelligem Anteil (2 200 K, a_{mel} = 0,3) mit einer Beleuchtung mit stark erhöhtem kurzwelligem Anteil (12 000 K, a_{mel} = 1,5) verglichen. Signifikante Haupteffekte der spektralen Verteilung traten in keinem Test auf. Lediglich Interaktionen mit der Beleuchtungsstärke traten bei den Fehlerprozenten im d2R-Test und bei der Reaktionszeit des Go-NoGo-Tests auf. Beim Go-NoGo-Test bewirkten 12 000 K eine Verbesserung der Reaktionszeit unter 200 lx und eine Verschlechterung unter 1 000 lx. Unter 1 000 lx verschlechterten sich ebenfalls die Fehlerprozente im d2R-Test. Die Hypothese wird daher abgelehnt.

Im Review von Souman et al. (2018) [32] überwiegen Studien mit keinen oder negativen Effekten von veränderter spektraler Verteilung auf die Aufmerksamkeit und die positiven Effekte wurden allesamt nachts gefunden. Das Cochrane Review [66] schließt anhand von drei Feldstudien an realen Arbeitsplätzen tagsüber auf einen möglichen positiven Einfluss von hohen Farbtemperaturen auf die Aufmerksamkeit, allerdings mit der Bewertung von Evidenz niedriger Qualität. Im Gegensatz dazu steht eine ähnliche Feldstudie von Smolders und Kort (2017) [104] mit keinem Effekt von erhöhter Farbtemperatur. Zusammen mit den Ergebnissen dieser Arbeit könnte das ein Hinweis darauf sein, dass möglicherweise für die Aufmerksamkeit tagsüber die spektrale Empfindlichkeit der ipRGCs eine kleinere Rolle spielt als bisher angenommen und lediglich erhöhte Beleuchtungsstärken von Bedeutung sind.

Hypothese 3	**Bestätigt?**
1. Bezüglich der Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit existiert eine Interaktion zwischen der Beleuchtungsstärke und der spektralen Verteilung des Lichts. 2. Die Interaktion tritt als Sättigung auf: Bei hohen Beleuchtungsstärken hat ein erhöhter kurzwelliger Anteil keinen Effekt auf die Aufmerksamkeit.	1. Für F% des d2R- und RT des Go-NoGo-Tests 2. Nein, da es einen negativen Effekt gab.

Wie schon bei den Hypothesen 1 und 2 berichtet, fand sich in Laborstudie 1 ein signifikanter Interaktionseffekt für die Reaktionszeit des Go-NoGo-Tests und die Fehlerprozente des d2R-Tests. Dies bestätigt den ersten Teil der Hypothese. In beiden Tests führte 12 000 K im Vergleich zu 2 200 K zu schlechteren Ergebnissen bei 1 000 lx. Bei 200 lx war es umgekehrt. Der zweite Teil der Hypothese bestätigt sich nicht, da ein negativer Effekt auftrat.

Folgende Studie zeigt ein ähnliches Resultat: In Wahnschaffe et al. (2013) [92] fand sich für die Kombination hohe E (500 lx) *und* hohe CCT (6 000 K) kein positiver Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit (Visual Analogue Scale), obwohl eine hohe E *oder* eine hohe CCT die subjektive Aufmerksamkeit verbesserten. Diese Studie wurde jedoch nachts durchgeführt und untersuchte nur den Unterschied gegenüber einer dunklen Referenzbeleuchtung (< 10 lx). Es wurden stets mehrere Parameter der fünf Beleuchtungen variiert: vier verschiedene CCTs, zwei verschiedene Beleuchtungsstärken, zwei Lichtquellenarten (Leuchtstofflampen vs. Metall-Halogen) und zwei Positionen (Decke und Wand).

In Laborstudie 1 wurden dagegen erstmals Beleuchtungsstärke und CCT bei ansonsten konstanten Bedingungen systematisch variiert und die Auswirkungen auf subjektive und kognitive Aufmerksamkeit tagsüber untersucht. Die Richtung des gefundenen Interaktionseffekts lässt vermuten, dass sich eine hohe Beleuchtungsstärke bei gleichzeitig hohem kurzwelligem Anteil in der spektralen Verteilung nachteilig auf die Aufmerksamkeit auswirken könnte. Dies deutet auf bisher

unbekannte Wirkmechanismen abseits der ipRGCs hin und sollte in zukünftigen Studien auf Reproduzierbarkeit und mögliche Ursachen untersucht werden.

Hypothese 4	**Bestätigt?**
Die Ergebnisse aus der Laborstudie zu 1. und 2. bestätigen sich in einer Feldstudie, Anwendungsgebiet Vorlesung in einem Hörsaal.	Nein

In der Hörsaalstudie wurden mehrere Beleuchtungsszenen im Laufe des Semesters an 86 Studierenden verglichen. Der d2R-Test wies einen sehr starken Lerneffekt auf. Durch statistische Analyse mit einem linear gemischten Modell ließ sich dieser herausrechnen und ein signifikanter Effekt der Lichtszene für die Konzentrationsleistung feststellen. Leider ergab die post-hoc Analyse keine Informationen, welche Lichtszenen sich wie unterscheiden. Der Effekt fiel insgesamt niedrig und deutlich kleiner als der Lerneffekt aus. Für die KSS fand sich kein Unterschied zwischen den Lichtszenen. Die Hypothese wird daher abgelehnt.

Ein besonderes Anliegen dieser Arbeit war es, Laborergebnisse in einer realen Anwendungssituation einer Vorlesung zu überprüfen. Im Unterschied zur Laborstudie 1 wurde in der Hörsaalstudie jedoch kein positiver Effekt der Beleuchtungsstärke auf die Aufmerksamkeit gefunden. Die Übertragbarkeit vom Labor in die Praxis konnte damit nicht bestätigt werden. Im Versuchsdesign wurde versucht möglichst gleiche Bedingungen herzustellen. Aus praktischen Gründen (vorhandene Beleuchtungslösung im Hörsaal und Sicherstellung der Lesbarkeit der Vorlesungsfolien) war die maximale vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe auf 400 lx begrenzt – im Vergleich zu 1 000 lx in der Laborstudie 1. Mit der heutigen Beamertechnik und dem Druck den Energieverbrauch zu reduzieren sind 1 000 lx vertikal auf Augenhöhe in Vorlesungssälen weiterhin unrealistisch.

Die Hörsaalstudie war methodisch ähnlich dem Hörsaalexperiment von Rautkylä et al. (2010) [23] aufgebaut. Sie verglichen eine sehr hohe Farbtemperatur (17 000 K) mit einer niedrigen Farbtemperatur (4 000 K)

und erfassten die subjektive Aufmerksamkeit vor und nach den ebenfalls 90-minütigen Vorlesungen mit der KSS. Ein positiver Effekt von 17 000 K auf die KSS wurde als geringerer Anstieg der Müdigkeit über die Vorlesung am Nachmittag berichtet. Tageszeitabhängige Veränderungen der KSS zeigten sich auch hier in der Hörsaalstudie – jedoch unabhängig von der Beleuchtung. In der Hörsaalstudie wurde ein etwas kleinerer Bereich von Farbtemperaturen untersucht: 2 500 K vs. 4 000 K vs. 9 000 K. Diese Farbtemperaturen stammen aus vertikalen Messpunkten an Beobachterpositionen. Rautkylä et al. [23] maßen dank Reflexionen im Raum an einer Beobachterposition 12 370 K vs. 3 870 K, 17 000 K war lediglich die Farbtemperatur der Lichtquelle. Mit höheren Farbtemperaturen ab 8 000 K nimmt der melanopische Wirkungsfaktor a_{mel} nur noch geringfügig zu [77], sodass der Unterschied von a_{mel} zwischen den hohen Farbtemperaturen beider Studien gering ist. Die gemessene Differenz der KSS in Rautkylä et al. [23] zwischen den beiden Farbtemperaturen ergab 1,3 Skalenpunkte von einer 9-stufigen Skala. Der Effekt war demnach eher klein und trat nur nachmittags auf, nicht jedoch vormittags. Dieser Effekt konnte hier in der Hörsaalstudie weder mit der KSS noch mit dem d2R-Test reproduziert werden.

Hypothese 5	**Bestätigt?**
Die Wirkung des Lichts auf die Aufmerksamkeit ist morgens ausgeprägter als nachmittags.	Nein

Die Tageszeit hatte in der Hörsaalstudie Einfluss auf die subjektive Aufmerksamkeit, gemessen mit der KSS. Die Probanden waren morgens zu Versuchsbeginn um 8 Uhr müder und wurden zum Ende um 10 Uhr wacher – im Vergleich zu nachmittags, wo sie zu Beginn um 14 Uhr wacher waren und zum Ende um 16 Uhr müder wurden. Dies entspricht der tageszeitabhängigen Leistungskurve des circadianen Rhythmus (siehe Abschnitt 2.3.5). Im Gegensatz zu Rautkylä et al. (2010) [23] war dieser Verlauf jedoch unabhängig von der Beleuchtung. Beim d2R-Test fand sich zwar ein Effekt der Untersuchungszeit auf die Konzentrationsleistung (ebenfalls unabhängig von der Beleuchtung),

dieser ist jedoch auf den Lerneffekt zurückzuführen. Die Hypothese wird abgelehnt.

Hypothese 6	**Bestätigt?**
Eine dynamische Abfolge von Lichtszenen wirkt effektiver auf die Aufmerksamkeit tagsüber als eine statische Lichtszene gleicher Dauer.	Nein

In der Laborstudie 2: Dynamische Lichtbedingungen wurde eine zeitlich wechselnde Beleuchtung im Vergleich zu statischer Beleuchtung untersucht. Sowohl d2R-Test und Go-NoGo-Test als auch KSS zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Beleuchtung. Die Hypothese wird abgelehnt.

Zwei Studien von Canazei et al. [125, 127] und eine Studie von Ye et al. (2017) [123] fanden einen positiven Effekt dynamischer Beleuchtung auf die Aufmerksamkeit im Vergleich zu statischer Beleuchtung. Im Gegensatz dazu zeigte sich bei de Kort und Smolders (2010) [122] kein Unterschied zwischen dynamischer und statischer Beleuchtung. Dabei wurden stets sanfte und unmerkliche Übergänge untersucht. Für Laborstudie 2 wurden absichtlich abrupte Übergänge für maximale Effekte gewählt. Dennoch wurde kein Effekt gefunden.

Dafür sind vielfältige Gründe denkbar. Zunächst lässt sich feststellen, dass sich die beiden statischen Szenen (200 lx und 2 200 K vs. 1 000 lx und 12 000 K) nicht signifikant voneinander unterschieden. Da die dynamische Szene einen Wechsel zwischen diesen beiden Szenen darstellte, ist es demzufolge logisch, dass auch hier kein signifikanter Effekt zu finden war. Die Szenen wurden so ausgewählt, dass ein maximaler Unterschied in der theoretischen melanopischen Wirksamkeit durch Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung bestand. Die Ergebnisse in Laborstudie 1 zeigen anhand des gefundenen Interaktionseffekts, dass diese Kombination möglicherweise nicht optimal war.

Weiterhin wurde Laborstudie 1 morgens um 9 Uhr durchgeführt, während Laborstudie 2 nachmittags um 14 Uhr durchgeführt wurde. Dies könnte einerseits auf einen Einfluss der Tageszeit oder der Lichthistorie hindeuten, andererseits hatte beides keinen Einfluss in der Hörsaalstudie. Außerdem wurde Laborstudie 2 im Winter Januar bis März durchgeführt, wenn die Wirkung des Lichts theoretisch stärker ist (siehe Abschnitt 2.3.6), im Vergleich zur Laborstudie 1, die im Spätsommer August bis September durchgeführt wurde.

Hypothese 7	**Bestätigt?**
Das Wohlbefinden der Probanden verbessert sich bei erhöhter Beleuchtungsstärke und verschlechtert sich bei erhöhtem kurzwelligem Anteil.	Nein

Das Wohlbefinden wurde in allen Versuchen abgefragt und zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lichtszenen. Es gab lediglich drei Ausnahmen: In Laborstudie 1 fand sich ein Interaktionseffekt für Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung bei dem Item *gelangweilt*. Die Richtung entspricht dem Interaktionseffekt bei der Reaktionszeit des Go-NoGo-Tests, was möglicherweise zusammenhängen könnte – gelangweilte Personen geben sich vielleicht weniger Mühe bei dem Test. Außerdem gab es einen kleinen Unterschied in der Motivation zwischen den Beleuchtungsstärken über die Zeit in Laborstudie 1 und die Munterkeit war in der dynamischen Beleuchtung etwas höher als in der statischen Beleuchtung in Laborstudie 2. Das Signifikanzniveau von 0,05 entspricht einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%, d.h. in fünf von 100 Fällen ohne Effekt treten trotzdem signifikante Effekte auf. Deshalb werden diese Ausnahmen als Einzeleffekte betrachtet, die möglicherweise zufällig zustande gekommen sind. Die Hypothese wird damit abgelehnt.

Im Gegensatz dazu fanden Viola et al. (2008) [21] und Chellappa et al. (2011) [20] positive Effekte einer hohen ähnlichsten Farbtemperatur auf das Wohlbefinden. Möglicherweise war der in dieser Arbeit verwendete Fragebogen zur Erfassung des Wohlbefindens mit sieben Items nicht

detailliert genug oder andere Faktoren wirkten stärker auf das Wohlbefinden als das Licht.

Hypothese 8	**Bestätigt?**
Die Akzeptanz der gezeigten Lichtszenen verbessert sich bei erhöhter Beleuchtungsstärke und verschlechtert sich bei erhöhtem kurzwelligem Anteil.	Nein für E, Ja für CCT

Diese Hypothese wird für den kurzwelligen Anteil bestätigt, da in allen Versuchen die Beleuchtung mit hoher ähnlichster Farbetemperatur (12 000 K im Labor bzw. 9 000 K im Hörsaal) schlechter bewertet wurde als wärmere Farben. Dies verstärkte sich noch, wenn gleichzeitig eine hohe Beleuchtungsstärke (1 000 lx im Labor) hinzukam. Für die Beleuchtungsstärke wird die Hypothese abgelehnt.

Es ließe sich einwenden, dass in der Praxis weniger extreme CCTs als 9 000 K bzw. 12 000 K genutzt werden. In Wei et al. (2014) [105] war eine moderat hohe CCT von 5 000 K ebenfalls unbeliebter als 3 500 K, insbesondere bei vorhandenem Tageslicht. Sie wurde außerdem heller bewertet, trotz gleicher vertikaler Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe. Dies wurde auch in den Versuchen dieser Arbeit beobachtet. Shamsul et al. (2013) [99] berichten, dass 4 000 K am komfortabelsten bewertet wurde (Office Lighting Survey) im Vergleich zu 3 000 K und 6 500 K. Im Gegensatz dazu verbesserten sich Visueller Komfort, Stimmung und Müdigkeit bei 6 500 K im Vergleich zu 3 500 K in Choi et al. (2019) [100]. Kein Zusammenhang zur Präferenz von Farbtemperaturen im Bereich von 2 700 K bis 5 000 K fand sich in Van Bommel et al. (2004) [161]. Dort wird vielmehr berichtet, dass sich individuelle Vorlieben stark unterscheiden. Dies entspricht dem Ergebnis, dass 2 500 K und 4 000 K sich in der Bewertung der Probanden nicht unterscheiden.

Im Labor könnte die negative Bewertung bei 12 000 K möglicherweise mit dem niedrigen Farbwiedergabeindex (R_a = 56 im Vergleich zu R_a = 87 bei 2 200 K) erklärt werden. Durch die Verwendung weißer Materialien und Tests im Labor wird dieser Einfluss minimiert. Da im Hörsaal der Farbwiedergabeindex bei allen Szenen gleich ist (R_a = 85) und die

Bewertung trotz weniger extremer CCT als im Labor genauso schlecht ausfällt, ist die Farbwiedergabe nicht die Ursache. Die Gestaltung des Hörsaals mit warmen Holztönen steht im Kontrast zur kalten Lichtfarbe und verstärkte möglicherweise deren negative Bewertung. Die Frage nach der Akzeptanz der Beleuchtung wurde stets am Ende der Versuche gestellt, was ca. 90 min Gewöhnungszeit entspricht.

Die hohe CCT wurde im Labor besonders negativ bewertet, wenn gleichzeitig die Beleuchtungsstärke hoch war. Eine erhöhte Beleuchtungsstärke wird tendenziell stärker bevorzugt (Smolders und Beersma, Begemann et al. [29, 160]). Doch eine sehr hohe Beleuchtungsstärke, was hier der Fall war, kann im Gegenteil weniger akzeptiert werden und potentiell zu psychologischer Blendung führen [29]. Etwas stärkere psychologische Blendung wurde bei 1 000 lx im Labor nur bei der hohen CCT und nicht bei der niedrigen CCT berichtet. Der Unterschied war jedoch nicht signifikant. Im Hörsaal war eine signifikant stärkere psychologische Blendung bei der hohen CCT 9 000 K zwar vorhanden, aber dies galt ebenfalls für die helle Szene bei 400 lx und 4 000 K. Letztere rief jedoch keine negative Bewertung beim Item *angenehm* hervor, wie es die hohe CCT tat. Psycholigische Blendung scheint demnach nicht die Ursache für die schlechte Bewertung gewesen zu sein, sondern vielmehr der zu kalte Farbeindruck.

Dieses Ergebnis spricht gegen einen verbreiteten Einsatz von Beleuchtung mit sehr hohem kurzwelligem Anteil, zumal die Wirksamkeit auf die Aufmerksamkeit nicht belegt werden konnte. Die negative Bewertung der kaltweißen Szenen könnte ein möglicher Grund sein, warum dies nicht der Fall ist. Andererseits wurde in der Hörsaalstudie kein Zusammenhang zwischen der Bewertung der Lichtszenen (inklusive Blendung) mit der Konzentrationsleistung im d2R-Test und der KSS festgestellt.

Forschungsfrage 9
Korrelieren die abhängigen Variablen subjektive Aufmerksamkeit, kognitive Testergebnisse, Anstrengung, Wohlbefinden und Akzeptanz der Beleuchtung miteinander?

Die letzten beiden Forschungsfragen 9 und 10 stehen für explorative Beobachtungen im Feldversuch im Hörsaal ohne zugrunde liegende Hypothesen. Die Beobachtungen aus Abschnitt 5.3.7 werden hier zusammengefasst und diskutiert. Da keine kontrollierte Variation der Kovariablen vorlag, sollten die Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden und in zukünftiger Forschung gezielt untersucht werden.

Es zeigte sich kein Zusammenhang zwischen den abhängigen Variablen Konzentrationsleistung KL und KSS. Für beides wurde keine Korrelation mit der Akzeptanz der Beleuchtung inklusive Blendung gefunden. Das widerspricht der Vermutung, dass die negative Bewertung der hohen CCTs Einfluss auf das Ausbleiben von Effekten bei der Aufmerksamkeit hatte.

Einige Items des Wohlbefinden Fragebogens korrelierten mit KL: je konzentrierter desto besser KL und je angestrengter und gelangweilter desto schlechter KL. Da dies jedoch unabhängig von der Beleuchtung war, wird folgende Theorie verworfen: Es wurden keine Effekte der Beleuchtung auf KL gefunden, weil sich Probanden unter schwierigen Bedingungen mehr anstrengen, um schlechtere Leistung auszugleichen.

Für die KSS wurden folgende Korrelationen gefunden: Probanden fühlten sich desto wacher je wohler, konzentrierter, munterer und motivierter sie waren. Sie fühlten sich desto müder je angestrengter, gelangweilter und gestresster sie waren. Dies könnte natürlich auch andersherum formuliert werden und bedeutet keine Ursache-Wirkung-Beziehung, sondern lediglich einen Zusammenhang.

Forschungsfrage 10
Gibt es weitere Einflüsse auf die akute Aufmerksamkeit durch die Kovariablen Alter, Geschlecht, Chronotyp, Stress, Krankheit, Schlafprobleme, Koffein, Nahrungszufuhr und Lichthistorie?

Diese Forschungsfrage wurde ebenfalls im Feldversuch explorativ in Abschnitt 5.3.7 analysiert. Die Konzentrationsleistung KL im d2R-Test wurde beeinflusst durch die Einnahme von Mahlzeiten und Koffein vor der Vorlesung. Dies war auch in der Hörsaalstudie von Rautkylä et al. [23] der Fall. Die beobachteten Mittelwertdifferenzen von KL durch Koffein und Mahlzeiten waren gleich hoch wie die Unterschiede durch die Lichtszenen, sodass alle drei KL etwa gleich stark beeinflussten.

Krankheit (hauptsächlich Erkältungen oder Schmerzen) und Schlafprobleme führten zu stärkerer Müdigkeit in der KSS. Indirekt wirkte sich Krankheit auch auf KL aus: Kranke Probanden strengten sich stärker an und bei hoher Anstrengung sank KL. Kranke oder übermüdete Probanden (= erschwerte Bedingungen) stellten demnach eine besondere Zielgruppe dar, die möglicherweise höhere Anforderungen an die Beleuchtung fordern, auch wenn dies hier nicht überprüft werden konnte.

Alter, Geschlecht, Chronotyp, Stress und Lichthistorie beeinflussten KSS und KL nicht signifikant. Die Gruppe von Studierenden im Alter von 18 bis 30 Jahren war hier möglicherweise zu homogen. Es gab nur 8 Frauen, dagegen 59 Männer. Die Verteilung der Chronotypen war mit einer großen Mehrheit an Normaltypen nicht gleichmäßig. Um diese Einflüsse zu untersuchen, müssten diese Faktoren gezielt variiert werden.

Der Stress-Fragebogen PSS wurde hier ausschließlich zu Beginn der Studie erfasst. Voraussichtlich variiert der Stress über das Semester, sodass der Startwert weniger aussagekräftig ist. Stressgefühl wurde auch als Teil des täglichen Fragebogens zum Wohlbefinden abgefragt. Dies wurde in der vorherigen Forschungsfrage untersucht und ebenfalls kein Einfluss auf KL und KSS festgestellt. Im Gegensatz dazu führte Stress bei Smolders und de Kort (2014) [86] zu einer verstärkten Reaktion auf hohe

Beleuchtungsstärken. Dort wurde der Stress allerdings absichtlich durch mentale Ermüdung induziert. In der Hörsaalstudie wurde Stress lediglich beobachtet und ein insgesamt recht hohes Stressniveau festgestellt.

Es wurde kein Einfluss der Lichthistorie festgestellt, was im Gegensatz zur verbreiteten Annahme eines Einflusses (z. B. in Kantermann et al. [69]) oder in Huiberts et al. [85]) steht. Der morgendliche Versuch begann um 8:00 Uhr. Bei einem winterlichen Sonnenaufgang zwischen 7:00 und 8:15 Uhr blieb wenig bis keine Zeit für einen Aufenthalt im Tageslicht. Dies war zwar am Nachmittag nicht der Fall, aber die meisten Studierenden im ersten Semester hatten auch davor Vorlesungen z.T. im selben Hörsaal, sodass auch hier kein großer Einfluss der Lichthistorie zu erwarten war.

6.2 Diskussion der Methodik

6.2.1 Operationalisierung

Positive Effekte werden in den Reviews von Souman et al. [32] und Lok et al. [62] häufiger bei der Messung von subjektiver Aufmerksamkeit berichtet als bei der Messung durch kognitive Tests. Im Gegensatz dazu zeigte in dieser Arbeit die Karolinska-Sleepiness-Scale KSS als subjektive Messgröße in keinem der drei Versuche Effekte durch die Beleuchtung. Die Karolinska-Sleepiness-Scale KSS wird in sehr vielen Studien zur nicht-visuellen Wirkung von Licht als Messgröße für subjektive Aufmerksamkeit verwendet und ist daher gut geeignet, um Studienergebnisse miteinander zu vergleichen. Ursprünglich misst sie aber die Müdigkeit (engl. *sleepiness*) auf einer Skala von 1 – extrem wach bis 9 – extrem müde, mit dem Schlaf kämpfend. Dies ist gut geeignet für Studien in der Nacht und bei schlafentzogenen Probanden. Tagsüber, wenn Probanden grundsätzlich wach sind, ist diese Skala möglicherweise zu extrem und nicht sensitiv genug, um Veränderungen der Aufmerksamkeit zu detektieren. Dies wäre eine mögliche Erklärung dafür, dass keine Effekte der Beleuchtung mit der KSS gefunden wurden. Anderseits ist die KSS sensitiv genug, um den circadianen Rhythmus während der Hörsaalstudie zu zeigen (Studierende sind früh morgens müder als nachmittags). Potentielle Effekte des Lichts, falls denn vorhanden, wären deutlich kleiner, da sie nicht mit der KSS detektiert wurden. Diese Schlussfolgerung wurde ebenfalls in Souman et al. [32] gezogen, da Effekte der Beleuchtung auf subjektive Aufmerksamkeit häufig nicht gefunden wurden, aber dennoch viele Studien u. a. Effekte der Tageszeit auf die Müdigkeit finden konnten.

Subjektive Selbsteinschätzungen stimmen nicht immer mit der objektiven Beobachtung überein und sind anfällig für Erwartungseffekte der Probanden. Daher sollten, wenn möglich, weitere Testverfahren zur Messung der Aufmerksamkeit verwendet werden. Als kognitive Tests wurden der d2R-Test auf Papier, ein auditiver Go-NoGo-Test und eine Vigilanzaufgabe auf Tablets verwendet. Die letzten beiden Tests

basieren auf Reaktionszeitmessungen bei verschiedenen Reizen. Mit dem Go-NoGo-Test wurde ein Interaktionseffekt zwischen Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung gefunden, während die Vigilanzaufgabe zwar die gleiche Tendenz ergab, diese jedoch nicht signifikant war. Möglicherweise ist diese Art Test zu einfach für die Probanden, sodass wenig Verbesserungsspielraum durch die Beleuchtung vorhanden sein könnte. Komplexere Aufgaben, die z. B. zusätzlich das Arbeitsgedächtnis fordern, könnten stärker vom Licht profitieren. Nachteil bei komplexeren Aufgaben ist wiederum, dass mehr kognitive Funktionen beteiligt sind und andere Faktoren stärkeren Einfluss haben könnten. Vorteilhaft beim Go-NoGo-Test ist die auditive Durchführung, sodass eine Verbesserung durch bessere Sehleistung ausgeschlossen ist. Das Tablet hatte bei niedriger Helligkeitseinstellung und aktiviertem Blaulichtfilter wenig Störeinfluss auf das einfallende Licht am Auge und ist empfehlenswert zur digitalen Fragebogenbeantwortung. Aus preislichen Gründen wurden günstige Tablets mit spiegelnden Displays eingesetzt, deren störende Lichtreflexe möglicherweise die Leistung verminderten. Für die Nutzung als kognitive Testmethode werden daher nur Tablets mit entspiegelten Displays empfohlen.

Der große Vorteil des d2R-Tests ist, dass er einfach mit Stift und Papier ohne zusätzliche Geräte sowie schnell und unkompliziert in größeren Gruppen durchgeführt werden kann. Mit ihm wurde ein positiver Effekt erhöhter Beleuchtungsstärke auf die Konzentrationsleistung gefunden. Da Probanden zum Erkennen der Zeichen eine Sehleistung erbringen müssen, kann kritisiert werden, dass sich bei einer höheren Beleuchtungsstärke die Sehleistung statt der Aufmerksamkeit verbessern könnte. Dies wurde in den Versuchen vermieden, indem die niedrige vertikale Beleuchtungsstärke von 200 lx auf Augenhöhe (ca. 500 lx horizontal) dem Normwert für Bürobeleuchtung am Arbeitsplatz entsprach (DIN EN 12464-1:2011 [76]) und damit für eine ausreichend gute Sehleistung sorgte.

Ein größerer Nachteil des d2R-Tests ist der langanhaltende Lerneffekt. In einem Vorversuch mit 10 Teilnehmenden wurde der d2R-Test zehnmal hintereinander mit einer kurzen Pause durchgeführt und nach drei bis vier Durchläufen war eine Sättigung erreicht. Deshalb wurde für die Hörsaalstudie eine zweiwöchige Trainingsphase konzipiert, die acht Testdurchführungen entsprach, um den Lerneffekt auszugleichen. Überraschenderweise wurde der Lerneffekt über das komplette Semester, selbst nach über 40 Durchführungen, beobachtet. Für ein Innersubjektdesign mit einer einzigen Probandengruppe ist der d2R-Test demnach ungeeignet, da jeder Proband alle Lichtszenen in der gleichen Reihenfolge sieht und der Lerneffekt die potenziellen Effekte der Beleuchtung überlagert. Mit einem linear gemischten Modell ließ sich der Lerneffekt modellieren und von der Beleuchtung trennen. Die Analyse berechnete einen signifikanten Effekt der Beleuchtung, dieser fiel jedoch im Vergleich zum Lerneffekt vernachlässigbar niedrig aus. Für Studien mit einem Zwischensubjektdesign, wie in den Laborstudien, ist der Lerneffekt des d2R-Tests kein Problem, da jeder Proband nur eine Lichtszene sieht. Hierbei ist eine ausreichend große Stichprobe (hier N = 30 Probanden pro Gruppe) sehr wichtig, da sich sonst zufällig leistungsstarke Probanden in einer Gruppe sammeln könnten.

Alle betrachteten Testmethoden haben ihre jeweiligen Vor- und Nachteile. Es ist daher empfehlenswert mehrere Methoden, insbesondere subjektive und kognitive, miteinander zu kombinieren. Als weitere Möglichkeit könnte die Verwendung von physiologischen Messungen wie beispielsweise EEG oder Pupillometrie mit einbezogen werden.

6.2.2 Hörsaalstudie

Feldstudien haben den Vorteil, dass ihre Ergebnisse unter realen Bedingungen geniert werden, sodass eine Übertragbarkeit in die Praxis wahrscheinlicher ist als bei Laborstudien und die praktische Relevanz überprüft werden kann. Außerdem lässt sich durch die Integration der Feldstudie in den Alltag der Probanden leichter eine hohe

Stichprobengröße erzielen (hier N = 85). Für das Anwendungsgebiet Licht zum Lernen ist ein Experiment in einem fensterlosen Hörsaal ideal, da hier statische Lichtbedingungen angeboten werden können ohne veränderliches Tageslicht. Die realen Bedingungen erschweren hingegen die Erfolgswahrscheinlichkeit der Studien, da weitaus mehr Störfaktoren als im Labor vorhanden sind. Das sind u. a. reale Räume mit variabler Gestaltung und individuelle Unterschiede der Probanden, wie die aktuelle Tagesform und Gesundheitszustand, Aktivitäten vor dem Experiment z. B. Freizeit, Sport oder Arbeit, Erwartungshaltungen an das Experiment, Nahrungs- und Koffeinzufuhr, Schwierigkeit der aktuellen Vorlesung sowie Lichthistorie. Um einige dieser Faktoren konstant zu halten, könnte den Probanden ein standardisierter Tagesablauf inkl. Mahlzeiten und Zeit im Freien vorgegeben werden. So gewonnene Ergebnisse können wiederum schwer verallgemeinert werden und individuelle Tagesform und Erwartungshaltungen bleiben weiterhin als nicht kontrollierbare Einflussgrößen. Deshalb wurden den Probanden in der Hörsaalstudie keine solchen Vorgaben gemacht. Stattdessen wurden die Störfaktoren jeweils abgefragt und ihr Einfluss in der Hörsaalstudie explorativ untersucht (siehe Forschungsfrage 10 in 6.1). Lärm und schlechte Luftqualität (hohe CO_2-Konzentration) waren vor allem in der Hörsaalstudie präsent. Durch Messgeräte und Befragung stellte sich eine gleichbleibende Belastung über das Semester heraus, sodass der Einfluss von Lärm und Luftqualität nahezu konstant blieb.

Eine häufige Schwierigkeit bei Feldstudien über einen längeren Zeitraum sind fehlende Datensätze, da die meisten statistischen Methoden komplette Datensätze erfordern. Die Hörsaalstudie erstreckte sich über ein ganzes Semester, sodass nahezu kein Datensatz vollständig war u. a. wegen Unpünktlichkeit oder krankheitsbedingtem Ausfall. Durch die angewendete Methode des linear gemischten Modells konnten die lückenhaften Daten kompensiert werden. Weiterhin sank voraussichtlich die Motivation Test und Fragebogen gewissenhaft auszuführen über das Semester. Beim d2R-Test ließ sich Schummeln bzw. unsauberes Arbeiten u. a. an sehr unregelmäßiger Art des

Ankreuzens und sehr hohen Fehlerraten erkennen. Dies trat selten auf und wurde bei der Datenaufbereitung als Ausreißer behandelt. Beim Fragebogen ließ sich nicht gewissenhaftes Ausfüllen kaum erkennen, sodass hier keine Fehlerbehandlung durchgeführt werden konnte.

Im zweiten Teil der Hörsaalstudie war die Reihenfolge der Lichtszenen nicht optimal. Es wurden lediglich zwei Szenen miteinander getauscht, statt die Abfolge aller vier Szenen zu verändern. Da der Lerneffekt die Lichteffekte beim d2R-Test überlagerte und die KSS keine Abhängigkeit von der Beleuchtung zeigte, war die Reihenfolge hier nicht von Bedeutung. Für zukünftige Studien dieser Art sollte die Reihenfolge randomisiert oder ausbalanciert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung des Designs ist die Nutzung einer separaten Kontrollgruppe, die ausschließlich Referenzbeleuchtung ausgesetzt ist. Sie muss allerdings möglichst die gleichen Bedingungen wie die Versuchsgruppe besitzen (gleiche Zusammensetzung der Probanden, gleiche Vorlesungszeiten, vergleichbare Räume und Vorlesungen, …). Dies war in dieser Hörsaalstudie nicht möglich, da nur eine Vorlesung zur Verfügung stand. Mit der 2-wöchigen Trainingsphase sollten gleiche Kontrollbedingungen für alle Probanden hergestellt werden, sodass auf die Kontrollgruppe verzichtet wurde.

6.2.3 Gültigkeit der Ergebnisse

Das Anwendungsgebiet dieser Arbeit ist Licht zum Lernen. Dafür wurden ausschließlich junge Erwachsene im Alter von 18 bis 30 Jahren tagsüber untersucht. Sie zeigten lediglich geringe Veränderungen der Aufmerksamkeit durch die Beleuchtung. Unter unkritischen Bedingungen könnte eventuell eine qualitative Standardbeleuchtung ausreichen, um die Aufmerksamkeit aufrecht zu erhalten. Andere Altersgruppen wie Senioren oder Kinder reagieren möglicherweise empfindlicher auf veränderte Lichtbedingungen. Weiterhin ist es denkbar, dass kritische Faktoren wie Krankheit, Schlafentzug oder Stress die Sensitivität gegenüber Licht ebenfalls erhöhen. Auf kritische Anwendungsbereiche, wo fehlende Aufmerksamkeit ernsthafte Folgen

hat (z. B. erhöhte Unfallgefahr), oder die Beleuchtung von Nachtschichten, wo erhöhte Müdigkeit und verschobene circadiane Rhythmen eine wichtige Rolle spielen, sollten die Ergebnisse jedoch nicht übertragen werden. Weiterhin wurde ausschließlich eine Dauer von 90 min und damit kurzfristige und akute Veränderungen der Aufmerksamkeit untersucht. Eine langfristige Dauer über einen ganzen Tag oder längere Zeiträume liefern möglicherweise andere Ergebnisse.

Der Einfluss der räumlichen Verteilung und des Einfallswinkels des Lichts wurde in dieser Arbeit nicht betrachtet. Broszio et al. 2017 [72] führten einen Vergleich verschiedener Beleuchtungsverteilungen an Decke und gegenüberliegender Wand bei 500 lx vertikal auf Augenhöhe im gleichen Laborraum durch, der auch in dieser Arbeit genutzt wurde. Es zeigte sich, dass die theoretische Wirksamkeit der Beleuchtung, wenn der effektive Winkelbereich der ipRGCs (nach [11]) mit einbezogen wurde, bei Beleuchtung ausschließlich von oben am geringsten war. Am effektivsten wirkte theoretisch die Beleuchtung der Wand gegenüber. Vries et al. (2018) [192] untersuchten den Einfluss der Wandleuchtdichte bei konstanter horizontaler Beleuchtungsstärke (500 lx) in einer Büroumgebung. Eine hohe Wandleuchtdichte (72 cd/m²) erhielt die subjektive Aufmerksamkeit aufrecht, während bei niedrigerer Wandleuchtdichte (12 und 36 cd/m²) die subjektive Aufmerksamkeit abnahm. Die Wandleuchtdichte beeinflusste jedoch nicht das Ergebnis bei Problemlösungsaufgaben. Die Richtung des Lichteinfalls könnte demnach ein Grund sein, warum einige Studien positive Effekte auf die Aufmerksamkeit zeigen konnten und andere nicht. Beleuchtungskonzepte für nicht-visuelle Wirkungen müssen demnach die räumliche Verteilung des Lichts verstärkt beachten. Die Beleuchtung wurde sowohl in den Laborversuchen als auch in der Hörsaalstudie durch großflächige Leuchten in der Decke realisiert und die räumliche Verteilung war somit konstant und vergleichbar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Dissertation beschreibt Untersuchungen zur Wirkung von erhöhter vertikaler Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe und erhöhtem kurzwelligen Anteil in der spektralen Verteilung auf die akute Aufmerksamkeit am Tage. Eine grafische Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

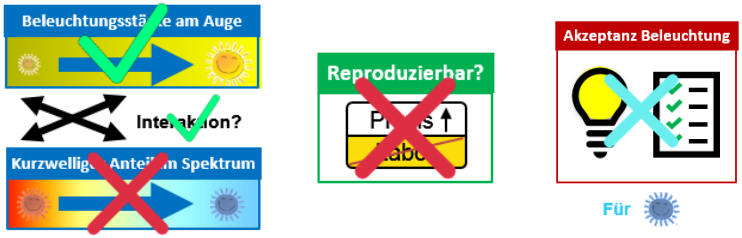


Abbildung 7.1: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Im Laborversuch zeigte sich, dass eine erhöhte vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe von 1000 lx im Vergleich zu einer Standard-Beleuchtungsstärke von 200 lx positiv auf die Aufmerksamkeit wirkte. Ein erhöhter kurzwelliger Anteil in der spektralen Verteilung von 12000 K und a_{mel} = 1,5 unterschied sich nicht von 2200 K und a_{mel} = 0,3 bezüglich der Aufmerksamkeit. Die Interaktion beider Größen deutet darauf hin, dass sich eine gleichzeitig hohe Beleuchtungsstärke und hoher kurzwelliger Anteil in der spektralen Verteilung (12000 K bei 1000 lx) nachteilig auf die Aufmerksamkeit auswirkte. Dies wurde anhand der kognitiven Tests d2R-Test und Go-NoGo-Test ermittelt. Die subjektive Aufmerksamkeit, mit der Karolinska-Sleepiness-Scale gemessen, wurde nicht durch die Beleuchtung beeinflusst. Diese Ergebnisse konnten im Feldversuch im Hörsaalkontext weder mit subjektiven noch mit kognitiven Tests reproduziert werden. Erklärungen sind weniger extreme Lichtbedingungen (hohe Beleuchtungsstärke: 400 lx, hoher kurzwelliger Anteil: 9000 K und a_{mel} = 1,0) als im Labor, stärkerer Einfluss von Störgrößen im Feld inklusive Lerneffekt beim d2R-

Test und die Möglichkeit, dass der potenzielle Effekt des Lichts auf die Aufmerksamkeit zu gering für einen Nachweis ist. Ein weiterer Laborversuch fand keinen Unterschied in der Wirkung von dynamischer vs. statischer Beleuchtung auf die Aufmerksamkeit. In allen Versuchen wurden Lichtszenen mit hohem kurzwelligem Anteil hinsichtlich Akzeptanz schlechter bewertet als Lichtszenen mit niedrigem oder mittlerem kurzwelligem Anteil.
Die Ergebnisse sind im Einklang mit aktueller Literatur (u. a. [32, 62]) und zeigen, dass der Einfluss von Licht auf den Menschen komplex und schwer zu kontrollieren ist. In der Analyse der Feldstudie zeigte sich, dass andere Einflussgrößen wie ein langanhaltender Lerneffekt im monotonen d2R-Test, aber auch berichtete Anstrengung, Nahrungs- und Koffeinzufuhr sowie Krankheit und Schlafprobleme teilweise deutlich höheren Einfluss auf die Aufmerksamkeit besaßen als das Licht. Wird zusätzlich der sogenannte publication bias (negative Ergebnisse werden seltener veröffentlicht) mit einbezogen, besteht die Möglichkeit, dass Licht tagsüber weniger wirksam auf die Aufmerksamkeit sein könnte als bisher angenommen.

Um die aktuelle Studienlage besser vergleichen zu können und belastbare Belege für die Wirksamkeit von Licht auf die Aufmerksamkeit tagsüber erbringen zu können, ist weiterer Forschungsbedarf nötig. Wichtig hierbei sind:

- eine hohe Anzahl Probanden für eine gute statistische Power,
- gut dokumentierte Versuchsdesigns für die Nachvollziehbarkeit,
- lichttechnische Messungen inklusive spektraler Verteilungen vor Ort und Dokumentation der räumlichen Gegebenheiten,
- eine Kombination mehrerer unterschiedlicher Testmethoden, u. a. subjektiv, kognitiv oder anhand physiologischer Parameter,
- eine gezielte Untersuchung des Einflusses von individuellen Faktoren und Kontrolle von Kovariablen.

Wünschenswert wäre außerdem ein Vergleich verschiedener Testmethoden im Hinblick auf ihre Eignung zur Messung der Aufmerksamkeit in Lichtstudien. Der hier verwendete d2R-Test kann für Innersubjektdesigns nicht weiterempfohlen werden. Eine kombinierte Untersuchung der Aufmerksamkeit und anderer nicht-visueller Größen wie Schlafqualität in der Folgenacht nach dem Experiment könnte weitere interessante Erkenntnisse liefern.

Diese Arbeit setzt den Fokus auf Beleuchtungsstärke und spektrale Verteilung des Lichts. Weitere Eigenschaften der Exposition durch Licht wie die räumliche Verteilung, Dauer, Tageszeit und Lichthistorie sowie individuelle Eigenschaften der Probanden wie Alter, Geschlecht und Gesundheitszustand sollten in weiterer Forschung berücksichtigt werden. Ebenso sollte die Gestaltung des Raumes in Bezug auf die Wirkung der Lichtfarbe betrachtet werden (Beispiel: Der Gegensatz warme Raumfarben vs. kaltweißes Licht resultiert voraussichtlich in schlechterer Akzeptanz der Beleuchtung).

Außerdem sollte in kontrollierten Langzeitstudien die Wirksamkeit von Licht auf die Aufmerksamkeit in realen Lernumfeldern wie Schule oder Hörsaal weiter erforscht werden, so wie es die Kommission für Arbeitsschutz und Normung für Arbeitsplätze fordert [69]. Weitere Belege zur Wirksamkeit sind ebenfalls nötig, um in der Praxis die höheren Kosten für eine aufwendigere Lichtplanung, für komplexere Lichtsteuerungssysteme und für den energetischen Mehraufwand einer höheren Beleuchtungsstärke zu rechtfertigen. Letzteres sollte durch die vermehrte Nutzung des Tageslichts kompensiert werden, da Tageslicht nicht nur eine kostenlose Lichtquelle ist und von vielen Menschen bevorzugt wird, sondern ebenfalls eine positive Wirkung auf den Menschen besitzt [193–195].

Die Vision die *richtige Beleuchtungsstärke* mit der *richtigen spektralen Verteilung* zur *richtigen Zeit* für die *richtige Anwendung* zur Verfügung zu stellen ist aktuell noch nicht erreicht. Es bleibt daher weiterhin Aufgabe

der Forschung, das Wort „richtig“ durch konkrete Fakten und Zahlen zu ersetzen.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass tendenziell eine höhere Beleuchtungsstärke für die Aufmerksamkeit tagsüber von Vorteil ist und sehr hohe Farbtemperaturen nur mit Vorsicht eingesetzt werden sollten, da eine niedrigere Nutzerakzeptanz zu erwarten ist. Adaptive Lichtlösungen mit variablen Beleuchtungsstärken und variablen spektralen Verteilungen ermöglichen schon jetzt eine auf individuelle Bedürfnisse angepasste Beleuchtung und können in Zukunft mit den neuesten Erkenntnissen aus der Forschung zu Licht und Aufmerksamkeit erweitert werden.

Literatur

[1] Gau, S.-F.; Soong, W.-T.: The Transition of Sleep-Wake Patterns in Early Adolescence. In: Sleep 26 (2003) 4, S. 449–454.

[2] Owens, J. A.; Belon, K.; Moss, P.: Impact of delaying school start time on adolescent sleep, mood, and behavior. In: Archives of pediatrics & adolescent medicine 164 (2010) 7, S. 608–614.

[3] Randler, C.; Frech, D.: Correlation between morningness – eveningness and final school leaving exams. In: Biological Rhythm Research 37 (2006) 3, S. 233–239.

[4] Randler, C.; Frech, D.: Young people's time-of-day preferences affect their school performance. In: Journal of Youth Studies 12 (2009) 6, S. 653–667.

[5] Carskadon, M. A.; Acebo, C.; Seifer, R.: Extended nights, sleep loss, and recovery sleep in adolescents. In: Archives italiennes de Biologie 139 (2001) 3, S. 301–312.

[6] Roenneberg, T.; Kuehnle, T.; Pramstaller, P. P.; Ricken, J.; Havel, M.; Guth, A.; Merrow, M.: A marker for the end of adolescence. In: Current Biology 14 (2004) 24, S. R1038–R1039.

[7] Wittmann, M.; Dinich, J.; Merrow, M.; Roenneberg, T.: Social jetlag. Misalignment of biological and social time. In: Chronobiology international 23 (2006) 1–2, S. 497–509.

[8] Haraszti, R. Á.; Ella, K.; Gyöngyösi, N.; Roenneberg, T.; Káldi, K.: Social jetlag negatively correlates with academic performance in undergraduates. In: Chronobiology international 31 (2014) 5, S. 603–612.

[9] Giannotti, F.; Cortesi, F.; Sebastiani, T.; Ottaviano, S.: Circadian preference, sleep and daytime behaviour in adolescence. In: Journal of Sleep Research 11 (2002) 3, S. 191–199.

[10] Fördergemeinschaft Gutes Licht (Hg.): Leitfaden Human Centric Lighting (HCL). In: licht.wissen 21 (2019). Frankfurt am Main. http://www.licht.de/de/service-info/publikationen-und-downloads/heftreihe-lichtwissen/, Abrufdatum: 08.01.2018.

[11] Fördergemeinschaft Gutes Licht (Hg.): Wirkung des Lichts auf den Menschen. In: licht.wissen 19 (2014). Frankfurt am Main. http://www.licht.de/de/service-info/publikationen-und-downloads/heftreihe-lichtwissen/, Abrufdatum: 08.01.2018.

[12] Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.; Greeson, J. M.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M. D.: Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. In: The Journal of Neuroscience (2001) 21(16), S. 6405–6412.

[13] Thapan, K.; Arendt, J.; Skene, D. J.: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. In: The Journal of Physiology 535 (2001) 1, S. 261–267.

[14] Zeitzer, J. M.; Dijk, D.-J.; Kronauer, R. E.; Brown, E. N.; Czeisler, C. A.: Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. In: The Journal of Physiology 526 (2000) 3, S. 695–702.

[15] Cajochen, C.; Zeitzer, J. M.; Czeisler, C. A.; Dijk, D.-J.: Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. In: Behavioural Brain Research 115 (2000) 1, S. 75–83.

[16] Lucas, R. J.; Peirson, S. N.; Berson, D. M.; Brown, T. M.; Cooper, H. M.; Czeisler, C. A.; Figueiro, M. G.; Gamlin, P. D.; Lockley, S. W.; O'Hagan, J. B.; Price, Luke L A; Provencio, I.; Skene, D. J.; Brainard, G. C.: Measuring and using light in the melanopsin age. In: Trends in neurosciences 37 (2014) 1, S. 1–9.

[17] Smolders, K.; Kort, Y. de; Cluitmans, P.: Higher light intensity induces modulations in brain activity even during regular daytime working hours. In: Lighting Research and Technology (2015).

[18] Phipps-Nelson, J.; Redman, J. R.; Dijk, D.-J.; Rajaratnam, Shantha M W: Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. In: Sleep 26 (2003) 6, S. 695–700.

[19] Tanaka, K.; Takahashi, M.; Tanaka, M.; Takanao, T.; Nishinoue, N.; Kaku, A.; Kato, N.; Tagaya, H.; Miyaoka, H.: Brief Morning Exposure to Bright Light Improves Subjective Symptoms and Performance in Nurses with Rapidly Rotating Shifts. In: Journal of Occupational Health 53 (2011) 4, S. 258–266.

[20] Chellappa, S. L.; Steiner, R.; Blattner, P.; Oelhafen, P.; Götz, T.; Cajochen, C.: Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance. Can blue-enriched light keep us alert? In: PloS one 6 (2011) 1, e16429.

[21] Viola, A. U.; James, L. M.; Schlangen, L. J. M.; Dijk, D.-J.: Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. In: Scandinavian Journal of Work, Environment & Health 34 (2008) 4, S. 297–306.

[22] Mills, P. R.; Tomkins, S. C.; Schlangen, Luc J M: The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. In: Journal of circadian rhythms 5 (2007), S. 2.

[23] RAUTKYLÄ, E.; PUOLAKKA, M.; TETRI, E.; HALONEN, L.: Effects of Correlated Colour Temperature and Timing of Light Exposure on Daytime Alertness in Lecture Environments. In: Journal of Light & Visual Environment 34 (2010) 2, S. 59–68.

[24] Borragán, G.; Deliens, G.; Peigneux, P.; Leproult, R.: Bright light exposure does not prevent the deterioration of alertness induced by sustained high cognitive load demands. In: Journal of Environmental Psychology 51 (2017), S. 95–103.

[25] St Hilaire, M. A.; Rüger, M.; Fratelli, F.; Hull, J. T.; Phillips, A. J. K.; Lockley, S. W.: Modeling Neurocognitive Decline and Recovery During Repeated Cycles of Extended Sleep and Chronic Sleep Deficiency. In: Sleep 40 (2017) 1.

[26] Lok, R.; Woelders, T.; Gordijn, M. C. M.; Hut, R. A.; Beersma, D. G. M.: White Light During Daytime Does Not Improve Alertness in Well-rested Individuals. In: Journal of biological rhythms 33 (2018) 6, S. 637–648.

[27] Huiberts, L. M.; Smolders, K. C.H.J.; Kort, Y. A.W. de: Non-image forming effects of illuminance level: Exploring parallel effects on physiological arousal and task performance. In: Physiology & behavior 164, Part A (2016), S. 129–139.

[28] Veitch, J. A.; Newsham, G. R.; Boyce, P. R.; Jones, C. C.: Lighting appraisal, well-being and performance in open-plan offices. A linked mechanisms approach. In: Lighting Research & Technology 40 (2008) 2, S. 133–151.

[29] Smolders, K. C. H. J.; Beersma, D. G. M.: Lighting for health and well-being in workplaces. In. Situation analysis report on lighting for health and well-being in education, work places, nursing homes, domestic applications (D3.2), and smart cities (D3.4) 2014.

[30] Völker, S.: Eignung von Methoden zur Ermittlung eines notwendigen Beleuchtungsniveaus, Dissertation 1999.

[31] Oken, B. S.; Salinsky, M. C.; Elsas, S. M.: Vigilance, alertness, or sustained attention. Physiological basis and measurement. In: Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology 117 (2006) 9, S. 1885–1901.

[32] Souman, J. L.; Tinga, A. M.; Te Pas, S. F.; van Ee, R.; Vlaskamp, B. N. S.: Acute alerting effects of light: A systematic literature review. In: Behavioural Brain Research 337 (2018), S. 228–239.

[33] Schmidt-Atzert, L.; Büttner, G.; Bühner, M.: Theoretische Aspekte von Aufmerksamkeits- /Konzentrationsdiagnostik. In: Büttner, G. (Hrsg.): Diagnostik von Konzentration und Aufmerksamkeit. Göttingen 2004.

[34] Sturm, W.: Aufmerksamkeitsstörungen 2004. Horgrefe Verlag

[35] Schweizer, K.: Leistung und Leistungsdiagnostik 2006. Springer-Verlag. ISBN: 3540330208

[36] Westhoff, K.: Aufmerksamkeit und Konzentration. In: Verhaltens-und Leistungsunterschiede 2 (1995), S. 375–402.

[37] Westhoff, K.; Hagemeister, C.: Konzentrationsdiagnostik 2005.

[38] Kaida, K.; Takahashi, M.; Akerstedt, T.; Nakata, A.; Otsuka, Y.; Haratani, T.; Fukasawa, K.: Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables. In: Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology 117 (2006) 7, S. 1574–1581.

[39] Hoddes, E.; Zarcone, V.; Smythe, H.; Phillips, R.; Dement, W. C.: Quantification of Sleepiness. A New Approach. In: Psychophysiology 10 (1973) 4, S. 431–436.

[40] Johns, M. W.: What is Excessive Daytime Sleepiness? In: Fulke, P.; Vaughan, S. (Hrsg.): Sleep Deprivation. Causes, Effects and Treatment. new York 2009.

[41] Johns, M. W.: A New Method for Measuring Daytime Sleepiness. The Epworth Sleepiness Scale. In: Sleep 14 (1991) 6, S. 540–545.

[42] Samn, S. W.; Perelli, L. P.: Estimating aircrew fatigue. A technique with application to airlift operations 1982.

[43] Poulton, E. C.; Poulton, S.: Bias in quantifying judgements 1989.

[44] Hyvärinen, M.: Methodological questions in lighting acceptance and preference studies, Dissertation. Helsinki 2015.

[45] Zhou, X.; Ferguson, S. A.; Matthews, R. W.; Sargent, C.; Darwent, D.; Kennaway, D. J.; Roach, G. D.: Mismatch between subjective alertness and objective performance under sleep restriction is greatest during the biological night. In: Journal of sleep research 21 (2012) 1, S. 40–49.

[46] Dinges, D. F.; Powell, J. W.: Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. In: Behavior Research Methods, Instruments, & Computers 17 (1985) 6, S. 652–655.

[47] Jung, C. M.; Ronda, J. M.; Czeisler, C. A.; Wright, K. P.: Comparison of sustained attention assessed by auditory and visual psychomotor vigilance tasks prior to and during sleep deprivation. In: Journal of sleep research 20 (2011) 2, S. 348–355.

[48] Langenecker, S. A.; Zubieta, J.-K.; Young, E. A.; Akil, H.; Nielson, K. A.: A task to manipulate attentional load, set-shifting, and inhibitory control. Convergent validity and test-retest reliability of the Parametric Go/No-Go Test. In: Journal of clinical and experimental neuropsychology 29 (2007) 8, S. 842–853.

[49] Leclercq, M.; Zimmermann, P.: Applied Neuropsychology of Attention: Theory, Diagnosis and Rehabilitation 2004.

[50] Wright, L.; Lipszyc, J.; Dupuis, A.; Thayapararajah, S. W.; Schachar, R.: Response inhibition and psychopathology. A meta-analysis of go/no-go task performance. In: Journal of abnormal psychology 123 (2014) 2, S. 429–439.

[51] Mackworth, J. F.: Paced memorizing in a continuous task. In: Journal of Experimental Psychology 58 (1959) 3, S. 206–211.

[52] Brickenkamp, R.; Schmidt-Atzert, L.; Liepmann, D.: Test d2 - Revision, Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest. Göttingen 2010.

[53] Santamaria, J.; Chiappa, K. H.: The EEG of Drowsiness in Normal Adults. In: Journal of Clinical Neurophysiology 4 (1987) 4, S. 327–382.

[54] Johns, M. W.; Chapman, R.; Crowley, K.; Tucker, A.: A new method for assessing the risks of drowsiness while driving. In: Somnologie – Schlafforschung und Schlafmedizin 12 (2008) 1, S. 66–74.

[55] Ma'touq, J.; Al-Nabulsi, J.; Al-Kazwini, A.; Baniyassien, A.; Al-Haj Issa, G.; Mohammad, H.: Eye blinking-based method for detecting driver drowsiness. In: Journal of medical engineering & technology 38 (2014) 8, S. 416–419.

[56] Yoss, R. E.; Moyer, N. J.; Hollenhorst, R. W.: Pupil size and spontaneous pupillary waves associated with alertness, drowsiness, and sleep. In: Neurology 20 (1970) 6, S. 545.

[57] Caffier, P. P.; Erdmann, U.; Ullsperger, P.: Experimental evaluation of eye-blink parameters as a drowsiness measure. In: European Journal of Applied Physiology 89 (2003) 3, S. 319–325.

[58] Henelius, A.; Sallinen, M.; Huotilainen, M.; Müller, K.; Virkkala, J.; Puolamäki, K.: Heart rate variability for evaluating vigilant attention in partial chronic sleep restriction. In: Sleep 37 (2014) 7, S. 1257–1267.

[59] Rajendra Acharya, U.; Paul Joseph, K.; Kannathal, N.; Lim, C. M.; Suri, J. S.: Heart rate variability. A review. In: Medical and Biological Engineering and Computing 44 (2006) 12, S. 1031–1051.

[60] Wright, K. P.; Hull, J. T.; Czeisler, C. A.: Relationship between alertness, performance, and body temperature in humans. In: American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology 283 (2002) 6, R1370-7.

[61] Raymann, R. J.E.M.; van Someren, E. J.W.: Time-on-task Impairment of Psychomotor Vigilance Is Affected by Mild Skin Warming and Changes With Aging and Insomnia. In: Sleep 30 (2007) 1, S. 96–103.

[62] Lok, R.; Smolders, K. C. H. J.; Beersma, D. G. M.; Kort, Y. A. W. de: Light, Alertness, and Alerting Effects of White Light. A Literature Overview. In: Journal of biological rhythms 33 (2018) 6, S. 589–601.

[63] Spitschan, M.; Jain, S.; Brainard, D. H.; Aguirre, G. K.: Opponent melanopsin and S-cone signals in the human pupillary light response. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111 (2014) 43, S. 15568–15572.

[64] Woelders, T.; Leenheers, T.; Gordijn, M. C. M.; Hut, R. A.; Beersma, D. G. M.; Wams, E. J.: Melanopsin- and L-cone-induced pupil constriction is inhibited by S- and M-cones in humans. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 115 (2018) 4, S. 792–797.

[65] Uttley, J.: Power Analysis, Sample Size, and Assessment of Statistical Assumptions—Improving the Evidential Value of Lighting Research. In: LEUKOS 74 (2019) 1, S. 1–20.

[66] Pachito, D. V.; Eckeli, A. L.; Desouky, A. S.; Corbett, M. A.; Partonen, T.; Rajaratnam, S. M.; Riera, R.: Workplace lighting for improving alertness and mood in daytime workers. In: The Cochrane database of systematic reviews 3 (2018), S. CD012243.

[67] Cochrane: Über uns. URL: https://www.cochrane.org/de/about-us. Abrufdatum 06.05.2019.

[68] Bragard, I.; Coucke, P. A.: Impact of the use of Luminette (R) on well-being at work in a radiotherapy department. In: Cancer Radiother 17 (2013) 8, S. 731–735.

[69] Kantermann, T.; Schierz, C.; Harth, V.: Gesicherte arbeitsschutzrelevante Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen. Eine Literaturstudie 2018.

[70] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren 17.180.01 (2015) DIN SPEC 5031-100. Berlin.

[71] CIE Internationale Beleuchtungskommission: Research roadmap for healthful interior lighting applications. Vienna 2016.

[72] Broszio, K.; Knoop, M.; Niedling, M.; Völker, S.: Effective radiant flux for non-image forming effects – is the illuminance and the melanopic irradiance at the eye really the right measure? In: Kobav, M. B. (Hrsg.): Proceedings of the Lux Europa 2017. European Lighting Conference, September 18-20, 2017, Ljubljana, Slovenia : lighting for modern society. Ljubljana, Ljubljana 2017.

[73] Knoop, M.; Broszio, K.; Diakite, A.; Liedtke, C.; Niedling, M.; Rothert, I.; Rudawski, F.; Weber, N.: Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects. In: LEUKOS (2019), S. 1–17.

[74] Aarts, M. P.J.; van Duijnhoven, J.; Aries, M. B.C.; Rosemann, A. L.P.: Performance of personally worn dosimeters to study non-image forming effects of light. Assessment methods. In: Building and Environment 117 (2017), S. 60–72.

[75] CIE: System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light CIE S 026/E:2018.

[76] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen (2011) DIN EN 12464-1:2011. Berlin.

[77] Knoche, S.: Optimierte Spektren für Human Centric Lighting - Theoretische Grenzen: Licht 2016. Karlsruhe, 25.–28. September, Tagungsband - Proceedings. Karlsruhe 2016.

[78] Schierz, C.; Vandahl, C.: Biologische Wirkung von Licht. Literaturübersicht 2012.

[79] CIE: Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013 (2013) CIE TN 003:2015.

[80] Te Kulve, M.; Schlangen, L. J. M.; Schellen, L.; Frijns, A. J. H.; van Marken Lichtenbelt, W. D.: The impact of morning light intensity and environmental temperature on body temperatures and alertness. In: Physiology & behavior 175 (2017), S. 72–81.

[81] Smolders, K. C. H. J.; Peeters, S. T.; Vogels, I. M. L. C.; 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. In: Journal of biological rhythms 33 (2018) 6, S. 649–661.

[82] Smolders, K.C.H.J.; Kort, Y.A.W. de; Cluitmans, P.J.M.: A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. In: Tufts University special section 107 (2012) 1, S. 7–16.

[83] Yoon, I.-Y.; Jeong, D.-U.; Kwon, K.-B.; Kang, S.-B.; Song, B.-G.: Bright Light Exposure at Night and Light Attenuation in the Morning Improve Adaptation of Night Shift Workers. In: Sleep 25 (2002) 3, S. 351–356.

[84] Leichtfried, V.; Mair-Raggautz, M.; Schaeffer, V.; Hammerer-Lercher, A.; Mair, G.; Bartenbach, C.; Canazei, M.; Schobersberger, W.: Intense illumination in the morning hours improved mood and alertness but not mental performance. In: Applied ergonomics 46 Pt A (2015), S. 54–59.

[85] Huiberts, L. M.; Smolders, K. C. H. J.; 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. In: Chronobiology international 34 (2017) 7, S. 827–844.

[86] Smolders, K. C.H.J.; de Kort, Yvonne A.W.: Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. In: Journal of Environmental Psychology 39 (2014), S. 77–91.

[87] Badia, P.; Myers, B.; Boecker, M.; Culpepper, J.; Harsh, J. R.: Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior. In: Physiology & behavior 50 (1991) 3, S. 583–588.

[88] Daurat, A.; Aguirre, A.; Foret, J.; Gonnet, P.; Keromes, A.; Benoit, O.: Bright light affects alertness and performance rhythms during a 24-h constant routine. In: Physiology & behavior 53 (1993) 5, S. 929–936.

[89] Rahman, S. A.; Marcu, S.; Shapiro, C. M.; Brown, T. J.; Casper, R. F.: Spectral modulation attenuates molecular, endocrine, and neurobehavioral disruption induced by nocturnal light exposure. In: American journal of physiology. Endocrinology and metabolism 300 (2011) 3, S. E518–E527.

[90] Giménez, M. C.; Beersma, D. G. M.; Bollen, P.; van der Linden, M. L.; Gordijn, M. C. M.: Effects of a chronic reduction of short-wavelength light input on melatonin and sleep patterns in humans. Evidence for adaptation. In: Chronobiology international 31 (2014) 5, S. 690–697.

[91] Cajochen, C.; Frey, S.; Anders, D.; Späti, J.; Bues, M.; Pross, A.; Mager, R.; Wirz-Justice, A.; Stefani, O.: Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. In: Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985) 110 (2011) 5, S. 1432–1438.

[92] Wahnschaffe, A.; Haedel, S.; Rodenbeck, A.; Stoll, C.; Rudolph, H.; Kozakov, R.; Schoepp, H.; Kunz, D.: Out of the lab and into the bathroom: evening short-term exposure to conventional light suppresses melatonin and increases alertness perception. In: International journal of molecular sciences 14 (2013) 2, S. 2573–2589.

[93] Santhi, N.; Thorne, H. C.; van der Veen, D. R.; Johnsen, S.; Mills, S. L.; Hommes, V.; Schlangen, L. J. M.; Archer, S. N.; Dijk, D.-J.: The spectral composition of evening light and individual differences in the suppression of melatonin and delay of sleep in humans. In: Journal of Pineal Research 53 (2012) 1, S. 47–59.

[94] Santhi, N.; Groeger, J. A.; Archer, S. N.; Gimenez, M.; Schlangen, L. J. M.; Dijk, D.-J.: Morning sleep inertia in alertness and performance. Effect of cognitive domain and white light conditions. In: PloS one 8 (2013) 11, e79688.

[95] Canazei, M.; Pohl, W.; Bliem, H. R.; Weiss, E. M.: Acute effects of different light spectra on simulated night-shift work without circadian alignment. In: Chronobiology international 34 (2017) 3, S. 303–317.

[96] Hanifin, J. P.; Lockley, S. W.; Cecil, K.; West, K.; Jablonski, M.; Warfield, B.; James, M.; Ayers, M.; Byrne, B.; Gerner, E.; Pineda, C.; Rollag, M.; Brainard, G. C.: Randomized trial of polychromatic blue-enriched light for circadian phase shifting, melatonin suppression, and alerting responses. In: Physiology & behavior 198 (2019), S. 57–66.

[97] Rahman, S. A.; St Hilaire, M. A.; Lockley, S. W.: The effects of spectral tuning of evening ambient light on melatonin suppression, alertness and sleep. In: Physiology & behavior 177 (2017), S. 221–229.

[98] Sletten, T. L.; Ftouni, S.; Nicholas, C. L.; Magee, M.; Grunstein, R. R.; Ferguson, S.; Kennaway, D. J.; O'Brien, D.; Lockley, S. W.; Rajaratnam, S. M. W.: Randomised controlled trial of the efficacy of a blue-enriched light intervention to improve alertness and performance in night shift workers. In: Occupational and environmental medicine 74 (2017) 11, S. 792–801.

[99] Shamsul, B.M.T.; Sia, C. C.; Ng, Y.G.; Karmegan, K.: Effects of Light's Colour Temperatures on Visual Comfort Level, Task Performances, and Alertness among Students. In: American Journal of Public Health Research 1 (2013) 7, S. 159–165.

[100] Choi, K.; Shin, C.; Kim, T.; Chung, H. J.; Suk, H.-J.: Awakening effects of blue-enriched morning light exposure on university students' physiological and subjective responses. In: Scientific Reports 9 (2019).

[101] Figueiro, M. G.; Kalsher, M.; Steverson, B. C.; Heerwagen, J.; Kampschroer, K.; Rea, M. S.: Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers. In: Lighting Research & Technology (2018), S. 171–183.

[102] Hartstein, L. E.; Durniak, M. T.; Karlicek, R. F.; Berthier, N. E.: A comparison of the effects of correlated colour temperature and gender on cognitive task performance. In: Lighting Research & Technology 50 (2017) 7, S. 1057–1069.

[103] Sahin, L.; Wood, B. M.; Plitnick, B.; Figueiro, M. G.: Daytime light exposure: effects on biomarkers, measures of alertness, and performance. In: Behavioural Brain Research 274 (2014), S. 176–185.

[104] Smolders, K. C.H.J.; Kort, Y. A.W. de: Investigating daytime effects of correlated colour temperature on experiences, performance, and arousal. In: Journal of Environmental Psychology 50 (2017), S. 80–93.

[105] Wei, M.; Houser, K. W.; Orland, B.; Lang, D. H.; Ram, N.; Sliwinski, M. J.; Bose, M.: Field study of office worker responses to fluorescent lighting of different CCT and lumen output. In: Light, lighting, and human behaviour 39 (2014), S. 62–76.

[106] Burattini, C.; Piccardi, L.; Curcio, G.; Ferlazzo, F.; Giannini, A. M.; Bisegna, F.: Cold LED lighting affects visual but not acoustic vigilance. In: Building and Environment 151 (2019), S. 148–155.

[107] Chang, A.-M.; Santhi, N.; St Hilaire, M.; Gronfier, C.; Bradstreet, D. S.; Duffy, J. F.; Lockley, S. W.; Kronauer, R. E.; Czeisler, C. A.: Human responses to bright light of different durations. In: The Journal of Physiology 590 (2012) Pt 13, S. 3103–3112.

[108] Dewan, K.; Benloucif, S.; Reid, K.; Wolfe, L. F.; Zee, P. C.: Light-Induced Changes of the Circadian Clock of Humans. Increasing Duration is More Effective than Increasing Light Intensity. In: Sleep 34 (2011) 5, S. 593–599.

[109] Huiberts, L. M.; Smolders, K.C.H.J.; Kort, Y.A.W. de: Shining light on memory: Effects of bright light on working memory performance. In: Behavioural Brain Research 294 (2015), S. 234–245.

[110] Münch, M.; Nowozin, C.; Regente, J.; Bes, F.; Zeeuw, J. de; Hädel, S.; Wahnschaffe, A.; Kunz, D.: Blue-Enriched Morning Light as a Countermeasure to

Light at the Wrong Time. Effects on Cognition, Sleepiness, Sleep, and Circadian Phase. In: Neuropsychobiology 74 (2016) 4, S. 207–218.

[111] Vandewalle, G.; Balteau, E.; Phillips, C.; Degueldre, C.; Moreau, V.; Sterpenich, V.; Albouy, G.; Darsaud, A.; Desseilles, M.; Dang-Vu, T. T.; Peigneux, P.; Luxen, A.; Dijk, D.-J.; Maquet, P.: Daytime Light Exposure Dynamically Enhances Brain Responses. In: Current Biology 16 (2006) 16, S. 1616–1621.

[112] Cajochen, C.: Alerting effects of light. In: Sleep medicine reviews 11 (2007) 6, S. 453–464.

[113] Rüger, M.; Gordijn, M. C. M.; Beersma, D. G. M.; Vries, B. de; Daan, S.: Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology. Comparison of daytime and nighttime exposure. In: American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology 290 (2006) 5, R1413–20.

[114] Smith, K. A.; Schoen, M. W.; Czeisler, C. A.: Adaptation of human pineal melatonin suppression by recent photic history. In: The Journal of clinical endocrinology and metabolism 89 (2004) 7, S. 3610–3614.

[115] Hébert, M.; Martin, S. K.; Lee, C.; Eastman, C. I.: The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. In: Journal of Pineal Research 33 (2002) 4, S. 198–203.

[116] Chang, A.-M.; Scheer, F. A. J. L.; Czeisler, C. A.: The human circadian system adapts to prior photic history. In: The Journal of Physiology 589 (2011) Pt 5, S. 1095–1102.

[117] Kozaki, T.; Kubokawa, A.; Taketomi, R.; Hatae, K.: Effects of day-time exposure to different light intensities on light-induced melatonin suppression at night. In: Journal of physiological anthropology 34 (2015) 1, S. 27.

[118] Chang, A.-M.; Scheer, F. A. J. L.; Czeisler, C. A.; Aeschbach, D.: Direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans depend on prior light history. In: Sleep 36 (2013) 8, S. 1239–1246.

[119] Burgess, H. J.; Crowley, S. J.; Gazda, C. J.; Fogg, L. F.; Eastman, C. I.: Preflight Adjustment to Eastward Travel:3 Days of Advancing Sleep with and without Morning Bright Light. In: Journal of biological rhythms 18 (2003) 4, S. 318–328.

[120] Gronfier, C.; Wright, K. P.; Kronauer, R. E.; Jewett, M. E.; Czeisler, C. A.: Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans. In: American journal of physiology. Endocrinology and metabolism 287 (2004) 1, S. 81.

[121] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Biologisch wirksame Beleuchtung - Planungsempfehlungen (2013) DIN SPEC 67600. Berlin.

[122] Kort, Y. de; Smolders, K.: Effects of dynamic lighting on office workers. First results of a field study with monthly alternating settings. In: Lighting Research and Technology 42 (2010) 3, S. 345–360.

[123] Ye, M.; Zheng, S. Q.; Wang, M. L.; Luo, M. R.: The effect of dynamic correlated colour temperature changes on alertness and performance. In: Lighting Research & Technology 50 (2017) 7, S. 1070–1081.

[124] Lowden, A.; Åkerstedt, T.: Assessment of a new dynamic light regimen in a nuclear power control room without windows on quickly rotating shiftworkers--effects on health, wakefulness, and circadian alignment. A pilot study. In: Chronobiology international 29 (2012) 5, S. 641–649.

[125] Canazei, M.: Laboratory experiment regarding impact on productivity through dynamic lighting 2013.

[126] Canazei, M.; Dehoff, P.: Effect of changing room light on the productivity of permanent morning shift workers at industrial workstations 2013.

[127] Canazei, M.; Dehoff, P.; Staggl, S.; Pohl, W.: Effects of dynamic ambient lighting on female permanent morning shift workers. In: Lighting Research and Technology 46 (2014) 2, S. 140–156.

[128] Kocaoğlu, R.: The Effects of correlated color temperature on sustained attention and mood of university students in learning environments, Masterthesis. Ankara 2015.

[129] Barkmann, C.; Wessolowski, N.; Schulte-Markwort, M.: Applicability and efficacy of variable light in schools. In: Physiology & behavior 105 (2012) 3, S. 621–627.

[130] Wessolowski, N.; Koenig, H.; Schulte-Markwort, M.; Barkmann, C.: The effect of variable light on the fidgetiness and social behavior of pupils in school. In: Journal of Environmental Psychology 39 (2014), S. 101–108.

[131] Mott, M. S.; Robinson, D. H.; Walden, A.; Burnette, J.; Rutherford, A. S.: Illuminating the Effects of Dynamic Lighting on Student Learning. In: SAGE Open 2 (2012) 2.

[132] Sleegers, P.; Moolenaar, N.; Galetzka, M.; Pruyn, A.; Sarroukh, B.; van der Zande, B.: Lighting affects students' concentration positively: Findings from three Dutch studies. In: Lighting Research and Technology 45 (2013) 2, S. 159–175.

[133] Keis, O.; Helbig, H.; Streb, J.; Hille, K.: Influence of blue-enriched classroom lighting on students′ cognitive performance. In: Trends in Neuroscience and Education 3 (2014) 3–4, S. 86–92.

[134] Huber, O.: Das psychologische Experiment. Eine Einführung : mit fünfundfünfzig Cartoons aus der Feder des Autors, 6., überarbeitete Auflage 2013.

[135] Pokorny, J.; Smith, V. C.; Lutze, M.: Aging of the human lens. In: Applied optics 26 (1987) 8, S. 1437–1440.

[136] Yanoff, M.; Duker, J. S.: Ophthalmology, Fourth edition.

[137] van de Kraats, J.; van Norren, D.: Optical density of the aging human ocular media in the visible and the UV. In: Journal of the Optical Society of America A 24 (2007) 7, S. 1842.

[138] Richdale, K.: Ocular and Refractive Considerations for the Ageing Eye. In: Contact Lens Spectrum (2009).

[139] Winn, B.; Whitaker, D.; Elliott, D. B.; Phillips, N. J.: Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects. In: Investigative Ophthalmology & Visual Science 35 (1994) 3, S. 1132–1137.

[140] Keunen, J. E.; van Norren, D.; van Meel, G J: Density of foveal cone pigments at older age. In: Investigative Ophthalmology & Visual Science 28 (1987) 6, S. 985–991.

[141] Adrian, W. K.: Visual Performance, Acuity and Age. Lux Europa Proceedings of the VIIth European Lighting Conference. In: London: CIBSE (1993).

[142] Gesundheitsfaktor Licht. Frankfurt am Main 20]12.

[143] van Duijnhoven, J.; Aarts, M.P.J.; Rosemann, A.L.P.; Kort, H.S.M.: Ambiguities regarding the relationship between office lighting and subjective alertness. An exploratory field study in a Dutch office landscape. In: Building and Environment 142 (2018), S. 130–138.

[144] Knez, I.: Effects of indoor lighting on mood and cognition. In: Journal of Environmental Psychology 15 (1995) 1, S. 39–51.

[145] Knez, I.: Effects of colour of light on nonvisual psychological processes. In: Journal of Environmental Psychology 21 (2001) 2, S. 201–208.

[146] Horne, J. A.; Östberg, O.: A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythm. In: International Journal of Chronobiology 4 (1976), S. 97–100.

[147] Roenneberg, T.; Wirz-Justice, A.; Merrow, M.: Life between Clocks: Daily Temporal Patterns of Human Chronotypes. In: Journal of biological rhythms 18 (2003) 1, S. 80–90.

[148] Zavada, A.; Gordijn, M.; Beersma, D.; Daan, S.; Roenneberg, T.: Comparison of the Munich Chronotype Questionnaire with the Horne-Östberg's Morningness-Eveningness score. In: Chronobiology international 22 (2005) 2, S. 267–278.

[149] Roenneberg, T.: Having Trouble Typing? What on Earth Is Chronotype? In: Journal of biological rhythms 30 (2015) 6, S. 487–491.

[150] Martin, J. S.; Hébert, M.; Ledoux, E.; Gaudreault, M.; Laberge, L.: Relationship of chronotype to sleep, light exposure, and work-related fatigue in student workers. In: Chronobiology international 29 (2012) 3, S. 295–304.

[151] Buschkens, J.; Graham, D.; Cottrell, D.: Well-being Under chronic stress. Is morningness an advantage? In: Stress and Health 26 (2010) 4, S. 330–340.

[152] Kantermann, T.; Forstner, S.; Halle, M.; Schlangen, L.; Roenneberg, T.; Schmidt-Trucksäss, A.: The stimulating effect of bright light on physical performance depends on internal time. In: PloS one 7 (2012) 7.

[153] Maierova, L.; Borisuit, A.; Scartezzini, J.-L.; Jaeggi, S. M.; Schmidt, C.; Münch, M.: Diurnal variations of hormonal secretion, alertness and cognition in extreme chronotypes under different lighting conditions. In: Scientific Reports 6 (2016).

[154] Lafrance, C.; Dumont, M.; Lespérance, P.; Lambert, C.: Daytime Vigilance after Morning Bright Light Exposure in Volunteers Subjected to Sleep Restriction. In: Physiology & behavior 63 (1998) 5, S. 803–810.

[155] Wright, K. P.; Badia, P.; Myers, B.; Plenzler, S.: Combination of bright light and caffeine as a countermeasure for impaired alertness and performance during extended sleep deprivation. In: Journal of Sleep Research 6 (1997) 1, S. 26–35.

[156] Krüger, J.; Schierz, C.: Modell zur Beanspruchungsregulation bei schlechter Beleuchtung. Davos 2018.

[157] Baron, R. A.; Rea, M. S.; Daniels, S. G.: Effects of indoor lighting (illuminance and spectral distribution) on the performance of cognitive tasks and interpersonal behaviors. The potential mediating role of positive affect. In: Motivation and Emotion 16 (1992) 1, S. 1–33.

[158] Newsham, G.; Veitch, J.: Lighting quality recommendations for VDT offices. A new method of derivation. In: Lighting Research & Technology 33 (2001) 2, S. 97–113.

[159] Bandura, A.: Self-efficacy mechanism in human agency. In: American Psychologist 37 (1982) 2, S. 122–147.

[160] Begemann, S.H.A.; van den Beld, G. J.; Tenner, A. D.: Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses. In: International Journal of Industrial Ergonomics 20 (1997) 3, S. 231–239.

[161] van Bommel, Ir WJM; van den Beld, G; Lighting, P.; Eindhoven, N.: Beleuchtung am Arbeitsplatz: Visuelle und biologische Effekte (2004).

[162] Rothert, I.; Völker, S.: Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Aufmerksamkeitssteigerung durch biologisch wirksames Licht: Licht 2016. Karlsruhe, 25. – 28. September, Tagungsband - Proceedings. Karlsruhe 2016.

[163] Straßer, T.; Rothert, I.; Heine, T.; Peters, T.: AuReTim – A low-cost and extensible open-source auditive psychomotor vigilance test. Manuskript submitted for publication (2019).

[164] Neurobehavioral Systems: Psych Lab 101 for iPad, iPhone, and Android devices! https://www.neurobs.com/menu_presentation/menu_teaching/psych_lab_101. Abrufdatum: 05.03.2019

[165] Basner, M.; Mollicone, D.; Dinges, D. F.: Validity and Sensitivity of a Brief Psychomotor Vigilance Test (PVT-B) to Total and Partial Sleep Deprivation. In: Acta astronautica 69 (2011) 11–12, S. 949–959.

[166] Khitrov, M. Y.; Laxminarayan, S.; Thorsley, D.; Ramakrishnan, S.; Rajaraman, S.; Wesensten, N. J.; Reifman, J.: PC-PVT: a platform for psychomotor vigilance task testing, analysis, and prediction. In: Behavior research methods 46 (2014) 1, S. 140–147.

[167] Åkerstedt, T.; Gillberg, M.: Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. In: International Journal of Neuroscience 52 (1990) 1–2, S. 29–37.

[168] Leiner, D. J.: SoSci Survey 2016.

[169] Buysse, D. J.; Reynolds Iii, C. F.; Monk, T. H.; Berman, S. R.; Kupfer, D. J.: The Pittsburgh sleep quality index: A new instrument for psychiatric practice and research. In: Psychiatry Research 28 (1989) 2, S. 193–213.

[170] Cohen, S.; Kamarck, T.; Mermelstein, R.: A Global Measure of Perceived Stress. In: Journal of Health and Social Behavior 24 (1983) 4, S. 385–396.

[171] Gandek, B.; Ware, J. E.; Aaronson, N. K.; Apolone, G.; Bjorner, J. B.; Brazier, J. E.; Bullinger, M.; Kaasa, S.; Leplege, A.; Prieto, L.; Sullivan, M.: Cross-Validation of

Item Selection and Scoring for the SF-12 Health Survey in Nine Countries. In: Journal of Clinical Epidemiology 51 (1998) 11, S. 1171–1178.

[172] Morfeld, M.; Kirchberger, I.; Bullinger, M.: SF-36 Fragebogen zum Gesundheitszustand. Deutsche Version des Short Form-36 Health Survey 2, ergänzte und überarbeitete Version. Manual.[SF-36–German version of the Short Form-36 Health Survey 2, revised version. Manual] (2011).

[173] Gräfe, K.; Zipfel, S.; Herzog, W.; Löwe, B.: Screening psychischer Störungen mit dem "Gesundheitsfragebogen für Patienten (PHQ-D)". In: Diagnostica 50 (2004) 4, S. 171–181.

[174] Kroenke, K.; Spitzer, R. L.; Williams, Janet B. W.: The PHQ-9. In: Journal of General Internal Medicine 16 (2001) 9, S. 606–613.

[175] Hygge, S.; Knez, I.: Effects of noise, heat and indoor lighting on cognitive performance and self-reported affect. In: Journal of Environmental Psychology 21 (2001) 3, S. 291–299.

[176] Klatte, M.; Bergström, K.; Lachmann, T.: Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children. In: Frontiers in psychology 4 (2013), S. 578.

[177] DIN EN 15251:2012-12, Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden_- Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN_15251:2007 (2012). Berlin.

[178] IPA TU Berlin: Studienteilnahme an der Technischen Universität Berlin. URL: https://proband.ipa.tu-berlin.de/. Abrufdatum 08.05.2019.

[179] Kuratorium Gutes Sehen e.V: KGS-Seh-Check. URL: https://www.sehen.de/service/seh-checks/. Abrufdatum 07.08.2017.

[180] Niedling, M.: Eine LED-Leuchte für die Forschung – Leuchtenentwicklung für das NiviL-Projekt. In: LICHT (2017) Ausgabe 1-2 2017, Pflaum Verlag, ISSN 0024-2861.

[181] Rothert, I.; Saathoff, B.; Völker, S.: Können dynamische Lichtwechsel des Beleuchtungsniveaus und der spektralen Verteilung die Aufmerksamkeit steigern?: Lux Junior 2017. Abstracts : 13. Forum für den Lichttechnischen Nachwuchs 8. bis 10. September 2017 Dörnfeld bei Illmenau. [Berlin], Illmenau 2017.

[182] Kuratorium Gutes Sehen e.V.: Nah-Seh-Check zum Ausdrucken. URL: https://www.seh-check.de/?download=494. Abrufdatum 08.05.2019.

[183] NeuroNation. Version 3.1.66. Synaptikon GmbH. https://www.neuronation.de/gehirnjogging/gehirnjogging-app-gratis. Abrufdatum: 08.05.2019

[184] Dentel, A.; Dietrich, U.: Thermische Behaglichkeit–Komfort in Gebäuden. In: Dokumentation Primero–Komfort. Hamburg, HafenCity Universität, Institut für Energie und Gebäude (2013).

[185] Cohen, J.: Statistical power analysis for the behaviors science.(2nd). In: New Jersey: Laurence Erlbaum Associates, Publishers, Hillsdale (1988).

[186] Carifio, J.; Perla, R.: Resolving the 50-year debate around using and misusing Likert scales. In: Medical education 42 (2008) 12, S. 1150–1152.

[187] Field, A.: Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics, 4th Edition 2013.
[188] Maxwell, S. E.; Delaney, H. D.; Kelley, K.: Designing Experiments and Analyzing Data. A Model Comparison Perspective 2004.
[189] Lumley, T.; Diehr, P.; Emerson, S.; Chen, L.: The Importance of the Normality Assumption in Large Public Health Data Sets. In: Annual Review of Public Health 23 (2002) 1, S. 151–169.
[190] Glass, G. V.; Peckham, P. D.; Sanders, J. R.: Consequences of Failure to Meet Assumptions Underlying the Fixed Effects Analyses of Variance and Covariance. In: Review of Educational Research 42 (2016) 3, S. 237–288.
[191] Jaccard, J.; Jaccard, J.: Interaction effects in factorial analysis of variance 1998.
[192] Vries, A. de; Souman, J. L.; Ruyter, B. de; Heynderickx, I.; Kort, Y. A.W. de: Lighting up the office. The effect of wall luminance on room appraisal, office workers' performance, and subjective alertness. In: Building and Environment 142 (2018), S. 534–543.
[193] Boyce, P.; Hunter, C.; Howlett, O.: The benefits of daylight through windows. In: Troy, New York: Rensselaer Polytechnic Institute (2003).
[194] Veitch, J. A.; Gifford, R.: Assessing Beliefs about Lighting Effects on Health, Performance, Mood, and Social Behavior. In: Environment and Behavior 28 (2016) 4, S. 446–470.
[195] Beute, F.; Kort, Y.A.W. de: Let the sun shine! Measuring explicit and implicit preference for environments differing in naturalness, weather type and brightness. In: Journal of Environmental Psychology 36 (2013), S. 162–178.
[196] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Lichtmessung - Teil 7: Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten. (2017) DIN 5032-7. Berlin.
[197] JETI Technische Instrumente GmbH: Short Instructions Spectroradiometer specbos 1201/ 1301/ 1401. https://www.jeti.com/cms/images/jeti_com/down/operating_instructions/instruments/short_scb1201.pdf. Abrufdatum: 02.05.2019

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Beispiele für nicht-visuelle Wirkungen von Licht 2
Abbildung 1.2: Aufbau des Auges und Schema der Fotorezeptoren der Netzhaut, Bild: licht.de [11] 3
Abbildung 1.3: Tageszeitabhängiger Verlauf des Hormonspiegels von Melatonin und Cortisol, Bild: licht.de [11] 4
Abbildung 1.4: Modellbild zu nicht-visuellen Wirkungen von Licht 5
Abbildung 2.1: Einflussfaktoren auf die nichtvisuelle Wirkung von Licht nach [69, 71] 19
Abbildung 2.2: Aktionsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ der ipRGC-Zellen im Vergleich zur Hellempfindlichkeit V(λ), Bild: licht.de [11] 21
Abbildung 2.3: Circadianer Tagesverlauf der Leistungsbereitschaft, Bild: licht.de [11] 36
Abbildung 2.4: Beispiel für zwei dynamische Beleuchtungslösungen: A soll natürlichen Tageslichtverlauf simulieren und B soll kurzfristiger Aktivierung dienen, Bild: licht.de [11] 39
Abbildung 4.1: Übersicht der Hypothesen und Forschungsfragen sowie Zuordnung zu den Versuchen 58
Abbildung 4.2: Übersicht aller Variablen und Operationalisierungen. In den gelben runden Markierungen ist angegeben, in welchen Versuchen sie verwendet werden. 59
Abbildung 4.3: Übersicht über die verwendeten Testverfahren 61
Abbildung 4.4: Zielobjekte und Distraktoren des d2R-Tests [52] 62
Abbildung 4.5: Beobachteter Lerneffekt des d2R-Tests im Vorversuch 63
Abbildung 4.6 Screenshot des Vigilanztests bei unkritischem Reiz (links) und kritischem Reiz (rechts) 66
Abbildung 4.7: Design der Laborstudie 1 69
Abbildung 4.8: Fotos des Versuchsraums, links: 2 200 K, rechts: 12 000 K [181] 73
Abbildung 4.9: Grundriss des Versuchsraums mit Leuchtenanordnung 73
Abbildung 4.10: Spektrale Verteilungen der Lichtszenen 74
Abbildung 4.11: Repräsentatives Leuchtdichtebild des Labors ohne Trennwand bei 500 lx aus Beobachterposition der Probanden (oben) und zugehöriges Kamerabild (unten) 75
Abbildung 4.12: Ablauf der Tests (D = d2R, A = Audio, T = Tablet) und Fragebögen (FB) im Versuch 77
Abbildung 4.13: Übersicht Design Laborversuch 2 79
Abbildung 4.14: Spektrale Verteilungen der Lichtszenen 82
Abbildung 4.15: Versuchsablauf der Trainings- und Versuchsphase (FB = Fragebogen) ... 85
Abbildung 4.16: Schematische Übersicht der Versuchsmethodik 87
Abbildung 4.17: Grundriss des Hörsaals mit rot markiertem Sitzbereich der Probanden und lila markierter Position der Kontrollmessung 89
Abbildung 4.18: Fotos des Hörsaals unter den vier Lichtszenen 90
Abbildung 4.19: Spektrale Verteilungen der Lichtszenen 91

Abbildung 4.20: Eingetragene Messwerte (schwarze Kreuze) der Temperatur und relativen Luftfeuchte und gesamter Mittelwert (roter Punkt) im Behaglichkeitsfeld nach [184] 94
Abbildung 5.1: D2R-Test Konzentrationsleistung KL (oben) und Bearbeitete Zielobjekte BZO (unten) für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Haupteffekte der Beleuchtung sind markiert. 104
Abbildung 5.2: D2R-Test Fehlerprozente F% für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Interaktionseffekte der Beleuchtung sind markiert. 105
Abbildung 5.3: Reaktionszeit RT des Audiotests (oben) und des Tablettests (unten) für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Interaktionseffekte der Beleuchtung sind markiert. 108
Abbildung 5.4: KSS für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler 110
Abbildung 5.5: Items des Fragebogens zum Wohlbefinden pro Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Zeit sind markiert. 113
Abbildung 5.6: Item gelangweilt für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Beleuchtung sind markiert. 114
Abbildung 5.7: Item motiviert für Zeit * E, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Beleuchtung sind markiert. 114
Abbildung 5.8: Akzeptanz der Beleuchtung für E * CCT, Fehlerbalken = Standardfehler 117
Abbildung 5.9: Beleuchtungsstärkeniveaus für d2R-Test (oben) und Audio- und Tablettest (unten), Fehlerbalken = Standardfehler 119
Abbildung 5.10: D2R-Test KL für Lichtszene * Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Zeit sind markiert. 126
Abbildung 5.11: D2R-Test BZO (oben) und F% (unten) für Lichtszene * Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Zeit sind markiert. 127
Abbildung 5.12: KSS für Lichtszene * Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler 129
Abbildung 5.13: Go-NoGo-Test Reaktionszeit für Lichtszene * Zeit, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte der Zeit sind markiert. 129
Abbildung 5.14: Wohlbefinden pro Zeit (oben) und Item munter pro Lichtszene (unten), Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte sind markiert. 132
Abbildung 5.15: Akzeptanz: Angenehm (oben) und Helligkeit (unten) pro Lichtszene, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte sind markiert. 136
Abbildung 5.16: Akzeptanz: Lichtfarbe (oben) und Blendung (unten) pro Lichtszene, Fehlerbalken = Standardfehler, signifikante Effekte sind markiert. 137
Abbildung 5.17: Hierarchie Beispiel für zwei Probanden und die abhängigen Variablen Konzentrationsleistung KL und Karolinska-Sleepiness-Scale KSS 143
Abbildung 5.18: Beispiel Modell für KL pro Woche: Regressionsgerade (gestrichelt) für ein Modell mit festem Anstieg a und Achsenabschnitt b sowie 3 Regressionsgeraden (durchgezogen) für 3 Probanden für ein Modell mit zufälligen Anstiegen $a_{Proband\ i}$ und Achsenabschnitten $b_{Proband\ i}$ 144
Abbildung 5.19: Mittelwerte der Konzentrationsleistung aller Probanden pro Zeitpunkt. Je vier Zeitpunkte ergeben eine Woche: Do. vor VL, Do. nach VL, Fr. vor VL und Fr. nach VL. Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler. 146

Abbildung 5.20: Mittelwerte der KSS pro Zeitpunkt. Je vier Zeitpunkte ergeben eine Woche: Do. vor VL, Do. nach VL, Fr. vor VL und Fr. nach VL. Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler. 151
Abbildung 5.21: Fragebogen zur subjektiven Aufmerksamkeit und zum Wohlbefinden, Fehlerbalken = Standardfehler 154
Abbildung 5.22: Akzeptanz der Beleuchtung, Fehlerbalken = Standardfehler. Signifikante Effekte p < 0,05 sind mit * markiert. 155
Abbildung 5.23: Konzentrationsleistung KL (oben) und KSS (unten) vs. empfundene Anstrengung beim d2R-Test 158
Abbildung 5.24: KSS vs. Wohlfühlen (oben) und KSS vs. Stress (unten) 159
Abbildung 5.25: Einfluss von Krankheit auf abhängige Variablen 162
Abbildung 5.26: Einfluss von Krankheit auf Wohlfühlen (oben) und Stress (unten) pro Lichtszene 163
Abbildung 6.1: Übersicht der Überprüfung der Hypothesen 168
Abbildung 7.1: Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse 186
Abbildung A.1: Testbogen d2R-Test 213
Abbildung A.2: Laborstudien Fragebogen Teil 1 214
Abbildung A.3: Laborstudien Fragebogen Teil 2 215
Abbildung A.4: Laborstudien Fragebogen Teil 3 216
Abbildung A.5: Laborstudien Fragebogen Teil 4 217
Abbildung A.6: Hörsaalstudie: Fragebogen vor der Vorlesung Teil 1 218
Abbildung A.7: Hörsaalstudie: Fragebogen vor der Vorlesung Teil 2 219
Abbildung A.8: Hörsaalstudie: Zusätzliche Frage in Teil 1 des Fragebogens nach der Vorlesung 220
Abbildung A.9: Hörsaalstudie: Fragebogen nach der Vorlesung Teil 2 221
Abbildung A.10: Längsschnitt des Versuchsraums mit gelb eingezeichneten Lichtstärkeverteilungskurven 223
Abbildung A.11: Querschnitt des Versuchsraums mit gelb eingezeichneten Lichtstärkeverteilungskurven 224
Abbildung A.12: Räumliche Lichtverteilung: Messwerte in Beobachterposition für jeden der sechs Sitzplätze 226
Abbildung A.13: Repräsentatives Leuchtdichtebild, aufgenommen am Referenzmesspunkt in Beobachterrichtung 229
Abbildung A.14: Q-Q-Diagramme für KL #3 (oben) und BZO #3 (unten) 236
Abbildung A.15: Q-Q-Diagramme für F% #3 (oben) und Audio RT #1 (unten) 237
Abbildung A.16: Q-Q-Diagramme für Tablet RT #1 (oben) und KSS #1 (unten) 238
Abbildung A.17: Q-Q-Diagramme für Konzentriert #1 (oben) und Blendung (unten) 239
Abbildung A.18: Q-Q-Diagramme für KL #V (oben) und BZO #I (unten) 248
Abbildung A.19: Q-Q-Diagramme für F% #V (oben) und KSS #IV (unten) 249
Abbildung A.20: Q-Q-Diagramme für wohl #II (oben) und Angenehm #0 (unten) 250
Abbildung A.21: Q-Q-Diagramme für KL (oben) und KSS (unten) 256
Abbildung A.22: Q-Q-Diagramme für Ruhe (oben) und Lichtfarbe (unten) 257
Abbildung A.23: Konzentrationsleistung KL vs. Konzentration 260

Abbildung A.24: Konzentrationsleistung KL vs. Langweile 260
Abbildung A.25: KSS vs. Konzentration 261
Abbildung A.26: KSS vs. Munterkeit 261
Abbildung A.27: KSS vs. Motivation 262
Abbildung A.28: KSS vs. Langeweile 262

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Taxonomie der Aufmerksamkeit nach Sturm (2004) [34] 8
Tabelle 2.2: Anzahl der Studien aus Souman et al. (2018) [32], die Beleuchtungsstärke oder spektrale Verteilung und Aufmerksamkeit untersuchen, zusammengefasst hinsichtlich der statistischen Signifikanz 14
Tabelle 2.3: Anzahl der Studien aus Lok et al. (2018) [62], zusammengefasst hinsichtlich positiver, negativer und keiner Effekte der Beleuchtungsstärke 14
Tabelle 2.4: Beispiel von 3 Studien zum Einfluss der Beleuchtungsstärke auf Aufmerksamkeit und Performance mit unterschiedlichen Resultaten 24
Tabelle 2.5: Übersicht der Studien zur Beleuchtungsstärke 27
Tabelle 2.6: Übersicht der Studien zur spektralen Verteilung 32
Tabelle 4.1: Kategorien der Raumluftqualität nach CO_2-Konzentration laut DIN EN 15251:2012-12 [177] 68
Tabelle 4.2: Lichttechnische Parameter der Lichtszenen, vertikal auf Augenhöhe gemessen ($E_{\alpha\text{-opic}}$ wurde mit der Toolbox von [79] berechnet.) 74
Tabelle 4.3: Lichttechnische Parameter der Lichtszenen, vertikal auf Augenhöhe gemessen ($E_{\alpha\text{-opic}}$ wurde mit der Toolbox von [79] berechnet.) 81
Tabelle 4.4: Inhaltliche Zusammensetzung der Fragebögen (FB) 84
Tabelle 4.5: Lichttechnische Parameter der Lichtszenen , vertikal auf Augenhöhe gemessen ($E_{\alpha\text{-opic}}$ wurde mit der Toolbox von [79] berechnet.) 90
Tabelle 4.6: Zeitlicher Ablauf eines Versuchsdurchlaufs (VL = Vorlesung) 92
Tabelle 5.1 Hypothesen für die abhängigen Variablen der Laborstudie 1: Extreme Lichtbedingungen 96
Tabelle 5.2: Anzahl Fehler der Audio-Tests #1 und #2 98
Tabelle 5.3: Genauigkeit in Prozent der Tablet-Tests #1 und #2 99
Tabelle 5.4: Deskriptive Statistik der Messgrößen KL, BZO und F%; N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung 102
Tabelle 5.5: D2R-Test: Report der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen $p < 0,05$ sind hervorgehoben 103
Tabelle 5.6: Deskriptive Statistik der Messgrößen Audio RT und Tablet RT; N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung 106
Tabelle 5.7: Audiotest: Report der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen $p < 0,05$ sind hervorgehoben 107
Tabelle 5.8: Tablettest: Report der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen $p < 0,05$ sind hervorgehoben 107
Tabelle 5.9: Deskriptive Statistik der Messgröße KSS, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung 109
Tabelle 5.10: KSS: Report der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit) 110
Tabelle 5.11: Fragebogen zum Wohlbefinden: Report der Zwischensubjekteffekte der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen $p < 0,05$ sind hervorgehoben 111

Tabelle 5.12: Fragebogen zum Wohlbefinden: Report der Innersubjekteffekte der mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 112
Tabelle 5.13: Veränderung des Wohlbefindens pro Lichtszene 115
Tabelle 5.14: Deskriptive Statistik der Items Angenehm, Helligkeit, Lichtfarbe, Blendung, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung .. 116
Tabelle 5.15: Akzeptanz der Beleuchtung: Report der ANOVA (E * CCT), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 117
Tabelle 5.16 Hypothesen für die abhängigen Variablen der Laborstudie 2..... 122
Tabelle 5.17: Deskriptive Statistik der Messgrößen KL, BZO und F%; M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung, N Anzahl gültiger Fälle 125
Tabelle 5.18: D2R-Test: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 126
Tabelle 5.19: Deskriptive Statistik der Messgrößen Audio RT; M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung, N Anzahl gültiger Fälle..... 128
Tabelle 5.20: Auditiver Go-NoGo-Test: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 128
Tabelle 5.21: Deskriptive Statistik der Messgrößen KSS; M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung, N Anzahl gültiger Fälle..... 130
Tabelle 5.22: KSS: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben..... 130
Tabelle 5.23: Fragebogen Aufmerksamkeit und Wohlbefinden: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben..... 131
Tabelle 5.24: Veränderung des Wohlbefindens pro Lichtszene und Zeitpunkt..... 133
Tabelle 5.25: Deskriptive Statistik der Items Angenehm, Helligkeit, Lichtfarbe, Blendung, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung .. 134
Tabelle 5.26: Akzeptanz der Beleuchtung: Report der mixed ANOVA (Zeit * Lichtszene), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben..... 135
Tabelle 5.27 Hypothesen für die abhängigen Variablen der Hörsaalstudie 139
Tabelle 5.28: Test auf feste Effekte für KL Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben .. 149
Tabelle 5.29: Geschätzte Randmittel für KL pro Lichtszene 149
Tabelle 5.30: Bericht der Signifikanzen der paarweisen Vergleiche (Bonferroni), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 149
Tabelle 5.31: Test auf feste Effekte für KSS Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 152
Tabelle 5.32: Geschätzte Randmittel Lichtszene * Tag 153
Tabelle 5.33: Geschätzte Randmittel Tag * Zeitpunkt..... 153
Tabelle 5.34: Bericht von signifikanten Einflüssen (sign.) der abhängigen Variablen im KL- und KSS-Modell sowie maximale Mittelwertdifferenzen Δ_{max} 157
Tabelle 5.35: Einfluss von Kovariablen, * = signifikant mit p < 0,05, ** = Licht x Krankheit signifikant mit p < 0,05 161
Tabelle A.1: CO_2-Gehalt [ppm] Messwerte des Raumklimamessgeräts zu Beginn und Ende des Versuchs; VP – Anzahl Versuchspersonen 222
Tabelle A.2: Messwerte des Raumklimamessgeräts: CO_2-Gehalt in ppm; Temperatur T in °C; relative Luftfeuchte LF in %; VP – Anzahl Versuchspersonen..... 225

Tabelle A.3: Räumliche Lichtverteilung: Horizontale Beleuchtungsstärke für Referenzlichtszene gemessen auf den Tischen im Hörsaal im Sitzbereich 229
Tabelle A.4: Kontrollmessungen der Farbtemperatur CCT und der Beleuchtungsstärke vertikal auf Augenhöhe vor und nach jeder Vorlesung von der Raummitte aus 230
Tabelle A.5: Messwerte des Raumklimamessgeräts pro Vorlesung: CO_2-Gehalt in ppm – Minimum, Maximum und Mittelwert; Temperatur T in °C – Mittelwert; relative Luftfeuchte LF in % – Mittelwert 231
Tabelle A.6: Fragebogen-Item Geräuschpegel gemittelt pro Vorlesung und Anzahl Beschwerden wegen Lautstärke als Grund für eine Ablenkung im d2R-Test 231
Tabelle A.7: Signifikanztests auf Normalverteilung (KS = Kolmogorov-Smirnov, SW = Shapiro-Wilk) für die mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben 233
Tabelle A.8: Signifikanztests auf Normalverteilung (KS = Kolmogorov-Smirnov, SW = Shapiro-Wilk) für die mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben 234
Tabelle A.9: Signifikanzen der Voraussetzungsprüfung für die mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben 240
Tabelle A.10: Deskriptive Statistik, M – Mittelwert, SE - Standardfehler 241
Tabelle A.11: Signifikanzen der Voraussetzungsprüfung (Levene-Test) für die 3-stufige ANOVA für E, Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben 241
Tabelle A.12: Report der 3-stufigen ANOVA für E, Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 241
Tabelle A.13: Bericht der Signifikanzen der paarweisen Vergleiche (Bonferroni), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 241
Tabelle A.14: Deskriptive Statistik des Fragebogens, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung 242
Tabelle A.15: Signifikanztests auf Normalverteilung (KS = Kolmogorov-Smirnov, SW = Shapiro-Wilk) für die mixed ANOVA (Lichtszene * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben 244
Tabelle A.16: Signifikanzen der Voraussetzungsprüfung für die mixed ANOVA (Lichtszene * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben 251
Tabelle A.17: Deskriptive Statistik des Fragebogens, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung 252
Tabelle A.18: Der Haupteffekt Lichtszene wird nach Zeitpunkten aufgeschlüsselt (post-hoc Bonferroni, gilt für alle Akzeptanz Items bis auf Spalte Ausnahme). 254
Tabelle A.19: Der Haupteffekt Zeitpunkt wird nach Lichtszenen aufgeschlüsselt (post-hoc Bonferroni, gilt für alle Akzeptanz Items bis auf Spalte Ausnahme). 254
Tabelle A.20: Levene-Tests auf Varianzhomogenität 255
Tabelle A.21: Tests auf Normalverteilung für KL 256
Tabelle A.22: Deskriptive Statistik zur subjektiven Aufmerksamkeit und Wohlbefinden 258
Tabelle A.23: Bericht des festen Effekts Lichtszene 258
Tabelle A.24: Deskriptive Statistik zur Akzeptanz der Beleuchtung 259

Tabelle A.25: Bericht des festen Effekts Lichtszene, Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben 259

Formelzeichen und Abkürzungen

AF	Anzahl Auslassungsfehler des d2R-Tests
α_{mel}	Melanopischer Wirkungsfaktor
ANOVA	Varianzanalyse
AV	Abhängige Variable
BZO	Anzahl bearbeitete Zielobjekte des d2R-Tests
CCT	Ähnlichste Farbtemperatur
df	Freiheitsgrade
Do.	Donnerstag
E	Beleuchtungsstärke
EEG	Elektroenzephalogramm
E_h	Horizontale Beleuchtungsstärke
E_v	Vertikale Beleuchtungsstärke
$E_{\alpha\text{-}opic}$	α-opische Bestrahlungsstärke
F	F-Wert
F%	Fehlerrate des d2R-Tests
FB	Fragebogen
Fr.	Freitag
KAN	Kommission für Arbeitsschutz und Normung
KL	Konzentrationsleistung des d2R-Tests
KSS	Karolinska-Sleepiness-Scale
LMM	Linear gemischtes Modell
M	Arithmetischer Mittelwert
N	Anzahl
Nachm.	Nachmittags
p	p-Wert, Signifikanz
PVT	Psychomotor Vigilanz Test
R_a	Farbwiedergabeindex
RT	Reaktionszeit
SD	Standardabweichung
SE	Standardfehler
TU Berlin	Technische Universität Berlin
UV	Unabhängige Variable
VF	Anzahl Verwechslungsfehler des d2R-Tests
VL	Vorlesung
Δ_{max}	Maximale Mittelwertdifferenz
η^2	Partielles Eta-Quadrat, Effektstärke

Anhang

Anhang A – Versuchsdokumente

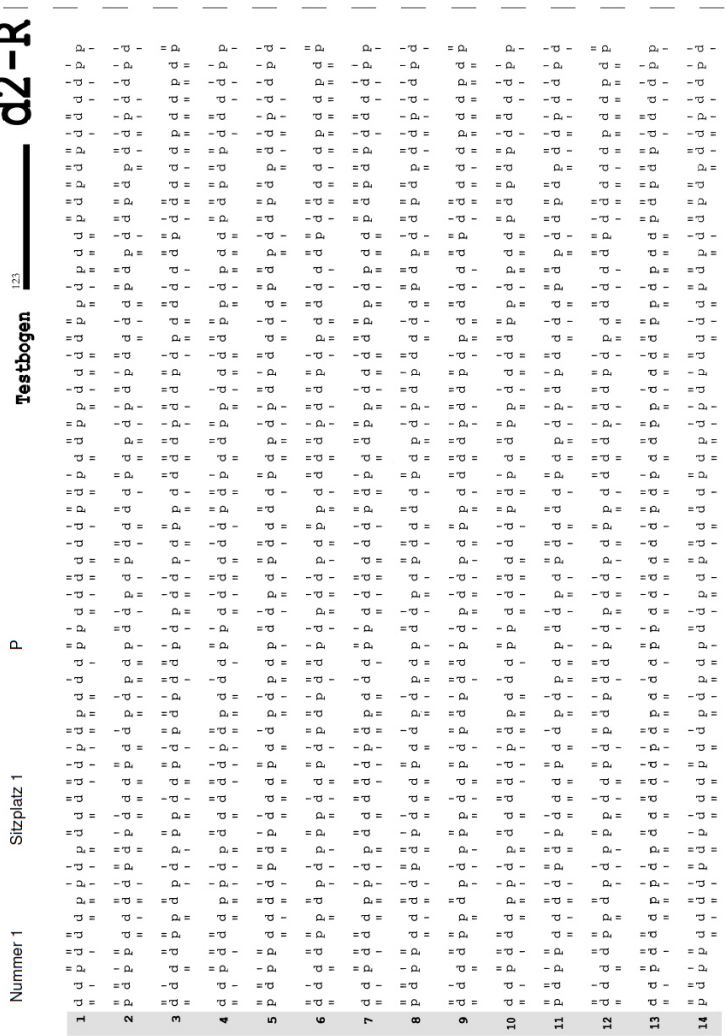


Abbildung A.1: Testbogen d2R-Test

Schwierigkeit des Versuchs

1. Zur Schwierigkeit der soeben durchgeführten Tests:

Der Durchstreichtest war...	nicht anstrengend	○	○	○	○	○	○	○	sehr anstrengend
Der Audiotest war...	nicht anstrengend	○	○	○	○	○	○	○	sehr anstrengend
Der Tablet-Test war...	nicht anstrengend	○	○	○	○	○	○	○	sehr anstrengend

2. Gab es Ablenkungen bei der Durchführung des Durchstreichtests?

○ Nein
○ Ja

Falls ja, warum waren Sie abgelenkt?

3. Gab es Ablenkungen bei der Durchführung des Audiotests?

○ Nein
○ Ja

Falls ja, warum waren Sie abgelenkt?

4. Gab es Ablenkungen bei der Durchführung des Tablet-Tests?

○ Nein
○ Ja

Falls ja, warum waren Sie abgelenkt?

Abbildung A.2: Laborstudien Fragebogen Teil 1

Wohlbefinden

1. Wie fühlst du dich momentan?

unwohl	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	wohl
unkonzentriert	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	konzentriert
interessiert	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	gelangweilt
nicht gestresst	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	gestresst
unruhig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	ruhig
demotiviert	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	motiviert
erschöpft	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	munter

2. Bitte bewerte deine momentane Müdigkeit (Skala 1-9 !).

Extrem wach		Wach		Weder wach noch müde		Müde, aber keine Schwierigkeiten wach zu bleiben		Extrem müde, mit dem Schlaf kämpfend
1	2	3	4	5	6	7	8	9
○	○	○	○	○	○	○	○	○

3. Hast du eine Veränderung deines Wohlbefindens von Beginn des Versuchs bis jetzt bemerkt?

○ Nein

○ Ja

Wenn ja, beschreibe diese bitte näher!

Abbildung A.3: Laborstudien Fragebogen Teil 2

Umgebungsbedingungen

Wie empfindest du die Umgebungsbedingungen im Raum?

1. Luftqualität

sehr schlecht ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr gut

2. Raumtemperatur

viel zu kalt ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ viel zu warm

3. Luftfeuchtigkeit

viel zu trocken ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ viel zu feucht

4. Geruch der Luft

sehr unangenehm ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr angenehm

5. Geräuschpegel

sehr leise ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr laut

6. künstliche Beleuchtung

sehr schlecht ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr gut

7. Helligkeit

viel zu dunkel ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ viel zu hell

8. Lichtfarbe

viel zu kalt ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ viel zu warm

9. Blendung

(Etwaige Reflexionen auf dem Tablet sind hier nicht gemeint.)

gar nicht ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr stark

Abbildung A.4: Laborstudien Fragebogen Teil 3

Biorhythmus

1. Wann bist du gestern schlafen gegangen?
Bitte verwende das Format hh:mm (z.B. 23:30)

[ ] Uhr

2. Wann bist du heute aufgestanden?
Bitte verwende das Format hh:mm (z.B. 06:30)

[ ] Uhr

3. Hast du gefrühstückt?

- ○ Nein
- ○ Ja

4. Hast du heute Morgen Kaffee oder ein koffeinhaltiges Getränk (z.B. Club-Mate, Grünen Tee, Redbull, Cola etc.) getrunken?

- ○ Nein
- ○ Ja

5. Zu deinem heutigen Aufenthalt im Freien:
Zu welcher Uhrzeit bist du ins Freie gegangen?

[ ] Uhr

Wie lange warst du im Freien?

[ ] min

6. Gibt es heute etwas Ungewöhnliches, z.B. schlecht geschlafen, erkältet, schlechte Laune oder auch besonders gute Laune?

- ○ Nein
- ○ Ja

Wenn ja, beschreibe dies bitte näher:

Abbildung A.5: Laborstudien Fragebogen Teil 4

Schwierigkeit des Versuchs

1. Der Durchstreichtest war ...

nicht anstrengend ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr anstrengend

2. Gab es Ablenkungen?

○ Nein
○ Ja

Falls ja, warum waren Sie abgelenkt?

Wohlbefinden

1. Wie fühlen Sie sich momentan?

unwohl	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	wohl
unkonzentriert	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	konzentriert
interessiert	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	gelangweilt
nicht gestresst	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	gestresst
unruhig	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	ruhig
demotiviert	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	motiviert
erschöpft	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	munter

2. Bitte bewerten Sie Ihre momentane Müdigkeit (Skala 1-9 !).

Extrem wach		Wach		Weder wach noch müde		Müde, aber keine Schwierigkeiten wach zu bleiben		Extrem müde, mit dem Schlaf kämpfend
1	2	3	4	5	6	7	8	9
○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung A.6: Hörsaalstudie: Fragebogen vor der Vorlesung Teil 1

Tagesablauf

1. Wann sind Sie gestern schlafen gegangen?

Uhr

2. Wann sind Sie heute aufgestanden?

Uhr

3. Wie haben Sie den Tag bisher verbracht (nur Do)?

Uni bzw. Arbeit		Stunden
Freizeit		Stunden
Körperliche Aktivität		Stunden
Aufenthalt im Freien bei Tageslicht		Stunden

4. Haben Sie Do: Mittag (warm oder kalt) / Fr: Frühstück gegessen?

- ○ Nein
- ○ Ja

5. Haben Sie in der letzten Stunde ein koffeinhaltiges Getränk getrunken oder beabsichtigen Sie in der Vorlesung ein koffeinhaltiges Getränk zu trinken (z.B. Kaffee, Cola, Mate, ...)?

- ○ Nein
- ○ Ja

6. Gibt es heute etwas Ungewöhnliches bei Ihnen (z.B. schlecht geschlafen, erkältet, Kopfschmerzen, Hunger, schlechte Laune...) ?

- ○ Nein
- ○ Ja

Wenn ja, beschreiben Sie bitte näher:

Abbildung A.7: Hörsaalstudie: Fragebogen vor der Vorlesung Teil 2

Teil 1 des Fragebogens nach der Vorlesung in der Hörsaalstudie war identisch zum Teil 1 des Fragebogens vor der Vorlesung (Abbildung A.6) mit folgender zusätzlicher Frage:

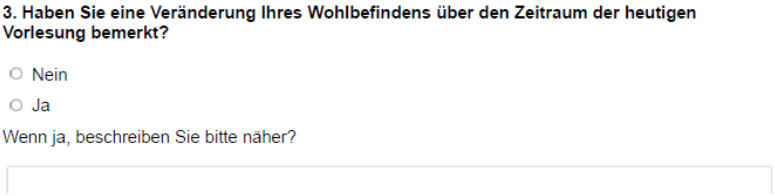


Abbildung A.8: Hörsaalstudie: Zusätzliche Frage in Teil 1 des Fragebogens nach der Vorlesung

Umgebungsbedingungen

Wie empfinden Sie die Umgebungsbedingungen im Raum?

1. Luftqualität

sehr schlecht ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr gut

2. Raumtemperatur

viel zu kalt ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ viel zu warm

3. Luftfeuchtigkeit

viel zu trocken ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ viel zu feucht

4. Geräuschpegel

sehr leise ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr laut

5. künstliche Beleuchtung

sehr schlecht ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr gut

6. Helligkeit

viel zu dunkel ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ viel zu hell

7. Lichtfarbe

viel zu kalt ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ viel zu warm

8. Blendung

gar nicht ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr stark

9. Lesbarkeit der Folien

sehr schlecht ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr gut

10. Vorlesung heute

sehr einfach ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr schwierig

Abbildung A.9: Hörsaalstudie: Fragebogen nach der Vorlesung Teil 2

Anhang B – Messdaten und Messunsicherheit

B1) Messdaten Laborstudie 1

Die CO_2-Konzentration im Versuchsraum wurde mit dem Messgerät TROTEC BZ30 zu Beginn und zum Ende des Versuchs bestimmt. Die Werte für jeden Versuchstag sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle A.1: CO_2-Gehalt [ppm] Messwerte des Raumklimamessgeräts zu Beginn und Ende des Versuchs; VP – Anzahl Versuchspersonen

Datum	VP	Lichtszene	CO_2 Beginn	CO_2 Ende
10.08.2016	6	2 200 K, 200 lx	-	-
11.08.2016	2	2 200 K, 1 000 lx	480	680
12.08.2016	3	12 000 K, 200 lx	500	700
15.08.2016	5	12 000 K, 200 lx	450	630
16.08.2016	5	12 000 K, 1 000 lx	400	600
17.08.2016	4	2 200 K, 500 lx	430	650
18.08.2016	5	2 200 K, 200 lx	440	730
19.08.2016	4	2 200 K, 1 000 lx	500	730
22.08.2016	4	2 200 K, 1 000 lx	440	-
23.08.2016	5	12 000 K, 200 lx	410	630
24.08.2016	4	12 000 K, 1 000 lx	445	-
25.08.2016	5	2 200 K, 500 lx	424	693
26.08.2016	3	2 200 K, 200 lx	470	690
29.08.2016	1	2 200 K, 200 lx	503	490
30.08.2016	5	2 200 K, 1 000 lx	448	-
31.08.2016	5	12 000 K, 200 lx	440	920
01.09.2016	6	12 000 K, 1 000 lx	470	960
02.09.2016	6	2 200 K, 500 lx	480	990
05.09.2016	4	2 200 K, 500 lx	444	475
06.09.2016	6	2 200 K, 200 lx	410	590
07.09.2016	2	2 200 K, 1 000 lx	460	560

08.09.2016	4	12 000 K, 200 lx	460	560
09.09.2016	5	12 000 K, 1 000 lx	430	630
12.09.2016	6	12 000 K, 1 000 lx	420	520
13.09.2016	5	2 200 K, 500 lx	430	600
14.09.2016	2	2 200 K, 200 lx	460	571
15.09.2016	5	2 200 K, 1 000 lx	480	580
16.09.2016	6	12 000 K, 200 lx	480	750
19.09.2016	4	12 000 K, 1 000 lx	450	-
20.09.2016	4	2 200 K, 500 lx	430	-
21.09.2016	6	2 200 K, 200 lx	480	750
22.09.2016	5	2 200 K, 1 000 lx	490	680
23.09.2016	3	12 000 K, 200 lx	580	631
26.09.2016	5	2 200 K, 1 000 lx	410	490
27.09.2016	6	12 000 K, 200 lx	430	530
28.09.2016	4	2 200 K, 200 lx	450	650
30.09.2016	6	2 200 K, 500 lx	480	690

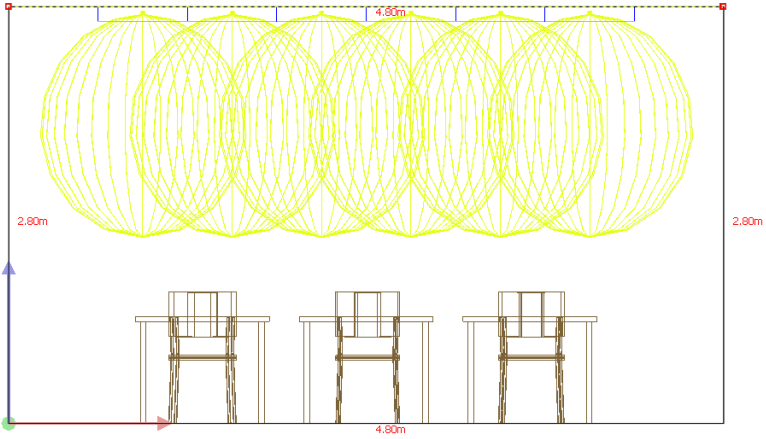


Abbildung A.10: Längsschnitt des Versuchsraums mit gelb eingezeichneten Lichtstärkeverteilungskurven

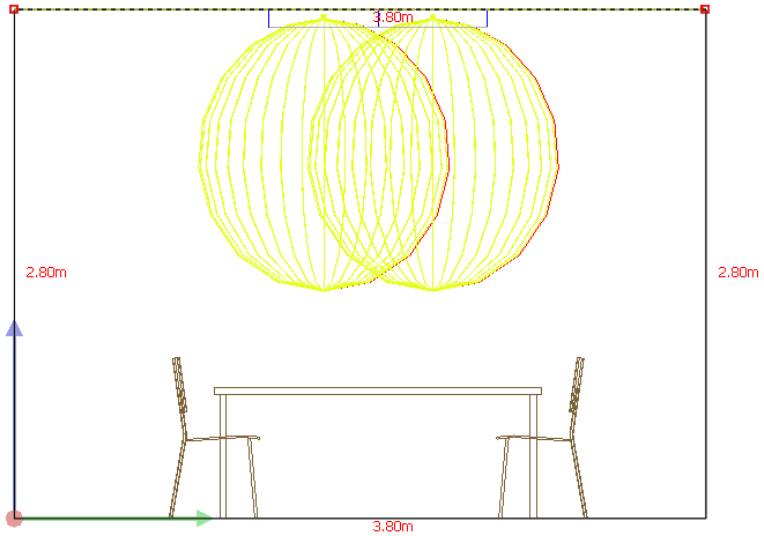


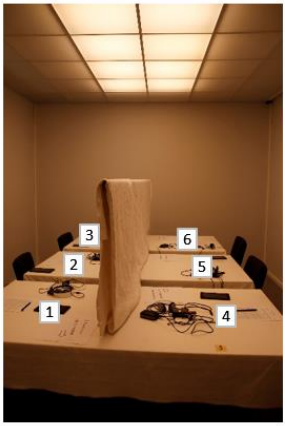
Abbildung A.11: Querschnitt des Versuchsraums mit gelb eingezeichneten Lichtstärkeverteilungskurven

B1) Messdaten Laborstudie 2

Die CO_2-Konzentration, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte im Versuchsraum wurden mit dem Messgerät TROTEC BZ30 protokolliert. Die Werte für jeden Versuchsnachmittag sind in der folgenden Tabelle aufgelistet: CO_2-Gehalt in ppm – Minimum, Maximum und Mittelwert; Temperatur T in °C – Mittelwert; relative Luftfeuchte LF in % – Mittelwert.

Tabelle A.2: Messwerte des Raumklimamessgeräts: CO_2-Gehalt in ppm; Temperatur T in °C; relative Luftfeuchte LF in %; VP – Anzahl Versuchspersonen

Datum	VP	Lichtszene	CO_2 min	CO_2 max	CO_2 mean	T mean	LF mean
23.01.2017	1	Statisch I	536	632	602,9	19,9	32,8
24.01.2017	3	Statisch I	639	809	755,7	20,5	33,3
25.01.2017	6	Statisch II	449	583	513,6	22,2	28,0
30.01.2017	3	Dynamisch	549	733	662,8	20,7	31,3
31.01.2017	3	Dynamisch	707	889	826,4	20,5	33,0
01.02.2017	4	Statisch II	847	1037	957,2	20,6	33,2
03.02.2017	3	Statisch I	1006	1198	1137,1	21,0	34,4
06.02.2017	2	Dynamisch	420	565	501,7	20,4	28,2
07.02.2017	6	Statisch I	557	893	744,1	20,7	31,9
08.02.2017	5	Statisch II	944	1182	1084,0	21,0	32,5
10.02.2017	2	Statisch II	855	976	935,1	21,0	32,0
13.02.2017	2	Statisch II	491	593	552,8	20,2	31,3
14.02.2017	3	Dynamisch	577	709	665,9	20,3	31,2
15.02.2017	3	Statisch II	805	933	871,5	20,6	31,9
16.02.2017	6	Dynamisch	997	1215	1136,8	21,0	33,1
17.02.2017	4	Statisch I	1290	1409	1365,6	21,2	36,7
20.02.2017	3	Statisch II	564	683	641,8	21,2	35,6
21.02.2017	4	Statisch II	600	730	679,9	21,6	36,5
22.02.2017	3	Dynamisch	601	715	669,8	21,6	38,2
23.02.2017	4	Dynamisch	585	723	677,1	21,7	39,2
24.02.2017	2	Statisch I	478	544	517,9	21,7	37,2
27.02.2017	3	Statisch II	441	578	532,6	21,6	36,1
28.02.2017	3	Statisch I	501	581	543,0	21,8	35,9
01.03.2017	6	Dynamisch	522	768	690,7	22,4	36,7
02.03.2017	1	Statisch I	577	624	610,1	22,0	36,5
03.03.2017	4	Statisch I	544	659	617,7	22,3	36,2
07.03.2017	4	Statisch I	487	692	622,7	22,4	35,5



1) 200 lx, 2 200 K	4) 200 lx, 2 200 K	1) 990 lx, 12 100 K	4) 990 lx, 12 370 K
2) 225 lx, 2 200 K	5) 220 lx, 2 200 K	2) 1 090 lx, 12 200 K	5) 1 080 lx, 12 330 K
3) 200 lx, 2 300 K	6) 200 lx, 2 200 K	3) 1 000 lx, 12 260 K	6) 980 lx, 12 470 K

Abbildung A.12: Räumliche Lichtverteilung: Messwerte in Beobachterposition für jeden der sechs Sitzplätze

B2) Messunsicherheit Laborstudien 1 und 2

Der Versuchsaufbau in den Laborstudien 1 und 2 war nahezu identisch. Einziger Unterschied war eine vertikale Trennwand aus weißem Moltonstoff, die in der zweiten Studie hinzukam. Die Einstellungen der Leuchten für die verwendeten Lichtszenen wurden an diese Trennwand angepasst und mit den gleichen Messgeräten nachgemessen. Die Messunsicherheit wird daher für beide Versuche gemeinsam betrachtet.

Beleuchtungsstärken wurden sowohl mit einem Luxmeter Mini-Lux von MX-ELECTRONIC der Messgeräteklasse B (Genauigkeit ≤ 10 % laut DIN 5032 [196]) und einem Spektroradiometer Jeti Specbos 1201 mit Diffusoraufsatz gemessen. Alle Spektren wurden ebenfalls mit dem Spektroradiometer Jeti Specbos 1201 (Datenblatt des Herstellers: [197]) aufgenommen. Der spektrale Bereich reicht von 380 nm bis 780 nm mit einer Genauigkeit von 0,5 nm. Die Reproduzierbarkeit der ähnlichsten

Farbtemperatur wird vom Hersteller mit ± 20 K angegeben und die Genauigkeit der Beleuchtungsstärke mit ± 5 %.

Beide Messgeräte wurden mit einem Stativ in vertikaler Position in Augenhöhe der sitzenden Probanden von 1,20 m mit Blickrichtung geradeaus verwendet. Die Blickrichtung der Probanden war nicht festgelegt, um reale Bürobedingungen zu simulieren. Wie viel Licht tatsächlich die Augen der Probanden erreicht, ist mit der vertikalen Messung nicht bestimmbar. Vielmehr handelt es sich um Referenzwerte, die konstante Versuchsbedingungen dokumentieren sollen. Zu Vergleichszwecken wurde weiterhin die horizontale Beleuchtungsstärke auf den Tischen mit dem Luxmeter gemessen. Der Versuchsraum befindet sich innerhalb eines schwarzen Labors, sodass es weder Tageslichteinfluss noch Streulicht von anderer Beleuchtung gab.

Es gab sechs Sitzplätze im Versuchsraum direkt unter den Leuchten. Die mittig sitzenden Probanden waren einer etwas höheren Beleuchtungsstärke von + 9,1 bis 12,5 % ausgesetzt als die am Rand Sitzenden (siehe Abbildung A.12). Die ähnlichste Farbtemperatur variierte nur geringfügig über die Sitzpositionen (max. 4,5 %, ebenfalls aus Abbildung A.12). Da die Probanden zufällig den Sitzpositionen zugeteilt wurden, werden diese Unterschiede vernachlässigt.

Nach der initialen Einstellung und Programmierung der Lichtszenen wurden die Messungen zu einem späteren Zeitpunkt zur Überprüfung wiederholt. An den Versuchstagen wurde die Lichtszene stets eine halbe Stunde vor Beginn eingeschaltet, um die Leuchten zu stabilisieren. Die Klimaanlage des Labors sorgte für konstante Bedingungen während der Versuche, sodass kein Einfluss der Temperatur, Luftfeuchte und der CO_2-Konzentration erwartet wird.

Die aufgeführten Messunsicherheiten der Beleuchtungsstärke und der Spektren bzw. ähnlichsten Farbtemperatur werden als akzeptabel für diese Arbeit gewertet. Der weitaus größere Unsicherheitsfaktor in den Experimenten ist der Faktor Mensch. Durch eine großzügige Erfassung

von Kovariablen wurde versucht diese Unsicherheit zu charakterisieren (siehe Abschnitt 5.3.7).

B3) Messdaten und -unsicherheit Hörsaalstudie

Die Beleuchtungsstärke und die Spektren inkl. ähnlichster Farbtemperatur wurden ebenso wie im Labor mit den Messgeräten Luxmeter Mini-Lux von MX-ELECTRONIC und Spektroradiometer Jeti Specbos 1201 mit Diffusoraufsatz gemessen (für Angaben zur Genauigkeit siehe vorheriger Abschnitt).

Die lichttechnischen Bedingungen im großen Hörsaal sind verschieden je nach Sitzposition. Um einen Bereich mit möglichst konstanten Bedingungen zu finden, wurden vorab die ähnlichste Farbtemperatur und die vertikale Beleuchtungsstärke in einem Raster (jede Reihe x jeder 3. Sitzplatz) mit dem Spektroradiometer unter der Referenzlichtszene gemessen. Das Messgerät wurde dabei stets auf den Tischen mit Blickrichtung geradeaus auf einem kleinen Stativ aufgestellt. Für die Probanden wurde der vordere und mittlere Bereich des Hörsaals ausgewählt als Kompromiss zwischen einer hohen Anzahl Sitzplätze und gleichmäßigen Bedingungen (siehe Abbildung 4.17 im Kapitel 4.5.3). Die vertikale Beleuchtungsstärke variiert in dem Bereich um bis zu ± 25 % und die ähnlichste Farbtemperatur um bis zu ± 5 %. Zusätzlich wurde die horizontale Beleuchtungsstärke im ausgewählten Bereich mit dem Luxmeter bestimmt (Tabelle A.3). Hier ergibt sich eine maximale Differenz von -20 % zum Referenzmesspunkt C/11 in der Raummitte.

An diesem Referenzmesspunkt wurden vor und nach jeder Vorlesung Kontrollmessungen mit dem Spektroradiometer und dem Luxmeter durchgeführt (siehe Tabelle A.4). Die Beleuchtungsstärke variierte durchschnittlich um ± 5 % und maximal um ± 18 %. Die CCT variierte durchschnittlich um ± 4 % und maximal um ± 7 %. Eine Ausnahme bildet die kaltweiße Lichtszene mit Abweichungen der CCT um bis zu ± 22 %. Mögliche Gründe sind das schwankende Verhalten von Leuchtstofflampen und die erhöhte Sensitivität gegenüber Änderungen

im kurzwelligen Bereich in der Berechnungsmethode der Farbtemperatur. Die Lichtszenen wurden 30 min vor Versuchsbeginn eingestellt, um die Beleuchtung zu stabilisieren.

Tabelle A.3: Räumliche Lichtverteilung: Horizontale Beleuchtungsstärke für Referenzlichtszene gemessen auf den Tischen im Hörsaal im Sitzbereich

Reihe \ Spalte	A	B	C	D	E
1	534	544	-	555	530
3	562	596	605	595	560
5	601	623	631	619	592
8	616	636	638	627	598
11	613	634	663	618	593
14	596	621	-	608	577

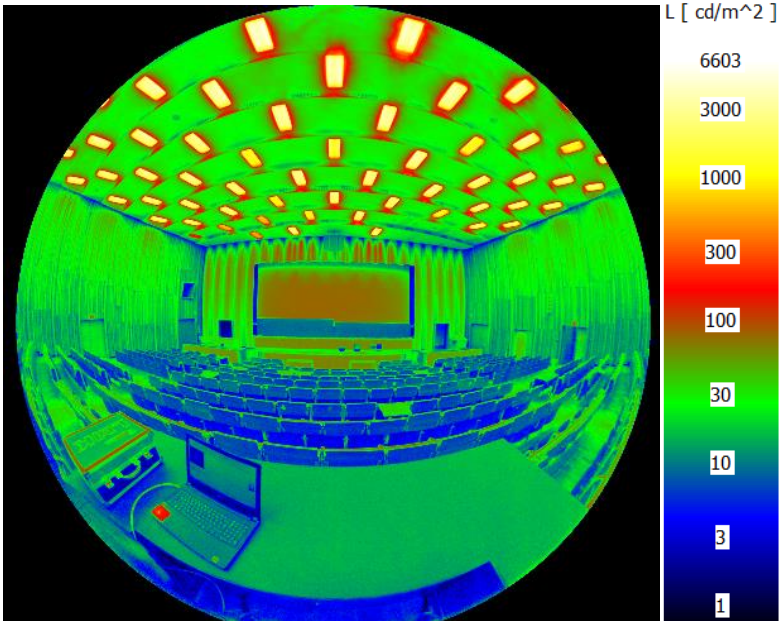


Abbildung A.13: Repräsentatives Leuchtdichtebild, aufgenommen am Referenzmesspunkt in Beobachterrichtung

Tabelle A.4: Kontrollmessungen der Farbtemperatur CCT und der Beleuchtungsstärke vertikal auf Augenhöhe vor und nach jeder Vorlesung von der Raummitte aus

	Vor der Vorlesung		Nach der Vorlesung	
Datum	**CCT [K]**	**E_v [lx]**	**CCT [K]**	**E_v [lx]**
03.11.2016	3978	202	4012	208
04.11.2016	4016	199	4046	236
10.11.2016	4057	191	3930	200
11.11.2016	3993	210	3935	207
17.11.2016	3768	416	3804	387
18.11.2016	3957	370	3973	360
24.11.2016	2297	195	2355	197
25.11.2016	2284	218	2273	208
01.12.2016	8063	200	9040	205
02.12.2016	10184	193	8146	187
08.12.2016	3927	180	3883	184
09.12.2016	3871	195	3896	185
05.01.2017	3927	185	3897	192
06.01.2017	4202	210	3850	211
12.01.2017	3981	185	3895	180
13.01.2017	4155	202	4100	200
19.01.2017	2275	200	2269	205
20.01.2017	2247	198	2250	197
26.01.2017	3784	412	3744	379
27.01.2017	4054	444	4080	401
02.02.2017	7593	182	7848	187
03.02.2017	10463	196	11000	195
09.02.2017	3960	186	3888	202
10.02.2017	3922	185	3848	187

Tabelle A.5: Messwerte des Raumklimamessgeräts pro Vorlesung: CO_2-Gehalt in ppm – Minimum, Maximum und Mittelwert; Temperatur T in °C – Mittelwert; relative Luftfeuchte LF in % – Mittelwert

Datum	CO_2 min	CO_2 max	CO_2 mean	T mean	LF mean
03.11.2016	439	1154	787,6	24,6	32,4
04.11.2016	476	859	638,5	23,3	35,3
10.11.2016	661	1016	838,6	24,8	27,8
11.11.2016	463	712	638,9	23,0	28,8
17.11.2016	714	1003	835,2	25,2	41,6
18.11.2016	451	718	623,3	23,7	39,9
24.11.2016	683	937	792,7	25,0	33,1
25.11.2016	477	705	600,2	23,8	34,2
01.12.2016	663	931	727,4	25,1	36,4
02.12.2016	487	837	603,2	23,5	28,7
08.12.2016	631	856	715,4	25,0	29,7
09.12.2016	477	705	600,2	23,8	34,2
05.01.2017	615	767	652,5	24,0	19,6
06.01.2017	533	690	615,3	23,0	19,9
12.01.2017	620	839	658,9	24,2	27,0
13.01.2017	421	733	606,7	23,2	30,2
19.01.2017	647	832	685,6	24,1	22,0
20.01.2017	501	704	628,6	22,9	23,1
26.01.2017	662	830	714,6	24,7	23,3
27.01.2017	602	735	646,8	23,8	21,0
02.02.2017	646	761	677,4	24,3	23,4
03.02.2017	536	695	621,9	23,7	26,5
09.02.2017	670	815	710,3	23,9	19,3
10.02.2017	488	693	626,3	22,9	19,6

Zusätzlich wurden die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte und CO_2-Konzentration) mit dem Messgerät TROTEC BZ30

und der Geräuschpegel über Fragebögen für jeden Versuchstag ermittelt, siehe Tabelle A.5 und Tabelle A.6 und Abschnitt 4.5.6.

Tabelle A.6: Fragebogen-Item Geräuschpegel gemittelt pro Vorlesung, Anzahl Beschwerden wegen Lautstärke als Grund für eine Ablenkung im d2R-Test

Datum	Geräusch -pegel	Anzahl Beschwerden Lautstärke vor VL	Anzahl Beschwerden Lautstärke nach VL
03.11.2016	4,0	24	7
04.11.2016	4,0	4	7
10.11.2016	4,4	19	4
11.11.2016	3,8	5	5
17.11.2016	4,3	9	4
18.11.2016	3,9	10	0
24.11.2016	4,2	22	2
25.11.2016	3,9	0	1
01.12.2016	4,4	16	8
02.12.2016	3,9	1	2
08.12.2016	4,2	8	7
09.12.2016	3,7	6	1
05.01.2017	4,0	8	1
06.01.2017	3,9	4	7
12.01.2017	4,3	7	6
13.01.2017	3,8	1	4
19.01.2017	4,2	5	1
20.01.2017	3,9	2	1
26.01.2017	4,3	7	6
27.01.2017	4,0	7	6
02.02.2017	4,4	21	0
03.02.2017	4,0	9	4
09.02.2017	4,1	2	2
10.02.2017	4,0	2	5

Anhang C – Tabellen aus Laborversuch 1

C1) Überprüfung der Normalverteilung

Tabelle A.7: Signifikanztests auf Normalverteilung (KS = Kolmogorov-Smirnov, SW = Shapiro-Wilk) für die mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben

Variable	Test	2 200K 200 lx	2 200K 500 lx	2 200K 1 000 lx	12 000K 200 lx	12 000K 1 000 lx
F #3	KS	< 0,001	0,022	0,032	0,012	0,001
	SW	< 0,001	0,001	< 0,001	0,001	< 0,001
F #4	KS	< 0,001	0,001	0,033	0,001	0,005
	SW	< 0,001	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,001
BZO #3	KS	0,200	0,200	0,200	0,050	0,200
	SW	0,989	0,107	0,068	0,015	0,452
BZO #4	KS	0,200	0,131	0,200	0,017	0,200
	SW	0,138	0,087	0,107	0,027	0,409
KL #3	KS	0,200	0,200	0,200	0,014	0,200
	SW	0,857	0,067	0,027	0,007	0,204
KL #4	KS	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
	SW	0,078	0,131	0,110	0,112	0,188
Audio RT #1	KS	0,084	0,200	0,036	0,022	0,015
	SW	0,138	0,023	0,113	< 0,001	0,007
Audio RT #2	KS	0,026	0,145	0,200	0,003	0,200
	SW	0,140	0,074	0,008	0,006	0,277
Tablet RT #1	KS	0,075	0,026	0,032	0,200	0,200
	SW	0,129	0,020	0,063	0,586	0,904
Tablet RT #2	KS	0,200	0,003	0,200	0,200	0,200
	SW	0,742	0,016	0,923	0,047	0,725
KSS #1	KS	0,004	0,009	< 0,001	0,002	< 0,001
	SW	0,033	0,006	< 0,001	0,013	< 0,001
KSS #2	KS	0,045	0,005	0,001	0,001	0,004
	SW	0,017	0,023	0,011	0,013	0,003
KSS #3	KS	0,001	0,017	0,019	0,002	0,033
	SW	0,028	0,019	0,019	0,015	0,035

Tabelle A.8: Signifikanztests auf Normalverteilung (KS = Kolmogorov-Smirnov, SW = Shapiro-Wilk) für die mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben

Variable	Test	2 200K 200 lx	2 200K 500 lx	2 200K 1 000 lx	12 000K 200 lx	12 000K 1 000 lx
Wohl #1	KS	0,033	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,009
	SW	0,002	0,003	0,001	< 0,001	0,031
Konzentriert #1	KS	0,001	0,007	< 0,001	< 0,001	0,002
	SW	0,001	0,024	< 0,001	< 0,001	0,009
Interessiert #1	KS	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,013
	SW	0,016	0,001	0,006	0,002	0,028
Ruhig #1	KS	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	0,049
	SW	< 0,001	0,002	0,002	< 0,001	0,013
Motiviert #1	KS	0,001	0,001	< 0,001	< 0,001	0,002
	SW	0,003	0,011	0,002	0,001	0,003
Munter #1	KS	0,004	0,034	0,001	0,007	0,002
	SW	0,064	0,092	0,023	0,011	0,013
Wohl #2	KS	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,004
	SW	0,015	0,001	0,001	0,002	0,018
Konzentriert #2	KS	0,060	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002
	SW	0,032	0,002	< 0,001	0,009	0,001
Interessiert #2	KS	0,114	0,002	0,001	< 0,001	0,001
	SW	0,019	0,005	0,008	< 0,001	0,010
Ruhig #2	KS	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001	< 0,001
	SW	0,001	< 0,001	0,006	0,001	< 0,001
Motiviert #2	KS	0,033	0,002	0,001	< 0,001	0,011
	SW	0,005	0,008	0,011	0,001	0,027
Munter #2	KS	0,013	0,021	0,002	0,003	0,002
	SW	0,049	0,035	0,043	0,019	0,008
Wohl #3	KS	0,006	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	SW	0,013	0,006	0,001	0,001	0,005
Konzentriert #3	KS	0,007	0,016	< 0,001	0,005	0,007
	SW	0,014	0,005	0,011	0,024	0,031
Interessiert #3	KS	0,010	0,091	0,094	0,002	0,004
	SW	0,046	0,012	0,017	0,010	0,020
Ruhig #3	KS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,004
	SW	0,001	< 0,001	0,002	0,001	0,001

Variable	Test	2 200K 200 lx	2 200K 500 lx	2 200K 1 000 lx	12 000K 200 lx	12 000K 1 000 lx
Motiviert #3	KS	0,046	0,041	0,005	< 0,001	0,001
	SW	0,020	0,025	0,014	0,005	< 0,001
Munter #3	KS	< 0,001	< 0,001	0,006	0,001	< 0,001
	SW	0,011	0,005	0,035	0,003	0,012
Angenehm	KS	0,048	0,002	0,009	< 0,001	< 0,001
	SW	0,084	0,019	0,079	0,022	0,002
Helligkeit	KS	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,024
	SW	0,010	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,052
Lichtfarbe	KS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
	SW	0,010	< 0,001	0,003	0,005	0,007
Blendung	KS	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003
	SW	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Alle signifikanten Abweichungen von der Normalverteilung wurden mittels Sichtprüfung der Q-Q-Plots überprüft. Ausgewählte worst-cases für jede Testvariable und zwei Fragebogen-Items finden sich in den nachfolgenden Abbildungen.

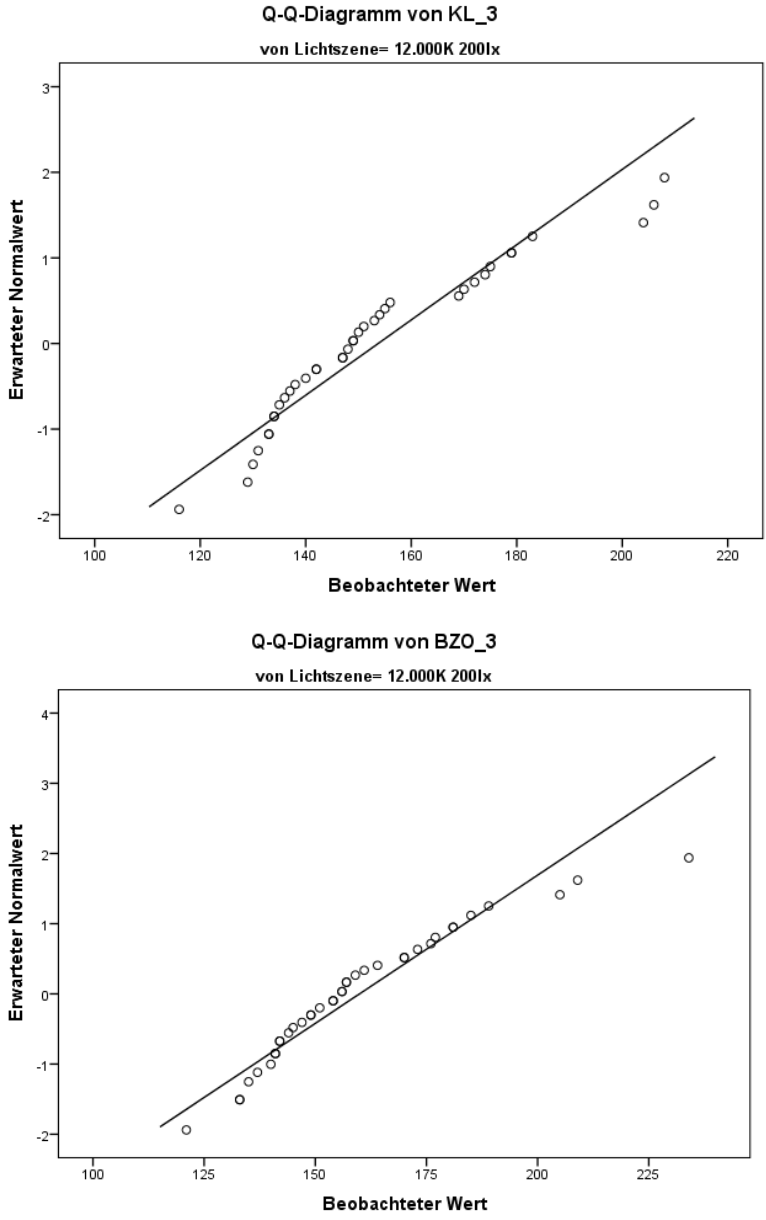


Abbildung A.14: Q-Q-Diagramme für KL #3 (oben) und BZO #3 (unten)

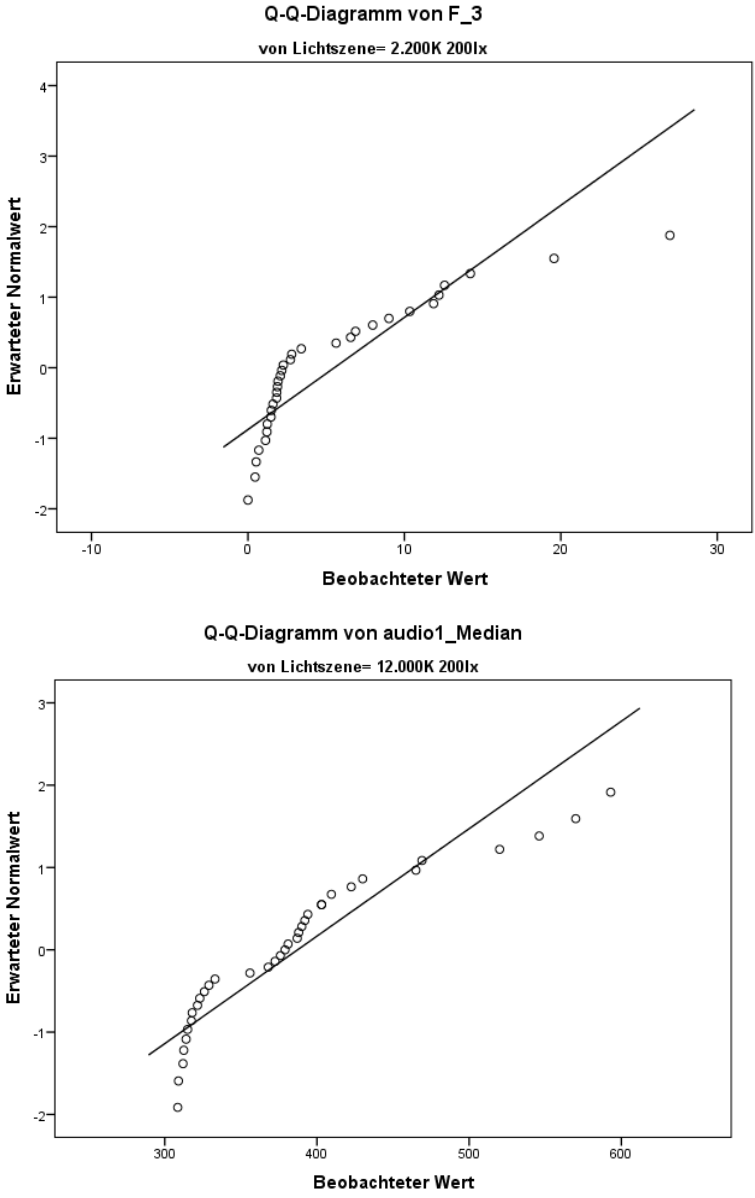


Abbildung A.15: Q-Q-Diagramme für F% #3 (oben) und Audio RT #1 (unten)

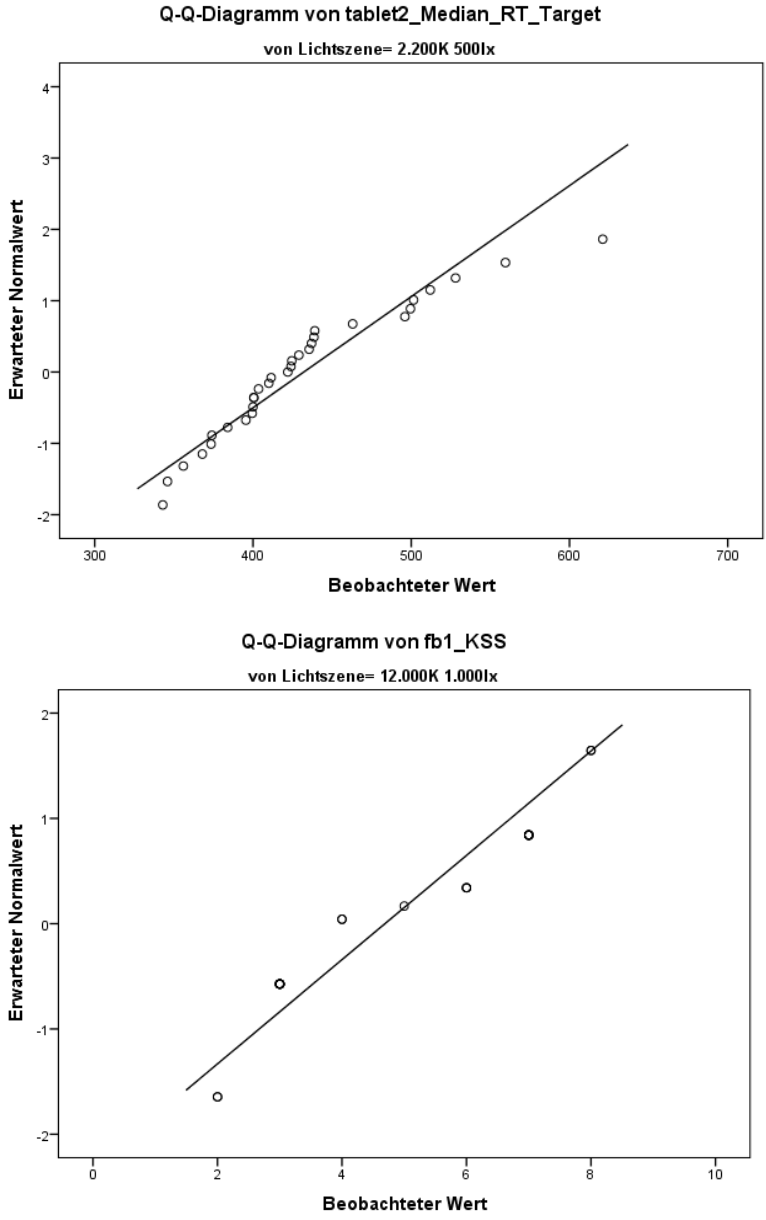


Abbildung A.16: Q-Q-Diagramme für Tablet RT #1 (oben) und KSS #1 (unten)

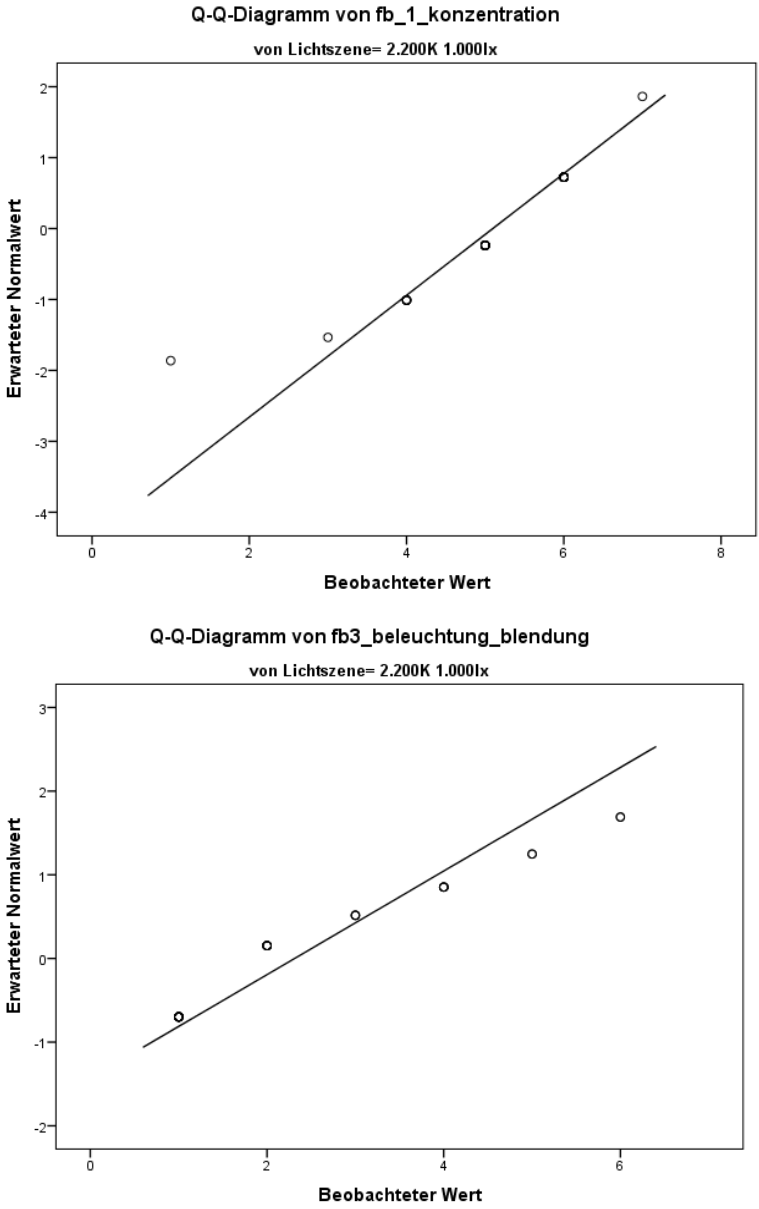


Abbildung A.17: Q-Q-Diagramme für Konzentriert #1 (oben) und Blendung (unten)

C2) Überprüfung der Varianzhomogenität

Tabelle A.9: Signifikanzen der Voraussetzungsprüfung für die mixed ANOVA (E * CCT * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben

Variable	Box-M-Test	Levene-Test Zeit 1	Levene-Test Zeit 2	Levene-Test Zeit 3
D2R KL	0,116	0,586	0,592	-
D2R BZO	0,318	0,673	0,709	-
D2R F%	<0,001	<0,001	<0,001	-
Audio RT	0,015	0,005	0,079	-
Tablet RT	0,101	0,373	0,325	-
KSS	0,688	0,007	0,575	0,686
Wohl	0,027	0,010	0,177	0,740
Konzentriert	0,015	0,001	0,428	0,378
Gelangweilt	0,003	0,144	0,048	0,065
Ruhig	<0,001	0,096	0,002	0,002
Motiviert	0,364	0,301	0,023	0,541
Munter	0,759	0,542	0,829	0,473
Angenehm	-	0,994	-	-
Helligkeit	-	0,019	-	-
Lichtfarbe	-	0,314	-	-
Blendung	-	0,381	-	-

C3) Analyse der Beleuchtungsstärken

Die Ergebnisse der ANOVA mit drei Beleuchtungsstärken 200 lx, 500 lx und 1000 lx bei 2200 K sowie die entsprechende deskriptive Statistik sind in den folgenden Tabellen aufgelistet.

Tabelle A.10: Deskriptive Statistik, M – Mittelwert, SE - Standardfehler

	200 lx		500 lx		1 000 lx	
	M	SE	M	SE	M	SE
KL #4	157,3	4,41	168,2	6,57	175,7	5,01
BZO #4	164,5	4,37	174,3	6,85	178,9	5,08
F% #4	4,37	0,80	3,40	0,66	1,77	0,27
Audio RT #2	438,0	23,47	434,8	19,15	401,1	19,86
Tablet RT #2	432,8	12,57	432,1	11,54	412,0	9,64

Tabelle A.11: Signifikanzen der Voraussetzungsprüfung (Levene-Test) für die 3-stufige ANOVA für E, Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben

F #4	BZO #4	KL #4	Audio RT #2	Tablet RT #2
<0,001	0,045	0,047	0,199	0,646

Tabelle A.12: Report der 3-stufigen ANOVA für E, Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Variable	df	F	p
F #4	2	4,480	0,014
BZO #4	2	1,769	0,176
KL #4	2	2,921	0,059
Audio RT #2	2	0,929	0,399
Tablet RT #2	2	1,094	0,339

Tabelle A.13: Bericht der Signifikanzen der paarweisen Vergleiche (Bonferroni), Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Signifikanz p	200 lx	500 lx	1 000 lx
200 lx	-	0,811	0,012
500 lx	0,811	-	0,201
1 000 lx	0,012	0,201	-

C4) Deskriptive Statistik zur subjektiven Aufmerksamkeit und Wohlbefinden

Tabelle A.14: Deskriptive Statistik des Fragebogens, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung

	Lichtszene	2 200 K 200 lx	2 200 K 1 000 lx	12 000 K 200 lx	12 000 K 1 000 lx
Wohl #1	N	32	31	36	29
	M	5,1	5,3	5,4	5,0
	SD	1,4	1,2	0,8	1,0
Wohl # 2	N	33	32	37	30
	M	5,2	5,5	5,4	5,3
	SD	1,3	1,3	1,0	1,0
Wohl #3	N	33	32	37	30
	M	5,2	5,5	5,5	5,3
	SD	1,4	1,4	1,1	1,1
Konzentriert #1	N	32	31	36	29
	M	4,9	5,1	5,3	4,8
	SD	1,4	1,2	0,8	1,3
Konzentriert #2	N	33	32	37	30
	M	5,0	5,0	5,1	4,8
	SD	1,4	1,3	1,1	1,1
Konzentriert #3	N	33	32	37	30
	M	4,5	4,8	4,9	4,6
	SD	1,4	1,2	1,3	1,4
Gelangweilt #1	N	32	31	36	29
	M	3,2	2,4	2,7	2,9
	SD	1,5	1,1	1,1	1,4
Gelangweilt #2	N	33	32	37	30
	M	3,1	2,7	2,6	3,2
	SD	1,7	1,4	1,2	1,8

Gelangweilt #3	N	33	32	37	30
	M	3,6	2,9	3,1	3,4
	SD	1,7	1,5	1,1	1,8
Ruhig #1	N	32	31	36	29
	M	5,8	5,4	5,4	5,1
	SD	1,0	1,1	1,1	1,5
Ruhig #2	N	33	32	37	30
	M	5,5	5,6	5,5	5,2
	SD	1,3	1,1	1,1	1,9
Ruhig #3	N	33	32	37	30
	M	5,4	5,7	5,5	5,1
	SD	1,4	1,0	1,2	1,7
Motiviert #1	N	32	31	36	29
	M	5,1	5,5	5,5	5,4
	SD	1,1	1,2	0,8	1,0
Motiviert #2	N	33	32	37	30
	M	5,3	5,4	5,5	4,9
	SD	1,4	1,0	0,9	1,4
Motiviert #3	N	33	32	37	30
	M	5,1	5,3	5,0	4,9
	SD	1,4	1,1	1,2	1,3
Munter #1	N	32	31	36	29
	M	4,6	4,8	4,9	4,7
	SD	1,2	1,4	1,2	1,4
Munter #2	N	33	32	37	30
	M	4,4	4,6	4,5	4,5
	SD	1,2	1,3	1,2	1,1
Munter #3	N	33	32	37	30
	M	3,8	4,4	4,4	4,4
	SD	1,3	1,2	1,4	1,3

Anhang D – Tabellen aus Laborversuch 2

D1) Überprüfung der Normalverteilung

Tabelle A.15: Signifikanztests auf Normalverteilung (KS = Kolmogorov-Smirnov, SW = Shapiro-Wilk) für die mixed ANOVA (Lichtszene * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben

Variable	Test	Statisch 2 200 K 200 lx	Statisch 12 000 K 1 000 lx	Dynamischer Wechsel
BZO #I	KS	0,200	0,074	0,187
	SW	0,706	0,015	0,597
BZO #II	KS	0,200	0,166	0,084
	SW	0,226	0,435	0,215
BZO #V	KS	0,200	0,028	0,037
	SW	0,089	0,073	0,216
KL #I	KS	0,200	0,200	0,200
	SW	0,868	0,074	0,318
KL #II	KS	0,200	0,200	0,074
	SW	0,285	0,480	0,053
KL #V	KS	0,200	0,007	0,200
	SW	0,432	0,026	0,224
F% #I	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	<0,001	<0,001	<0,001
F% #II	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	<0,001	<0,001	<0,001
F% #V	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	<0,001	<0,001	<0,001
Audio RT #I	KS	0,200	0,200	0,200
	SW	0,510	0,684	0,190
Audio RT #II	KS	0,200	0,200	0,200
	SW	0,802	0,768	0,145
Audio RT #V	KS	0,200	0,200	0,200
	SW	0,409	0,887	0,347
KSS #I	KS	0,188	0,008	<0,001
	SW	0,048	0,061	0,006

Variable	Test	Statisch 2 200 K 200 lx	Statisch 12 000 K 1 000 lx	Dynamischer Wechsel
KSS #II	KS	0,025	0,013	0,047
	SW	0,124	0,089	0,018
KSS #III	KS	0,190	0,035	<0,001
	SW	0,020	0,066	0,001
KSS #IV	KS	0,009	0,025	0,002
	SW	0,011	0,142	0,003
KSS #V	KS	0,200	<0,001	0,004
	SW	0,164	0,021	0,008
Wohl #I	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	0,007	0,014	<0,001
Wohl #II	KS	<0,001	0,002	<0,001
	SW	0,002	0,070	0,003
Wohl #III	KS	0,027	<0,001	<0,001
	SW	0,020	0,003	0,003
Wohl #IV	KS	<0,001	0,027	0,001
	SW	0,006	0,018	0,007
Wohl #V	KS	<0,001	0,011	0,006
	SW	<0,001	0,017	0,035
Konzentriert #I	KS	<0,001	<0,001	0,001
	SW	0,001	0,009	0,005
Konzentriert #II	KS	0,004	0,001	0,006
	SW	0,012	0,058	0,066
Konzentriert #III	KS	0,006	<0,001	0,004
	SW	0,028	0,004	0,012
Konzentriert #IV	KS	0,001	0,014	0,002
	SW	0,001	0,150	0,021
Konzentriert #V	KS	0,003	0,005	<0,001
	SW	0,013	0,023	0,005
Gestresst #I	KS	0,007	0,001	<0,001
	SW	0,025	0,011	0,001
Gestresst #II	KS	<0,001	0,009	0,042
	SW	<0,001	0,025	0,041
Gestresst #III	KS	0,001	0,033	0,087
	SW	0,005	0,047	0,058

Variable	Test	Statisch 2 200K 200 lx	Statisch 12 000 K 1 000 lx	Dynamischer Wechsel
Gestresst #IV	KS	<0,001	0,012	0,200
	SW	0,032	0,022	0,148
Gestresst #V	KS	0,009	0,078	0,012
	SW	0,020	0,040	0,022
Gelangweilt #I	KS	0,001	0,006	0,030
	SW	0,023	0,084	0,035
Gelangweilt #II	KS	0,011	<0,001	0,011
	SW	0,031	0,016	0,069
Gelangweilt #III	KS	0,006	0,031	<0,001
	SW	0,010	0,012	<0,001
Gelangweilt #IV	KS	<0,001	<0,001	0,003
	SW	0,006	<0,001	0,026
Gelangweilt #V	KS	0,002	0,001	0,106
	SW	0,059	0,078	0,063
Ruhig #I	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	0,011	0,003	0,001
Ruhig #II	KS	0,059	0,063	<0,001
	SW	0,008	0,005	0,012
Ruhig #III	KS	0,010	0,009	<0,001
	SW	0,018	0,001	0,003
Ruhig #IV	KS	<0,001	0,005	0,076
	SW	0,003	0,021	0,066
Ruhig #V	KS	0,001	0,096	0,039
	SW	0,018	0,034	0,062
Motiviert #I	KS	<0,001	0,001	0,200
	SW	0,003	0,017	0,152
Motiviert #II	KS	0,001	0,018	<0,001
	SW	0,057	0,093	0,031
Motiviert #III	KS	<0,001	0,002	0,018
	SW	0,001	0,027	0,020
Motiviert #IV	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	0,007	0,011	0,020
Motiviert #V	KS	<0,001	0,077	0,001
	SW	0,001	0,155	0,003

Variable	Test	Statisch 2 200K 200 lx	Statisch 12 000 K 1 000 lx	Dynamischer Wechsel
Munter #I	KS	0,054	0,001	0,003
	SW	0,064	0,021	0,060
Munter #II	KS	<0,001	0,047	0,039
	SW	0,010	0,065	0,263
Munter #III	KS	<0,001	0,053	<0,001
	SW	0,008	0,088	0,028
Munter #IV	KS	<0,001	0,003	0,032
	SW	0,002	0,035	0,108
Munter #V	KS	0,001	0,053	0,034
	SW	0,035	0,037	0,116
Angenehm #0	KS	0,001	<0,001	<0,001
	SW	0,076	<0,001	0,017
Angenehm #II	KS	0,006	0,005	0,004
	SW	0,027	0,038	0,019
Angenehm #V	KS	<0,001	<0,001	0,003
	SW	0,009	0,017	0,025
Helligkeit #0	KS	<0,001	0,001	<0,001
	SW	<0,001	0,002	<0,001
Helligkeit #II	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	<0,001	0,003	0,001
Helligkeit #V	KS	<0,001	<0,001	0,001
	SW	<0,001	0,002	0,043
Lichtfarbe #0	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	<0,001	<0,001	<0,001
Lichtfarbe #II	KS	<0,001	0,030	0,001
	SW	<0,001	0,004	0,002
Lichtfarbe #V	KS	<0,001	0,001	0,016
	SW	0,002	0,003	0,037
Blendung #0	KS	<0,001	<0,001	<0,001
	SW	<0,001	0,008	<0,001
Blendung #II	KS	<0,001	0,010	<0,001
	SW	0,001	0,017	<0,001
Blendung #V	KS	0,001	0,005	<0,001
	SW	<0,001	0,013	<0,001

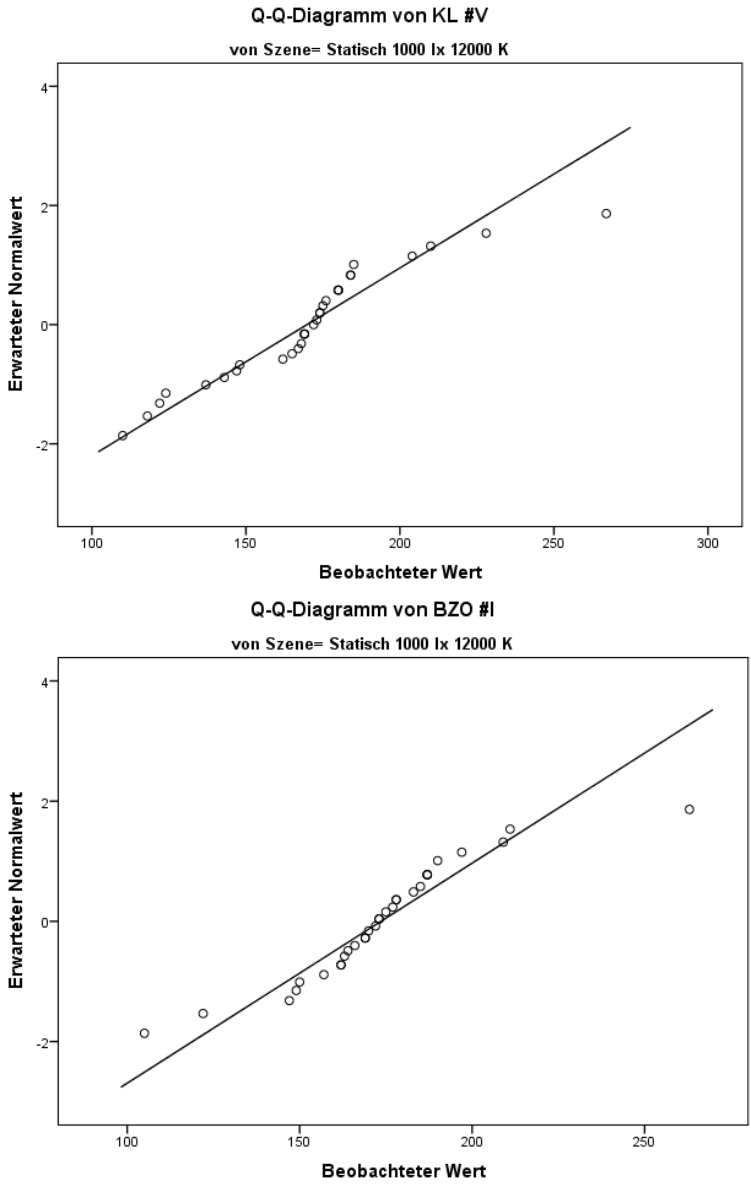


Abbildung A.18: Q-Q-Diagramme für KL #V (oben) und BZO #I (unten)

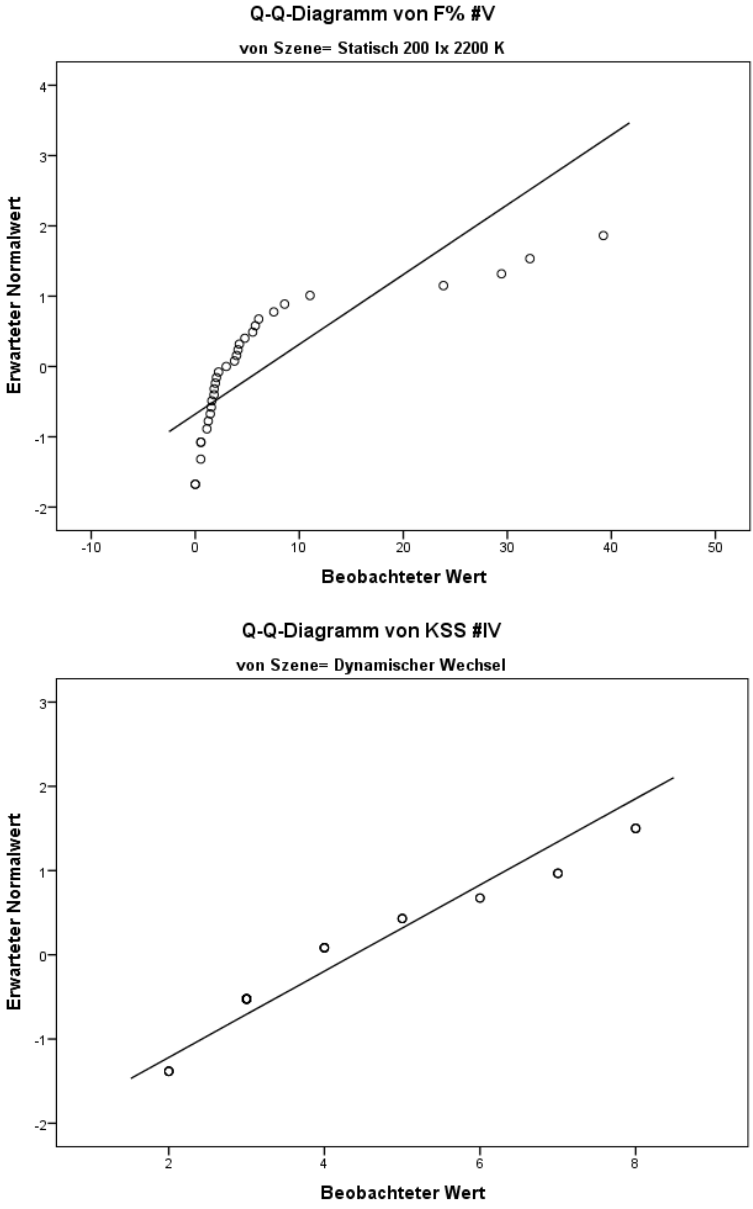


Abbildung A.19: Q-Q-Diagramme für F% #V (oben) und KSS #IV (unten)

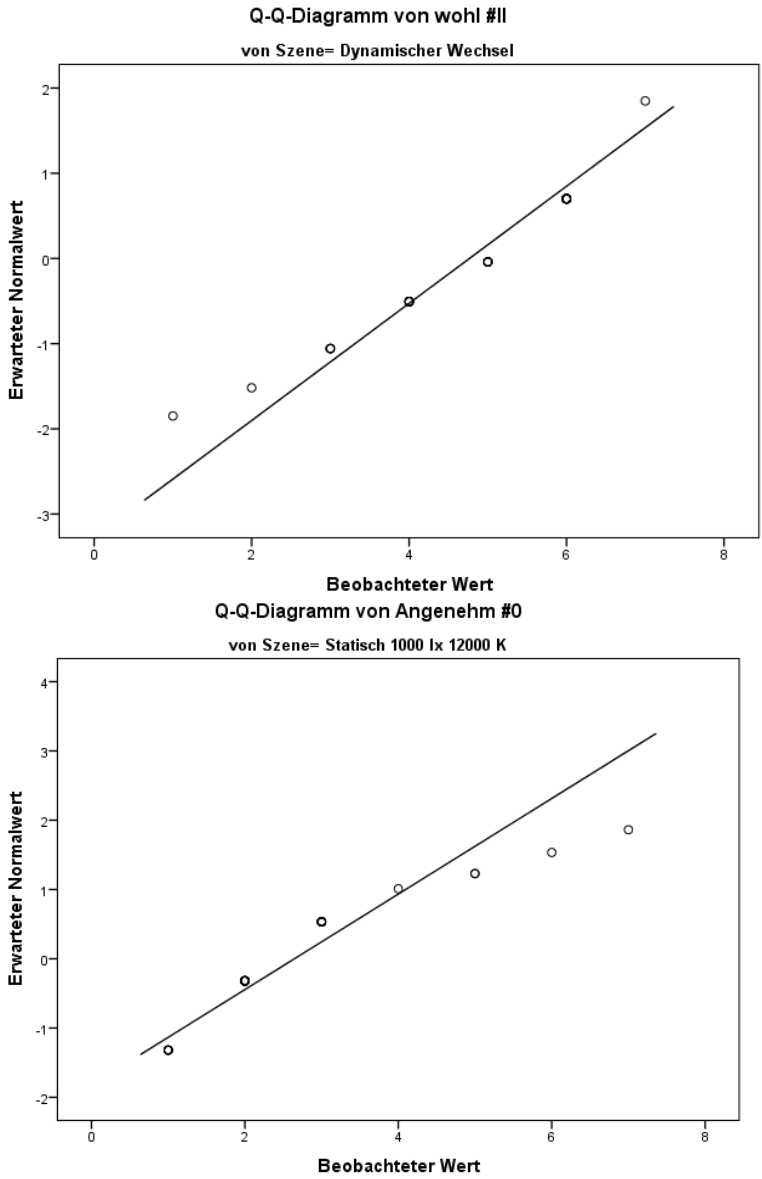


Abbildung A.20: Q-Q-Diagramme für wohl #II (oben) und Angenehm #0 (unten)

D2) Überprüfung der Varianzhomogenität

Tabelle A.16: Signifikanzen der Voraussetzungsprüfung für die mixed ANOVA (Lichtszene * Zeit), Verletzungen (p-Werte < 0,05) sind hervorgehoben

Variable	Box-M-Test	Levene-Test #1	Levene-Test #2	Levene-Test #3	Levene-Test #4	Levene-Test #5
D2R KL	0,615	0,999	0,871	0,936	-	-
D2R BZO	0,646	0,356	0,603	0,571	-	-
D2R F%	0,007	0,343	0,399	0,097	-	-
Audio RT	0,591	0,215	0,609	0,969	-	-
KSS	0,408	0,143	0,125	0,520	0,355	0,421
Wohl	<0,001	0,203	0,117	0,597	0,617	0,053
Konzentriert	0,500	0,197	0,138	0,078	0,758	0,033
Gestresst	0,082	0,168	0,536	0,324	0,582	0,330
Gelangweilt	0,005	0,017	0,663	0,356	0,186	0,400
Ruhig	0,709	0,439	0,581	0,234	0,855	0,385
Motiviert	0,718	0,199	0,540	0,253	0,301	0,142
Munter	0,020	0,788	0,716	0,568	0,078	0,080
Angenehm	0,001	0,688	0,401	0,465	-	-
Helligkeit	<0,001	0,091	0,024	0,092	-	-
Lichtfarbe	<0,001	0,091	0,001	0,259	-	-
Blendung	0,026	0,031	0,685	0,016	-	-

D3) Deskriptive Statistik zur subjektiven Aufmerksamkeit und Wohlbefinden

Tabelle A.17: Deskriptive Statistik des Fragebogens, N Anzahl gültiger Fälle, M arithmetisches Mittel, SD Standardabweichung

Variable	Lichtszene								
	Statisch I 200 lx + 2 200 K			Statisch II 1 000 lx + 12 000 K			Dynamischer Wechsel		
	M	SD	N	M	SD	N	M	SD	N
Wohl #I	4,7	1,2	31	4,8	1,2	31	5,3	1,5	30
Wohl #II	4,8	1,1	30	4,6	1,1	30	4,8	1,5	30
Wohl #III	5,0	1,3	31	4,6	1,0	31	4,9	1,3	30
Wohl #IV	4,6	1,1	31	4,6	1,3	31	4,9	1,4	30
Wohl #V	5,0	1,0	31	4,7	1,3	31	4,9	1,5	30
Konzentriert #I	4,3	1,0	31	4,6	1,3	31	5,0	1,2	30
Konzentriert #II	4,2	1,2	30	4,1	1,5	30	4,7	1,3	30
Konzentriert #III	4,9	1,4	31	4,1	1,5	31	5,1	1,1	30
Konzentriert #IV	4,4	1,3	31	4,2	1,4	31	4,9	1,3	30
Konzentriert #V	4,3	1,0	31	4,0	1,6	31	4,4	1,2	30
Gestresst #I	2,9	1,1	31	3,0	1,4	31	2,6	1,6	30
Gestresst #II	3,2	1,2	30	3,0	1,5	30	3,1	1,5	30
Gestresst #III	3,0	1,3	31	3,3	1,5	31	3,3	1,7	30
Gestresst #IV	3,6	1,4	31	3,5	1,6	31	3,4	1,5	30
Gestresst #V	2,9	1,2	31	3,1	1,6	31	3,1	1,6	30
Gelangweilt #I	3,7	1,3	31	3,6	1,4	31	4,4	1,9	30
Gelangweilt #II	3,7	1,3	30	3,8	1,4	30	4,3	1,6	30
Gelangweilt #III	3,0	1,1	31	3,1	1,3	31	3,5	1,5	30
Gelangweilt #IV	3,7	1,2	31	3,7	1,2	31	3,7	1,6	30
Gelangweilt #V	3,7	1,1	31	3,9	1,3	31	4,4	1,4	30

Variable	Lichtszene								
	Statisch I 200 lx + 2 200 K			Statisch II 1 000 lx + 12 000 K			Dynamischer Wechsel		
	M	SD	N	M	SD	N	M	SD	N
Ruhig #I	4,9	1,5	31	5,1	1,4	31	5,0	1,5	30
Ruhig #II	4,8	1,3	30	4,8	1,4	30	4,7	1,5	30
Ruhig #III	5,0	1,2	31	4,6	1,5	31	4,6	1,3	30
Ruhig #IV	4,5	1,5	31	4,4	1,5	31	4,5	1,6	30
Ruhig #V	4,7	1,3	31	4,4	1,6	31	4,4	1,7	30
Motiviert #I	4,5	1,2	31	4,4	1,5	31	4,5	1,7	30
Motiviert #II	4,3	1,2	30	4,2	1,4	30	4,2	1,5	30
Motiviert #III	4,9	1,1	31	4,5	1,3	31	4,5	1,5	30
Motiviert #IV	4,3	1,2	31	4,1	1,3	31	4,4	1,5	30
Motiviert #V	4,3	1,0	31	4,2	1,3	31	4,0	1,4	30
Munter #I	3,4	1,3	31	3,5	1,4	31	4,6	1,5	30
Munter #II	3,5	1,3	30	3,7	1,3	30	4,2	1,5	30
Munter #III	4,1	1,2	31	3,7	1,3	31	4,3	1,3	30
Munter #IV	3,6	1,0	31	3,5	1,2	31	4,2	1,4	30
Munter #V	3,6	1,1	31	3,5	1,6	31	3,9	1,5	30

D4) Ergänzung zur Akzeptanz der Beleuchtung

Tabelle A.18: Der Haupteffekt Lichtszene wird nach Zeitpunkten aufgeschlüsselt (post-hoc Bonferroni, gilt für alle Akzeptanz Items bis auf Spalte Ausnahme).

Zeit	Lichtszene	p	Ausnahme
1	1 -> 2	**< 0,05 ***	
	1 -> 3	> 0,05 n. s.	
	2 -> 3	**< 0,05 ***	
2	1 -> 2	**< 0,05 ***	> 0,05 n. s. für Blendung
	1 -> 3	**< 0,05 ***	
	2 -> 3	> 0,05 n. s.	
3	1 -> 2	**< 0,05 ***	
	1 -> 3	> 0,05 n. s.	
	2 -> 3	**< 0,05 ***	

Tabelle A.19: Der Haupteffekt Zeitpunkt wird nach Lichtszenen aufgeschlüsselt (post-hoc Bonferroni, gilt für alle Akzeptanz Items bis auf Spalte Ausnahme).

Lichtszene	Zeit	p	Ausnahme
1	1 -> 2	> 0,05 n. s.	
	1 -> 3	> 0,05 n. s.	
	2 -> 3	> 0,05 n. s.	
2	1 -> 2	> 0,05 n. s.	**< 0,05 *** für Lichtfarbe
	1 -> 3	> 0,05 n. s.	
	2 -> 3	> 0,05 n. s.	
3	1 -> 2	**< 0,05 ***	
	1 -> 3	> 0,05 n. s.	**< 0,05 *** für Angenehm
	2 -> 3	**< 0,05 ***	

Anhang E – Tabellen aus der Hörsaalstudie

E1) Überprüfung der Voraussetzungen

Die Überprüfung der Voraussetzungen geschah analog zu den Laborstudien. Die Normalverteilung wurde mittels Signifikanztests nach Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk getestet und im Falle von Signifikanz mit Q-Q-Diagrammen visuell beurteilt. Für alle Fragebögen (KSS, Wohlbefinden und Akzeptanz Beleuchtung) ergab sich für alle Lichtszenen Signifikanz mit $p < 0{,}001$. Die Q-Q-Diagramme (je eines pro Variable für Referenzlicht ist dargestellt) zeigen jedoch gute Übereinstimmung mit der Normalverteilung. Die Varianzhomogenität wurde mittels Levene-Tests überprüft. Ebenso wie in den bisherigen Studien wird hier auf die Robustheit von Varianzanalysen gegenüber Verletzungen ihrer Voraussetzungen verwiesen [187–190], [191].

Tabelle A.20: Levene-Tests auf Varianzhomogenität

Abhängige Variable	Levene-Statistik	df1	df2	Signifikanz
KL	2,036	3	1783	0,107
KSS	0,375	3	1813	0,771
Wohlfühlen	0,273	3	1815	0,845
Konzentration	1,413	3	1815	0,237
Langeweile	2,983	3	1815	0,030
Stress	0,383	3	1814	0,765
Ruhe	0,247	3	1814	0,864
Motivation	2,646	3	1815	0,048
Munter	1,265	3	1815	0,285
Beleuchtung	2,212	3	878	0,085
Helligkeit	10,575	3	878	< 0,001
Lichtfarbe	17,727	3	878	< 0,001
Blendung	0,687	3	878	0,560
Lesbarkeit der Folien	2,374	3	878	0,069

Tabelle A.21: Tests auf Normalverteilung für KL

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
Lichtszene	**Statistik**	**df**	**Signifikanz**	**Statistik**	**df**	**Signifikanz**
Referenz	0,042	441	0,064	0,989	441	0,002
Hell	0,034	447	0,200	0,997	447	0,637
Warmweiß	0,030	446	0,200	0,994	446	0,099
Kaltweiß	0,033	453	0,200	0,994	453	0,052

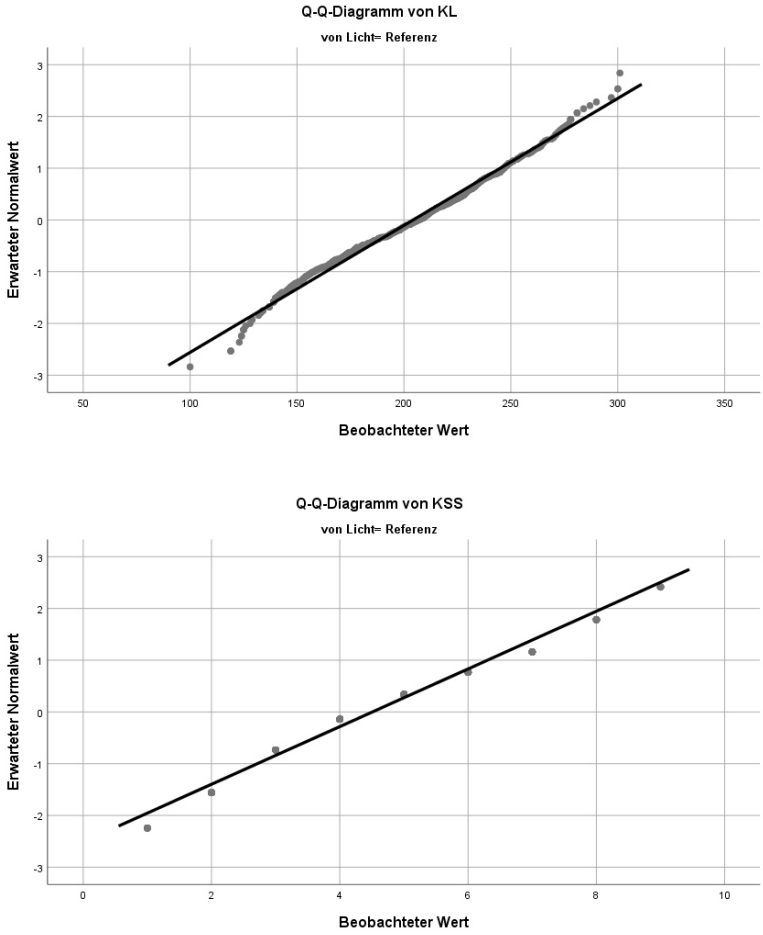


Abbildung A.21: Q-Q-Diagramme für KL (oben) und KSS (unten)

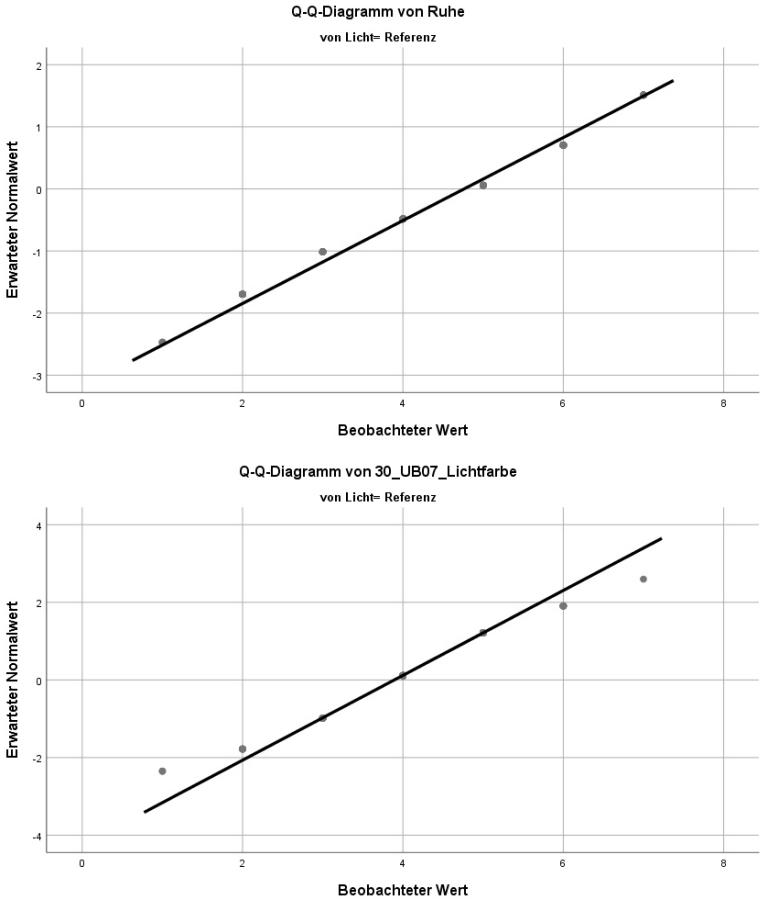


Abbildung A.22: Q-Q-Diagramme für Ruhe (oben) und Lichtfarbe (unten)

Alle signifikanten Abweichungen von der Normalverteilung wurden mittels Sichtprüfung der Q-Q-Plots überprüft. Ausgewählte worst-cases für KL, KSS, ein Wohlbefinden Item und ein Beleuchtungsitem finden sich in den vorherigen Abbildungen.

E2) Analyse subjektive Aufmerksamkeit und Wohlbefinden

Für jede abhängige Variable (Wohlfühlen, Konzentration, Langeweile, Stress, Ruhe, Motivation und Munterkeit) wurde ein separates linear gemischtes Modell erstellt. Zunächst wurden die zwei Trainingswochen je zu Beginn des Versuchs und nach Neujahr sowie die ausgeschiedenen Probanden herausgefiltert. Die Lichtszene wurde als fester Faktor eingefügt und der Proband als Subjekt mit zufälligem Achsenabschnitt. Es ergaben sich keine signifikanten Effekte der Lichtszene. Der Einfluss von Versuchswoche, Tag, Zeitpunkt und Jahr wurde ebenfalls untersucht, ergab aber wiederum keine signifikanten Effekte.

Tabelle A.22: Deskriptive Statistik zur subjektiven Aufmerksamkeit und Wohlbefinden

Lichtszene	Referenz		Hell		Warmweiß		Kaltweiß	
	N = 445		N = 459		N = 456		N = 462	
	M	**SD**	**M**	**SD**	**M**	**SD**	**M**	**SD**
Wohlfühlen	4,6	1,7	4,7	1,4	4,6	1,6	4,6	1,4
Konzentration	4,0	1,8	4,2	1,5	4,1	1,6	4,1	1,5
Langeweile	3,6	1,6	3,7	1,3	3,7	1,5	3,7	1,3
Stress	3,2	1,7	3,3	1,4	3,3	1,6	3,3	1,4
Ruhe	4,7	1,8	4,7	1,5	4,6	1,6	4,6	1,6
Motivation	4,3	1,8	4,4	1,5	4,2	1,6	4,2	1,4
Munterkeit	3,9	1,7	3,9	1,5	3,9	1,5	3,9	1,3

Tabelle A.23: Bericht des festen Effekts Lichtszene

Variable	Zähler-df	Nenner-df	F	p
Wohlfühlen	3	1757,3	0,446	0,720
Konzentration	3	1757,3	0,885	0,448
Langeweile	3	1756,8	0,848	0,468
Stress	3	1756,9	1,178	0,317
Ruhe	3	1756,6	0,740	0,528
Motivation	3	1756,4	2,058	0,104
Munterkeit	3	1756,7	0,057	0,982

E3) Analyse Akzeptanz der Beleuchtung

Die statistische Analyse der Akzeptanz der Beleuchtung wurde für fünf abhängige Variablen durchgeführt: Beleuchtung allgemein, Helligkeit, Lichtfarbe, Blendung und Lesbarkeit der Folien. Es wurde der gleiche Filter wie im vorherigen Abschnitt verwendet und jeweils ein linear gemischtes Modell erstellt. Dieses enthält den festen Faktor Lichtszene sowie den Probanden als Subjekt (zufälliger Achsenabschnitt). Für alle abhängigen Variablen wurde ein signifikanter Effekt des Faktors Lichtszene gefunden. Als post-hoc Analyse wurden paarweise Vergleiche der Lichtszene mit Bonferroni Korrektur angewandt und in Abbildung 5.22 als signifikante Effekte eingetragen. Weiterhin wurden Einfluss von Versuchswoche, Tag und Jahr sowie Interaktionen untersucht. Diese brachten jedoch keine Verbesserung der Modellgüte und zeigten keine signifikanten Effekte. Daher werden sie hier nicht berichtet.

Tabelle A.24: Deskriptive Statistik zur Akzeptanz der Beleuchtung

Lichtszene	Referenz		Hell		Warmweiß		Kaltweiß	
	N = 214		N = 223		N = 225		N = 222	
	M	**SD**	**M**	**SD**	**M**	**SD**	**M**	**SD**
Beleuchtung	4,3	1,8	4,1	1,4	4,4	1,2	3,5	1,5
Helligkeit	4,3	1,5	4,7	1,0	4,2	0,9	4,7	1,0
Lichtfarbe	3,8	1,5	3,8	1,0	4,3	0,8	3,0	1,3
Blendung	3,3	1,9	3,7	1,6	3,2	1,4	3,7	1,6
Lesbarkeit Folien	4,7	2,0	4,3	1,7	4,8	1,5	4,4	1,5

Tabelle A.25: Bericht des festen Effekts Lichtszene, Signifikanzen p < 0,05 sind hervorgehoben

Variable	Zähler-df	Nenner-df	F	p
Beleuchtung	3	819,1	23,544	<0,001
Helligkeit	3	824,8	16,007	<0,001
Lichtfarbe	3	825,9	51,704	<0,001
Blendung	3	819,7	8,761	<0,001
Lesbarkeit Folien	3	820,0	6,116	<0,001

E4) Weitere Ergebnisse Grafiken

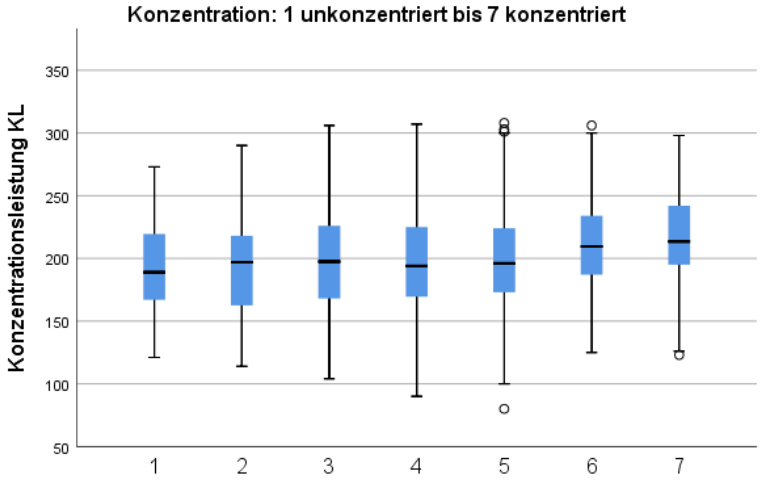


Abbildung A.23: Konzentrationsleistung KL vs. Konzentration

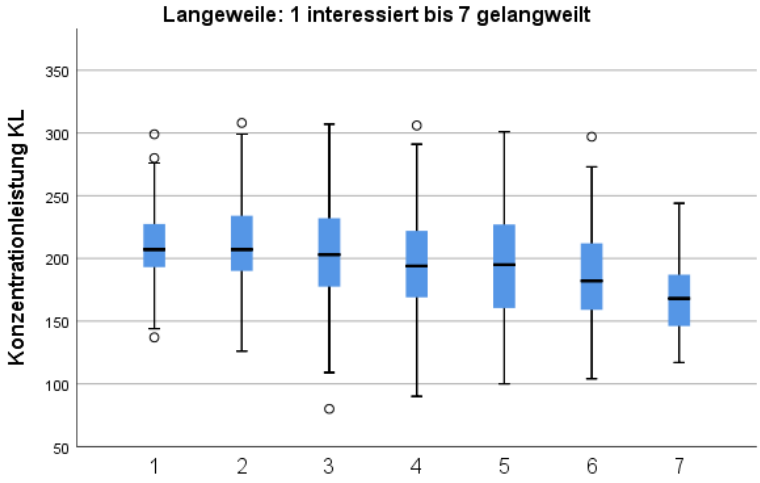


Abbildung A.24: Konzentrationsleistung KL vs. Langweile

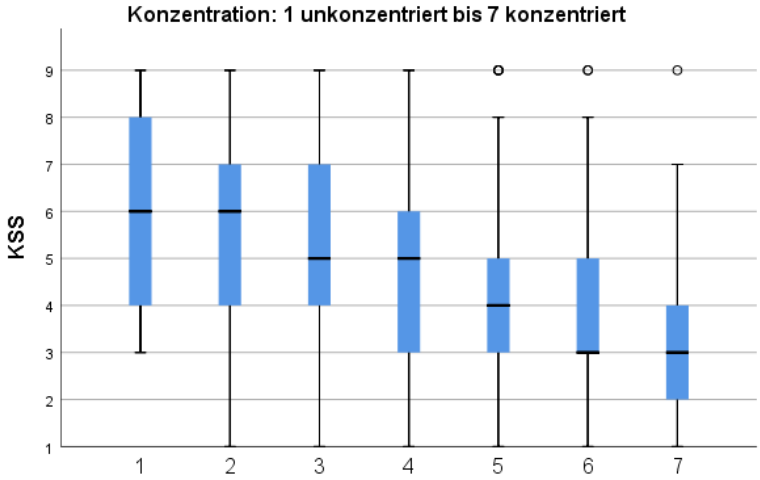


Abbildung A.25: KSS vs. Konzentration

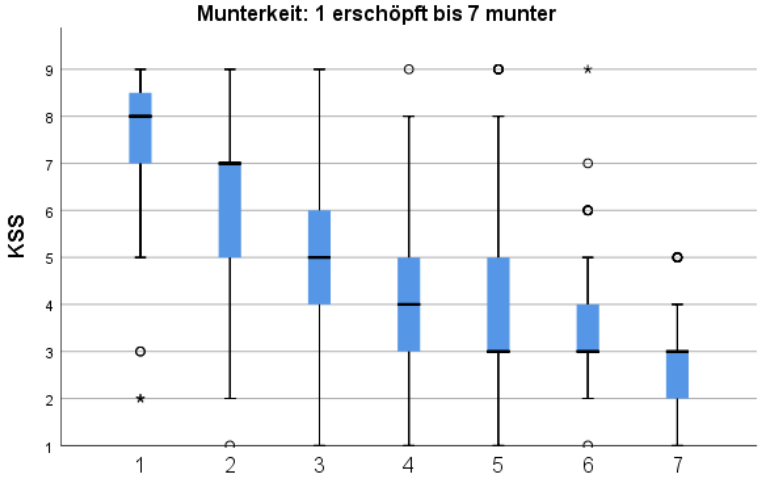


Abbildung A.26: KSS vs. Munterkeit

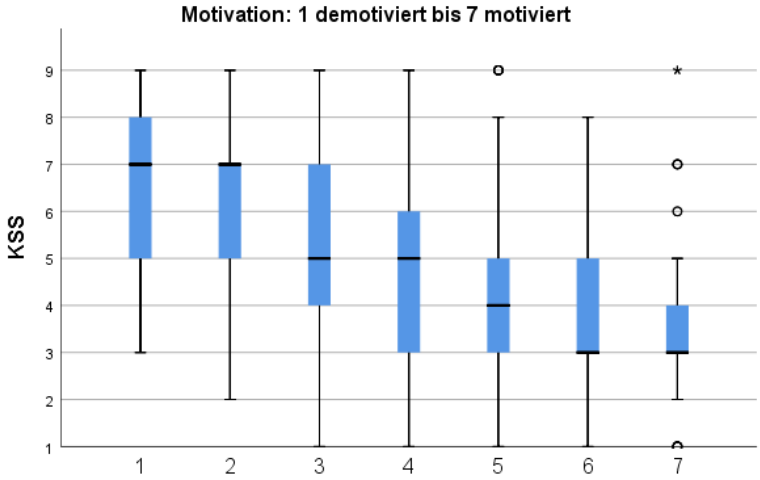


Abbildung A.27: KSS vs. Motivation

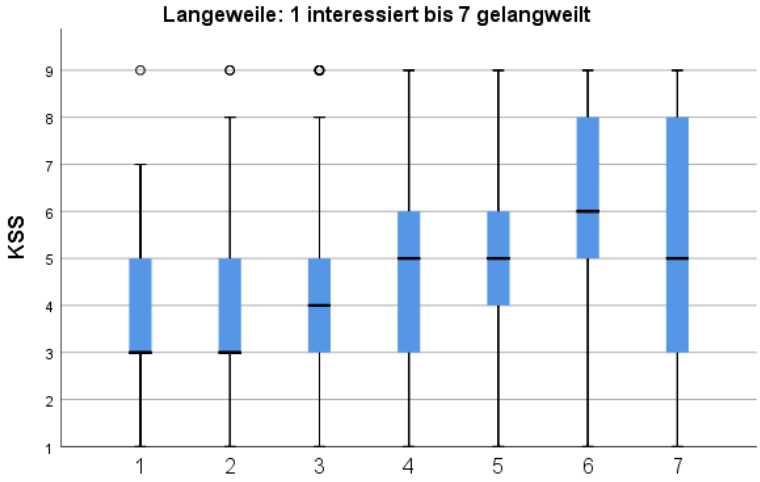


Abbildung A.28: KSS vs. Langeweile

Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik
Hrsg.: Prof. Dr. Stephan Völker, Heike Schumacher

ISSN 2196-338X (print)
ISSN 2198-5103 (online)

1: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): Jahresbericht 2012. - 2013. - 61 S.
ISBN **978-3-7983-2517-3** (print) EUR **5,80**
ISBN **978-3-7983-2518-0** (online)

2: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): Jahresbericht 2013. - 2014. - 67 S.
ISBN **978-3-7983-2667-5** (print) EUR **8,00**
ISBN **978-3-7983-2668-2** (online)

3: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): 8. Symposium Licht und Gesundheit. Eine Sondertagung der TU Berlin gemeinsam mit DAfP und LiTG; 19. und 20. März 2014, Messegelände Berlin. - 2014. - 201 S.
ISBN **978-3-7983-2671-2** (print) EUR **12,50**
ISBN **978-3-7983-2672-9** (online)

4: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): Jahresbericht 2014. - 2015. - 64 S.
ISBN **978-3-7983-2747-4** (print) EUR **8,00**
ISBN **978-3-7983-2748-1** (online)

5: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): UNILED – Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting. Ausgewählte Ergebnisse des Forschungsvorhabens. - 2015. - 272 S.
ISBN **978-3-7983-2707-8** (print) EUR **15,00**
ISBN **978-3-7983-2708-5** (online)

6: noch nicht erschienen

7: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): Jahresbericht 2015/2016. - 2016. - 62 S.
ISBN **978-3-7983-2834-1** (print) EUR **9,00**
ISBN **978-3-7983-2835-8** (online)

8: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): 9. Symposium Licht und Gesundheit. Abstracts. - 2016. - 75 S.
ISBN **978-3-7983-2866-2** (print) EUR **8,00**
ISBN **978-3-7983-2867-9** (online)

9: Bensel, Silvia: Messtechnische Bewertung weißer LED-Leuchten. Gonio-spektralradiometrische Untersuchung räumlicher Farbunterschiede. - 2017. - 118 S.
ISBN **978-3-7983-2910-2** (print) EUR **13,00**
ISBN **978-3-7983-2911-9** (online)

10: Völker, Stephan: Blendung durch Kfz-Scheinwerfer im nächtlichen Straßenverkehr. Ein Review bis 2006 – Beschreibung, Maßzahlen, Bewertungsmethoden. - 2017. - 172 S.
ISBN **978-3-7983-2956-0** (print) EUR **15,00**
ISBN **978-3-7983-2957-7** (online)

11: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): Jahresbericht 2016/2017. - 2018. - 52 S.
ISBN **978-3-7983-2930-0** (print) EUR **9,00**
ISBN **978-3-7983-2931-7** (online)

12: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): Jahresbericht 2017/2018. - 2018. - 68 S.
ISBN **978-3-7983-2997-3** (print) EUR **9,00**
ISBN **978-3-7983-2998-0** (online)

13: Niedling, Mathias: Zum Einfluss des Spektrums auf die Blendung. Untersuchungen zur Wirkung des kurzwelligen Strahlungsanteils auf die physiologische und psychologische Blendung. - 2019. - 173 S.
ISBN **978-3-7983-3032-0** (print) EUR **14,00**
ISBN **978-3-7983-3033-7** (online)

14: Hansen, Julien: Remote-Laser-Lichtquelle für ein hochaufgelöstes Scheinwerfersystem. - 2019. - XIV, 301 S.
ISBN **978-3-7983-3082-5** (print) EUR **19,50**
ISBN **978-3-7983-3083-2** (online)

15: Völker, Stephan; Schumacher, Heike (Hrsg.): Jahresbericht 2018/2019. - 2019. - 45 S.
ISBN **978-3-7983-3113-6** (print) EUR **8,00**
ISBN **978-3-7983-3114-3** (online)

Universitätsverlag der TU Berlin

Wirkung von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung des Lichts auf die Aufmerksamkeit am Tag

Moderne LED- und Lichtmanagementtechnologien sowie wachsendes Wissen über nicht-visuelle Wirkungen von Licht ermöglichen zukünftig, mit dem richtigen Licht zur richtigen Zeit die oft suboptimalen Lernbedingen an Schulen und Universitäten zu verbessern. Diese Arbeit leistet einen Beitrag „richtig“ näher zu definieren und beschreibt Untersuchungen zur Wirkung von Licht auf die akute, mit kognitiven Tests und Fragebögen erfasste, Aufmerksamkeit junger Erwachsener am Tage. Der Laborversuch zeigte, dass eine höhere vertikale Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe für die Aufmerksamkeit grundsätzlich von Vorteil ist. Jedoch wirkte sich die Interaktion von gleichzeitig hoher Beleuchtungsstärke und hohem kurzwelligen Anteil in der spektralen Verteilung nachteilig aus. Eine groß angelegte Feldstudie im Hörsaal konnte diese Ergebnisse nicht reproduzieren und ein weiterer Laborversuch zeigte keine Unterschiede zwischen dynamischer und statischer Beleuchtung. In allen Versuch wurden sehr hohe Farbtemperaturen schlechter vom Nutzer akzeptiert.

ISBN 978-3-7983-3135-8 (print)
ISBN 978-3-7983-3136-5 (online)

ISBN 978-3-7983-3135-8

http://verlag.tu-berlin.de