

Aus der Klinik und Poliklinik für Psychosomatik und Psychotherapie
der Universität zu Köln
Direktor: Professor Dr. med. C. Albus

Der Einfluss von LED-Licht auf die Konzentrations- fähigkeit des Menschen

Untersuchung anhand des d2-R-Tests im Rahmen einer
experimentellen Studie

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Magdalena König
aus Essen

promoviert am 29. Januar 2024

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln

2023

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachter: Professor Dr. med. C. H. Albus
2. Gutachter: Universitätsprofessor Dr. med. Th. Ch. Erren
Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Frau Univ.- Prof. Dr. Katja Petrowski
Herr Prof. Dr. med. Christian Albus

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen. Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Der dieser Arbeit zugrunde liegende Datensatz wurde von März 2016 bis September 2016 in der Halle 6 der Deutschen Sporthochschule Köln am Sportpark Müngersdorf 6 in 50933 Köln durch meine Mitarbeit ermittelt. Die hier angegebenen Versuchsabläufe sind nach entsprechender Anleitung durch Frau Univ.-Prof. Dr. phil. Katja Petrowski und Frau Klara Müller von mir selbst sowie durch ein Team aus den folgenden weiteren Personen durchgeführt worden. Das gesamte Team bestand somit aus Frau Univ.-Prof. Dr. Katja Petrowski, zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern, Jonas Böhme und Klara Müller, sowie den drei Medizinstudenten Noah Schaake, Omar Mussa, Michael Knevels und mir, Magdalena König, geborene Osburg. Die Datensätze wurden durch das genannte Team erhoben und mit der Software SPSS abgebildet. Aufgrund der gemeinsamen Datensatzermittlung wird bzw. wurde der vorliegende Datensatz auch durch die Mitdoktoranden ausgewertet und ferner zu anderen Themen veröffentlicht. Die Abbildungen wurden größtenteils freundlicherweise von der Amboss GmbH zur Verfügung gestellt. Die statistische Auswertung wurde eigenständig unter Anleitung von Frau Univ.-Prof. Dr. Katja Petrowski durchgeführt, jedoch ohne weitere statistische Beratung durch diese.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe, und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Essen, den (10.10.2023)

Unterschrift:

Danksagung

Hier möchte ich mich herzlich bei allen Beteiligten bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle gebührt mein Dank meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. med. Christian Albus, Leiter der Klinik und Poliklinik für Psychosomatik und Psychotherapie der Universität zu Köln, für die Überlassung des Studienthemas sowie die stetige Unterstützung.

Ein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Frau Univ.-Prof. Dr. phil. Katja Petrowski für ihre Anmerkungen, Betreuung und Unterstützung während der Versuchstage sowie der Auswertung. Auch den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der deutschen Sporthochschule Köln möchte ich an dieser Stelle danken.

Darunter sind insbesondere Frau Klara Müller, Herr Jonas Böhme, Herr Marcus Schmidt und Herr Stefan Bühler zu nennen. Insbesondere Frau Klara Müller danke ich für ihre konstante Unterstützung und außerordentliche Hilfsbereitschaft während der Versuchstage.

Meinen Kommilitonen und Mitdoktoranden gilt ebenfalls mein Dank für die Zuverlässigkeit und angenehme Zusammenarbeit. Selbstverständlich danke ich allen Probanden, die durch ihre Teilnahme diese Studie erst ermöglicht haben. Danke für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ein besonderer Dankesgruß richtet sich an meine große und liebevolle Familie, insbesondere an meine Eltern, Schwiegereltern, Großeltern, Geschwister und Schwägerinnen sowie Schwager. Während der Zeit des Studiums und der Arbeit an der Dissertation haben sie mich stets unterstützt und ermutigt.

Ein besonderer Dank gilt meinem Ehemann, der mich nicht nur in jeder Phase der Dissertation unterstützt hat, sondern auch durch das Studium, das praktische Jahr und den Arbeitsbeginn begleitet hat. Er hat mir zu jeder Zeit den Rücken freigehalten und somit die Erstellung dieser Arbeit maßgeblich unterstützt.

Danke!

Für Opa Franz.

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	8
1. ZUSAMMENFASSUNG	10
2. EINLEITUNG	11
2.1. Aufmerksamkeit und Konzentration als Merkmale der Leistungsfähigkeit	13
2.1.1. Definition und Begriffserklärung	14
2.1.2. Einflussfaktoren auf die Aufmerksamkeit und Konzentration	15
2.2. Die Wirkung und Verarbeitung von Licht im menschlichen Körper	16
2.2.1. Die physikalischen Eigenschaften des visuellen Lichts	16
2.2.2. Die Verarbeitung des Lichtreizes im menschlichen Körper	18
2.2.2.1. Der anatomische Aufbau des Auges	18
2.2.2.2. Der anatomische Aufbau der Retina	20
2.2.2.3. Photorezeptoren, ipRGCs und der Sehprozess	23
2.2.2.4. Der Lichteinfluss auf den SCN und hypothalamische Regionen	27
2.3. Stand der Forschung zu Licht und Aufmerksamkeit und Konzentration	30
2.4. Ableitung der Fragestellungen und Ziel der Arbeit	32
3. MATERIAL UND METHODEN	34
3.1. Probandenrekrutierung und Studienbeschreibung	34
3.2. Ein- und Ausschlusskriterien	34
3.3. Das Studiendesign	35
3.4. Untersuchungsinstrumente	38
3.4.1. Fragebogen-Erhebungen	39
Soziodemographischer Fragebogen	39
Perceived Stress Scale (PSS)	40
Trier Inventar zum chronischen Stress (TICS/ Screening-Skala (SCSS))	40
Patients Health Questionnaire for Depression-9 (PHQ-9)	40
Short Form-12, Kurzform vom Short Form-36 Gesundheitsfragebogen	41
Morningness-Eveningness-Questionnaires (D-MEQ)	41
NEO-Fünf-Faktoren-Inventar-25 (NEO-FFI-25)	42
Emotional Regulation Questionnaire (ERQ)	42

State-Trait Angstinventar (STAI)	42
Primary Appraisal Secondary Appraisal Scale (PASA)	43
Visuelle Analogskala (VAS)	43
Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)	43
Karolinska sleepiness scale (KSS)	43
3.4.2. Test d2-R	44
3.5. AuReTim	45
3.5.1. Pupillographie	45
3.5.1.1. Physiologische Grundlagen	45
3.5.1.2. Durchführung und Auswertung der Pupillographie	46
3.5.2. LED-Lichtkugeln und die vier Lichtexpositionen	47
3.6. Statistische Verfahren	48
3.6.1. Deskriptive Statistik	48
4. ERGEBNISSE	49
4.1. Vergleich der vier unterschiedlichen Lichtspektren-Interventionsgruppen hinsichtlich verschiedener Parameter	49
4.1.1. Soziodemographische Daten	49
4.1.2. Fragebögen	51
4.2. Unterschiede vor und nach der Lichtexposition	52
4.2.1. Konzentrationsleistung	52
4.2.2. Karolinska-Sleepiness-Scale	53
4.2.3. Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen	55
4.2.4. State-Trait Anxiety Inventory	56
5. DISKUSSION	57
5.1. Einfluss von Lichtfarbe auf die Konzentrationsleistung	57
5.2. Einfluss von Lichtfarbe auf die Schläfrigkeit	61
5.3. Einfluss von Lichtfarbe auf MDBF	62
5.4. Einfluss von Lichtfarbe auf STAI	62
5.4.1. Klinische Implikation	63
5.4.2. Stärken und Schwächen der Studie	64
5.4.3. Schlussfolgerung/Fazit	65
6. LITERATURVERZEICHNIS	66

7.	ANHANG	75
7.1.	Abbildungsverzeichnis	75
7.2.	Tabellenverzeichnis	75
8.	VORABVERÖFFENTLICHUNGEN VON ERGEBNISSEN	76

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
ACTH	Adrenocorticotropes Hormon
AF	Auslassfehler
ANT	Aufmerksamkeits-Netzwerkstest
aPVT	auditive psychomotorische Vigilanzaufgabe
BMI	Body-Mass-Index
BZO	bearbeitete Zielobjekte
bzw.	beziehungsweise
cGMP	zyklisches Guanosinmonophosphat
CRH	Corticotropin-Releasing-Hormon
df	degrees of freedom
D-MEQ	Morning-Eveningness-Questionnaires
EEG	Elektroenzephalographie
ERQ	Emotional Regulation Questionnaire
f	Effektstärke
F	F-Test
F%	Fehlerprozent
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
GDP	Guanosindiphosphat
ggf.	gegebenenfalls
GR	Glucocorticoidrezeptor
GTP	Guanosintriphosphat
h	Stunden
HF	Herzfrequenz
H-O	Horne-Östberg
HPA-Achse	Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse
HRV	Herzratenvariabilität
ipRGCs	intrinsische photosensitive retinale Ganglienzellen
IR-Strahlung	infrarote-Strahlung
K	Kelvin
KDT	Karolinska Drowsiness Test
kg/m ²	Kilogramm pro Quadratmeter
KL	Konzentrationsleistung
KSD	Karolinska Schlaftagebuch
KSS	Karolinska Sleepiness Scale
LC	Locus coeruleus
LED	Licht emittierende Dioden; <i>light-emitting diodes</i>
LMT	Lichtmesstechnik
lumen/m ²	lx
lx	Lux
M	Mittelwert
MDBF	Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen
min	Minute
mm	Millimeter
mV	Millivolt
N	Probandenanzahl
NEO-FFI-25	NEO-Fünf-Faktoren-Inventar-25
o.g.	oben genannte
p	Signifikanzniveau
PANAS	Skala für positiven und negativen Affekt
PASA	Primary Appraisal Secondary Appraisal Scale

PDE	Phosphodiesterase
PHQ-9	Patients Health Questionnaire for Depression-9
PSQI	Pittsburgh Sleep Quality Index
PSS	Perceived Stress Scale
PST	pupillographischer Schläfrigkeitstest
PUI	Pupillen-Unruhe-Index; englisch Pupillary-Unrest-Index
PVT	Psychomotorischen Vigilanz-Aufgabe Test
RGCs	retinale Ganglienzellen
RHT	retinohypothalamischer Trakt
RSME	Ratingskala für mentale Anstrengung
SCN	Suprachiasmatische Nukleus
SCSS	Screening Skala
SD	Standardabweichung
SF-12	Short Form-12
SSS	Stanford Sleepiness Scale
STAI	State-Trait Anxiety Inventory
SWS	slow wave sleep
TICS	Trier Inventar zum chronischen Stress
UV-Strahlung	ultraviolette Strahlung
VAS	visuelle Analogskala
VF	Verwechslungsfehler
VLPO	ventrolateral preoptic nucleus
VW	Verwechslungsfehler
W/ m ²	Watt pro Quadratmeter
z.B	zum Beispiel
ZNS	zentrales Nervensystem
η^2	Eta Quadrat
λ	Lambda
μm	Mikrometer

1. Zusammenfassung

Licht beeinflusst den menschlichen Organismus und die Konzentration, Wachsamkeit und das Wohlbefinden.¹⁻³ Durch Anpassung der LED-Lichtspektren, der sogenannten Licht emittierenden Dioden, *englisch* light-emitting diodes, haben sich neue Möglichkeiten zur künstlichen Erzeugung ausgewählter Farbspektren ergeben und somit Anpassungen explizit ausgewählter Beleuchtungsbedingungen.^{4,5}

In der vorliegenden Studie sollte unter standardisierten Bedingungen die Auswirkung von LED-Lichtspektren (blau = 201 Lux (lx), grün = 806 lx, weiß = 417 lx, rot = 235 lx) insbesondere auf die Konzentrationsleistung untersucht werden.

Es wurden 96 gesunde männliche Probanden im Alter von 18 bis 35 Jahren (Mittelwert (M)= 24,95 Jahre; Standardabweichung (SD)= 4,095), nach Sicherstellung von Ein- und Ausschlusskriterien anhand eines klinischen Interviews und von Fragebögen, untersucht. Es wurden nur männliche Probanden untersucht, da diese keinem hormonellen Zyklus unterliegen. Zum Ausschluss der Studie führten beispielsweise akute, chronische oder psychologische Erkrankungen sowie die Einnahme von Psychopharmaka oder Cortisonhaltiger Medikamente und Nikotinabusus (>10 Zigaretten am Tag).

Die Einteilung der Probanden in vier Interventionsgruppen fand randomisiert statt. Mittags erhielt jede dieser Interventionsgruppen eine 120-minütige Lichtexposition mit einem der oben genannten Lichtspektren mit identischer Photonendichte. Die Untersuchung der Stichprobe (N = 96) zeigte einen signifikanten Haupteffekt der Zeit bei den Zielparametern Konzentrationsleistung (KL) [F-Test (F) = 18,175; Signifikanzniveau (p) = < 0,001], Wohlbefinden [(F = 13,651, p = < 0,001)] und Schläfrigkeit [(F = 16,994, p = < 0,001)], jedoch keinen signifikanten Farbeffekt.

Die Ergebnisse weiterer Studien zeigen einen Einfluss des Lichts. Somit wären aufgrund der Erkenntnisse der vorliegenden Studie und der Literatur weitere Studien zu Auswirkungen der LED-Lichtspektren auf die Konzentrationsleistung und weitere Zielparameter mit mehreren Messzeitpunkten und längeren Expositionszeiträumen wünschenswert.

2. Einleitung

Künstliche Beleuchtung ermöglicht es unserer modernen Gesellschaft, 24 Stunden am Tag aktiv und produktiv zu sein. Dabei ist die Beleuchtung darauf ausgelegt, Farben angemessen wiederzugeben und die visuelle Leistung der Menschen zu unterstützen. Ebenso zielen moderne Beleuchtungssysteme oftmals darauf ab, die Energieeffizienz zu maximieren.^{4,5} In den letzten Jahrzehnten hat sich durch die vorangeschrittene Forschung unser Verständnis der menschlichen Reaktionen auf das Licht erweitert. Eine Vielzahl der Wirkungen von Licht, die sich vom eigentlichen Sehen unterscheiden, haben einen tiefgreifenden Einfluss auf die menschliche Physiologie und das Verhalten.^{6,7}

Der Lichtreiz und die Exposition gegenüber Licht kann im menschlichen Körper akute physiologische Reaktionen hervorrufen.¹ Dabei spielt die Wellenlänge des Lichts (in nm), auch Lambda (λ) genannt, eine entscheidende Rolle, insbesondere die Wellenlängen, im sichtbaren Spektralbereich (380–780 nm), also der sichtbaren elektromagnetischen Strahlung.⁸

Mit monochromatisch bezeichnet man Licht von nur einer Wellenlänge; jeder Wellenlänge gehört einer Spektralfarbe an. Die optische Strahlung beinhaltet kurzwellige ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung; $\lambda \leq 380$ nm) und langwellige infrarote Strahlung (IR-Strahlung; $780 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1$ Millimeter (mm)). Der sichtbare Lichtanteil umfasst $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$.⁹

Studien zeigten, dass kurzwelliges Licht (460 nm), dem Probandinnen und Probanden am Abend ausgesetzt waren, führte zu einer weitaus größeren Melatonin-suppression als längerwelliges Licht (550 nm).⁸ Damit einhergehend wurde eine größere Alarmreaktion ausgelöst, die sich in einer erhöhten Körperkerntemperatur und Herzfrequenz (HF) der Probandinnen und Probanden widerspiegelte.⁸ Bei Personengruppen, welche sich mehr natürlichem Licht in Form von Sonnenstrahlung aussetzten, konnte eine länger anhaltende kognitive Leistungsfähigkeit bzw. ein geringeres Risiko des Leistungsrückgangs nachgewiesen werden.¹⁰ Insbesondere im Bildungsbereich und im Arbeitsleben zeigte sich, dass der Lichteinfluss für die Konzentrationsfähigkeit eine wichtige Rolle spielt.² Weißes Licht mit hohem Blauanteil in Klassenräumen sowie in Büroräumen kann die kognitive Leistungsfähigkeit von Schülerinnen und Schülern sowie Arbeiterinnen und Arbeitern steigern.^{2,3} Zudem wurde auch einer geringere Tagesmüdigkeit und Schläfrigkeit am Abend nachgewiesen, wenn eine bessere subjektive Schlafqualität beobachtet wurde.³ Bei Untersuchungen des Effekts von Licht auf die kognitive Leistungsfähigkeit lieferten verschiedene Untersuchungen an Schülerinnen und Schülern folgende Ergebnisse: Jungen erzielten bessere Ergebnisse bei unterschiedlichen Farbtemperaturen, gemessen in Kelvin (K), nämlich insbesondere bei kaltweißer (4000 K) Lichtexposition, wobei sich Mädchen bei warmweißem (3000 K) Licht wohler fühlten.¹¹

Den Einfluss der Farbtemperatur (3000 K oder 4000 K) und der Beleuchtungsstärke, gemessen in Lux, (gedämpft; 300 lx und hell; 1500 lx) auf das Kurz- und Langzeitgedächtnis wies Igor Knez bei einer Lichtexpositionsstudie nach.¹¹ Doch eine Studie zur Leseleistung von Drittklässlerinnen und Drittklässlern konnte die o.g. Effekte nicht replizieren bzw. bestätigen.¹² Warum es zu diesen entgegengesetzten Ergebnissen kam, lässt sich am ehesten durch Faktoren wie Geschlechtsunterschiede, sowie die Qualität der Lehrenden bzw. Intelligenz der Kinder erklären, somit durch unterschiedliche weitere Einflussfaktoren.¹¹

Die Wirkung von Beleuchtungsbedingungen auf die Konzentration bei Schülerinnen und Schülern wurde anhand von mehreren Experimenten untersucht, hier werden beispielsweise drei Experimente erwähnt.¹³ Es wurden Beleuchtungsstärken zwischen 350 lx und 1000 lx und Farbtemperaturen zwischen 3000 K und 12000 K eingesetzt.¹³ Die Konzentrationsfähigkeit wurde anhand des Aufmerksamkeit-Belastungstests (d2-Test) ermittelt.¹⁴ Die Ergebnisse belegten eindeutig positive Auswirkungen der Lichtexposition auf die Konzentration der Schulkinder.¹³ Bei Exposition mit gedämpftem (< 20 lx) blauem ($\lambda = 468 \pm 8$ nm) Licht wurden eine Veränderung des Glukosestoffwechsels sowie eine Melatoninsuppression und Verbesserung der kognitiven Fähigkeiten beobachtet.¹⁵ Der genaue Mechanismus ist noch nicht ausreichend erforscht. Doch ergaben andere Studien, dass insbesondere eine Lichtexposition mit kurzwelligem (~ 480 nm) Licht eine stimulierende Wirkung auf die Sekretion der Corticoide aus den Nebennieren^{16,17} sowie eine stimulierende Wirkung auf die kardiovaskuläre Aktivität und Wachsamkeit besitzt.⁸

Weitere Analysen zeigten einen deutlichen Unterschied der subjektiven Schläfrigkeitsbewertung bei Interventionsgruppen mit 555-nm-Licht-Exposition und 460-nm-Licht-Exposition. Die Probanden, die dem kurzwelligeren Licht ausgesetzt waren, zeigten verringerte auditive Reaktionszeit und weniger Aufmerksamkeits-Fehlleistungen.¹⁸

Bei weiterer intensiver Forschung konnten Photorezeptoren mit einer Spitzensensitivität im Bereich von ungefähr 480 nm bis 490 nm im menschlichen Auge identifiziert werden, die den zirkadianen Rhythmus als Reaktion auf den Tag-Nacht-Wechsel der Umwelt an den Nucleus Suprachiasmaticus weiterleiten.¹⁹ Neben einer Unterdrückung der Ausschüttung von für den zirkadianen Rhythmus relevanten Hormonen wie z.B. Cortisol und Melatonin wurde auch eine erhöhte Aufmerksamkeit und kognitive Leistungsfähigkeit beobachtet.¹⁸ Die Auswirkungen von Lichtexposition auf den Cortisolspiegel wurden in unterschiedlichen Studien erforscht. Dabei wurde einerseits eine Senkung²⁰ des Cortisolspiegels, andererseits eine Steigerung²¹ des Cortisolspiegels, sowie auch Ergebnisse mit geringen Auswirkungen²² auf den Cortisolspiegel durch Lichtexposition nachgewiesen. Diese Diskrepanz ist am ehesten auf die unterschiedlichen Lichtintensitäten, Dauer der Bestrahlungen, den Zeitraum der Bestrahlung, verschiedene Wellenlängen und das unterschiedliche Probandenkollektiv zurückzuführen.²³

Die Entdeckung dieser sogenannten melanopsinhaltigen intrinsischen photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGCs) war für die Forschung von großer Bedeutung.^{24,25}

Da die maximale Sensitivität dieser Zellen zwischen $480 \text{ nm}^{26,27} \leq \lambda \leq 490 \text{ nm}^{25,28}$ liegt und sich dies im Bereich des blauen Lichtspektrums befindet, ist die Wirkung des blauen Lichtes auf physiologische Prozesse und kognitive Leistungsfähigkeit von besonderem Interesse. Zahlreiche Studien mit den o.g. ipRGCs konnten zeigen, dass das Licht über Stimulierung dieser Zellen und Weiterleitung der Signale an den suprachiasmatischen Nucleus auch die Wachsamkeit, die neurokognitiven Reaktionen, die Stimmung sowie weitere Aspekte moduliert.²⁹⁻³¹ Durch das weitere Voranschreiten der Forschung wurden in den vergangenen Jahren herkömmliche Lichtquellen wie Leuchtstoffröhren oder die bekannten Glühlampen/Glühbirnen zu einem Großteil von Leuchtdioden, den sogenannten Licht emittierenden Dioden (LED), ersetzt. Die Lichtspektren der LEDs sind dabei sehr unterschiedlich und unterscheiden sich von den herkömmlichen Lichtquellen.

Es besteht großes Interesse an der weiteren Erforschung der Wirkungen unterschiedlicher Spektren auf psychische, physiologische und endokrinologische Prozesse im menschlichen Organismus.³² Auch hier ist die Untersuchung der Wirkung des Lichts auf die Konzentration und Aufmerksamkeit ein wichtiger Aspekt.³³

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Wirkung verschiedener LED- Lichtspektren auf die Konzentration untersucht. Hierfür werden Daten der Studie „*Intelligente Beleuchtung – Photonik Forschung Deutschland – Steigerung von Gesundheit, Leistungsfähigkeit und Wohlbefinden durch geeignete spektrale, zeitliche und räumliche Lichtverteilungen*“^{*} ausgewertet und interpretiert. Untersucht wird hier anhand des Tests d2-R, wie sich unterschiedliches LED-Licht auf die Konzentrationsfähigkeit auswirkt.

2.1. Aufmerksamkeit und Konzentration als Merkmale der Leistungsfähigkeit

In der heutigen durch Leistungsdruck geprägten Gesellschaft spielen Konzentration, Aufmerksamkeit und kognitive Leistungsfähigkeit eine zunehmend große Rolle. Der psychische Druck auf jede Altersgruppe steigt, ob in der Schule oder im Arbeitsleben.^{34,35} Nicht nur der Leistungsdruck von außen, sondern auch von innen, beispielsweise durch hohe eigene Erwartungen oder ständige Erreichbarkeit, steigt.³⁶

* Für eine ausführliche Projektbeschreibung dieser Studie siehe: <https://www.photonikforschung.de/media/beleuchtung-und-led/pdf/NiviL-Projektsteckbrief-IntellBeleuchtung-Korr2018-03-bf-C1.pdf> (zuletzt abgerufen am 04.10.2023).

Termin- und Leistungsdruck belasten unterschiedliche Schichten der Gesellschaft, im beruflichen Kontext Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen sowie Führungskräfte.³⁷ In der Studie untersuchte Personen fühlen sich mehr als die Hälfte durch Leistungsdruck belastet.^{38,39} Dieser führt nicht selten zu psychischen Problemen, wodurch Arbeitsausfälle wegen Krankheit zunehmen.³⁵

In den höheren sozialen Schichten wurde regelmäßiger erhöhter psychischer Arbeitsdruck als Risikofaktor für Schlaganfall identifiziert.⁴⁰ Im Stressreport 2019 geben fast die Hälfte aller befragten Angestellten an, von Leistungsdruck betroffen zu sein.³⁹

2.1.1. Definition und Begriffserklärung

Der Begriff „Konzentration“ entstammt dem Lateinischen. Es gibt unterschiedliche Definitionen für die Konzentration. Ich beziehe mich auf die in der Psychologie übliche Definition.⁴¹ Konzentration ist angeboren und kann nicht wie eine Fertigkeit erworben werden. Dabei kann Konzentration jedoch geschult bzw. durch Übung gesteigert werden. Häufig werden Aufmerksamkeit und Konzentration gleichgesetzt, die Konzentration wird aber eher als eine besondere Form der Aufmerksamkeit angesehen.⁴¹ Doch diese Begriffe werden in der Literatur nicht einheitlich verwendet.⁴² Der Begriff Aufmerksamkeit umfasst eine Vielzahl von Aspekten. Hier wird Aufmerksamkeit im Sinne von Wahrnehmung gemeint. Somit wird die Selektion bestimmter Informationen aus einer Vielzahl von Informationen in den Vordergrund gerückt.⁴³ Der deutsche Psychologe Wilhelm Wundt hat den Begriff Aufmerksamkeit im Jahr 1913 folgendermaßen formuliert: „Die Inhalte, denen die Aufmerksamkeit zugewandt ist, bezeichnen wir nach Analogie des äußeren optischen Blickpunktes als den Blickpunkt des Bewusstseins oder den inneren Blickpunkt, die Gesamtheit der in einem gegebenen Moment vorhandenen Inhalte dagegen als das Blickfeld des Bewusstseins oder das innere Blickfeld.“⁴⁴ So wird die Konzentration als eine zunehmende Art der Aufmerksamkeit durch gesteigerte Fokussierung bzw. Intensitätsform von Aufmerksamkeit benannt.^{43,45} Der Begriff Konzentration wird nur in Verbindung mit einer Aufgabe erwähnt, eine Messung dieser geht immer mit einem Arbeitsauftrag einher.⁴⁶ Die Konzentrationsfähigkeit spiegelt sich in der Bearbeitung einer auszuführenden Aufgabe wider, der Genauigkeit dieser sowie der Schnelligkeit.⁴⁷ Die Aufmerksamkeit wird häufig in Verbindung mit Konzentration erwähnt. Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Aufmerksamkeit auf den Wahrnehmungsprozess bezieht und zur Selektion von Informationen dient, die Konzentration hingegen die Bearbeitung von Informationen betrifft.⁴⁸

2.1.2. Einflussfaktoren auf die Aufmerksamkeit und Konzentration

Es gibt verschiedene Einflüsse, die Konzentration und Aufmerksamkeit erschweren oder begünstigen können. Man unterteilt diese in innere und äußere Faktoren, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

Zu den inneren Faktoren zählen die physische und auch psychische Verfassung der Probandin und des Probanden, die äußeren zählen z.B. Tageszeit und Wetterverhältnisse. Die psychischen Faktoren werden wiederum unterteilt in emotionale und kognitive Faktoren.⁴⁹

Persönlichkeitsmerkmale wie Neurotizismus können die Konzentrationsleistung beeinflussen. Beispielsweise neigen Personen mit einer höheren Ausprägung von Neurotizismus dazu, mit einem höheren Arbeitstempo zu arbeiten, dabei allerdings mehr Fehler zu machen.⁵⁰ Zu den kognitiven Faktoren zählen bspw. das Gedächtnis, die Wahrnehmung und die Problemlösefähigkeit. Zum konzentrierten Handeln bzw. Arbeiten muss jede Person ihr Gedächtnis und ihre Wahrnehmung einsetzen.⁵¹ Zudem spielen Überforderung oder Überlastung eine Rolle. Schwierigkeiten bei Lernprozessen führen auch zu Schwierigkeiten in der Umsetzung von Aufgaben.⁵⁰ Bei der sogenannten mentalen Übermüdung wird davon ausgegangen, dass bei kontinuierlich ausgeführten kognitiven Tätigkeiten mentale Blockierungen durch eine steigende Überlastung des kognitiven Systems auftreten. Dies findet nicht absichtlich statt, die mentalen Blockierungen sind als zwangsläufige kurze Erholungspausen anzusehen. Aufgrund der kognitiven Belastung kann eine mentale Übermüdung auftreten, die durch die zwangsläufigen kurzen Erholungspausen regredient ist. Im Gegensatz dazu sind Müdigkeit bzw. Schläfrigkeit nicht durch kurze Erholungspausen zu verbessern, hier wirken nur längerfristige Erholungspausen.⁵⁰ Zu den physiologischen Parametern zählen z. B. Müdigkeit, Krankheit, Alter, Schmerzen sowie die Einnahme von Medikamenten, Koffein oder bestimmten Substanzen, die die individuelle Konzentrationsleistung beeinflussen.⁵⁰ Bestehender Schlafmangel der Probandinnen und Probanden führt dazu, dass die Konzentration auf gestellte Aufgaben gemindert ist, da die Leistung benötigt wird, um wach zu bleiben.⁵² Vigilanz bezeichnet die Fähigkeit, auf Veränderungen der Umgebung und Umwelt zu reagieren und somit einen Wachheitszustand für eine gewisse Zeit zu erreichen, in dem die Reaktion auf die Veränderung möglich ist. Demnach ist die Vigilanz nicht allein der Wachheitszustand. Der Begriff Aufmerksamkeit erweitert den Begriff Vigilanz, da die Aufmerksamkeit eine Richtung impliziert, worauf diese kognitiv gerichtet wird.⁵³ Schlafentzug kann Stimmung, Vigilanz und somit die Konzentration beeinträchtigen.⁵⁴ Die kognitive Leistungsfähigkeit und die Steigerung dieser, welche auch durch Schlafentzug negativ beeinflusst werden kann, gewinnt aufgrund der steigenden Leistungsansprüche in der heutigen Gesellschaft an Bedeutung.^{52,55}

Deswegen hat insbesondere das Interesse an der Messung der Vigilanz, Konzentration und Aufmerksamkeit zugenommen. Der Vollständigkeit halber soll hier erwähnt werden, dass das Alter, kurzzeitige sogenannte Nickerchen und geringe Koffeindosen die Konzentration positiv beeinflussen und somit eine Steigerung der Aufmerksamkeit, der Wachsamkeit und der Reaktionszeit bewirken können.^{56,57} Personen in höherem Alter neigen zum langsameren Arbeiten, machen jedoch weniger Fehler.⁵⁸ Dadurch bleibt die Konzentrationsleistung konstant, da sich die Arbeitstempo- und Genauigkeitskennwerte ausgleichen.^{58,59} Ferner kann die Konzentration sowohl durch äußere Faktoren als auch durch psychologische Aspekte unterbrochen werden.⁶⁰

Es gibt unterschiedlichste Störfaktoren, die die Konzentration und Aufmerksamkeit von der zu erledigenden Aufgabe auf sich ziehen. Diese Störfaktoren bzw. Einflussfaktoren können Geräusche sein, andere Menschen, Unterbrechungen der Arbeit oder visuelle Wahrnehmungen.⁶⁰ Als ein bedeutender Faktor bei externen Reizen mit einem starken Einfluss auf Konzentration und Aufmerksamkeit ist das Licht zu sehen. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 2.2 noch im Detail eingegangen. Unterschiedliche Lichtspektren können die Konzentrationsfähigkeit stark modifizieren.^{23,61} Nachfolgend wird hierauf sowie auf die Lichtreizverarbeitung und Auswirkungen auf die Konzentrationsfähigkeit näher eingegangen.

2.2. Die Wirkung und Verarbeitung von Licht im menschlichen Körper

Das Licht beeinflusst den menschlichen Organismus auf zwei Wegen, über die visuelle und die nicht-visuelle neuronale Sehbahn.⁶² Die Frage, welchen Einfluss der Lichtreiz auf die Physiologie des Menschen hat, hat sich noch nicht abschließend geklärt. Es ist bekannt, dass Licht die innere Uhr und damit den Rhythmus vieler Körperfunktionen beeinflusst, zum Beispiel den Stoffwechsel, die Körpertemperatur, den Hormonspiegel und vieles mehr.^{63,64}

2.2.1. Die physikalischen Eigenschaften des visuellen Lichts

Licht ist aus physikalischer Sicht der sichtbare, sich wellenförmig ausbreitende Teil der elektromagnetischen Strahlung. Die elektromagnetische Strahlung besteht aus schwingenden Energiequanten, welche vom Ort der Entstehung bis zum Auge des Betrachters eine bestimmte Zeit brauchen.³² Das menschliche Auge kann nur einen geringen Bereich innerhalb des elektromagnetischen Spektrums verarbeiten bzw. abbilden. Der entscheidende Unterschied zwischen sichtbarer und nicht sichtbarer elektromagnetischer Strahlung ist die Wellenlänge. Die Wellenlänge wird üblicherweise in Mikrometer oder Nanometer angegeben.

Die sichtbaren Lichtwellen sind kürzer als zum Beispiel Radarwellen und liegen ungefähr zwischen $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$.³²

Die Spektralfarben entsprechen jeweils einer Wellenlänge, beginnend mit kurzwelligem Blau über Grün und Gelb bis zum langwelligen Rot. Bei Mischung aller Farben ergibt sich das weiße Licht.³² Die Beleuchtungsstärke beschreibt die Intensität des Lichts, mit der eine bestimmte Fläche beleuchtet wird, und wird in Lux ($\text{lx} = \text{lumen/m}^2$) angegeben.³² Die Strahlung oberhalb von 780 bis 830 nm bezeichnet man als Infrarot-Bereich und die Strahlung unterhalb von 380 nm als Ultraviolett-Bereich.^{32,65}

Die UV-Strahlung kann auch zu Schädigungen führen, aber die Ozonschicht der Erdatmosphäre schützt vor einem Übermaß an kosmischer Strahlung und reduziert somit die UV-Strahlung so weit, dass eine gravierende Schädigung z. B. des Menschen vermieden wird.³² Im Folgenden wird die Verarbeitung des Lichtreizes im Körper erläutert.

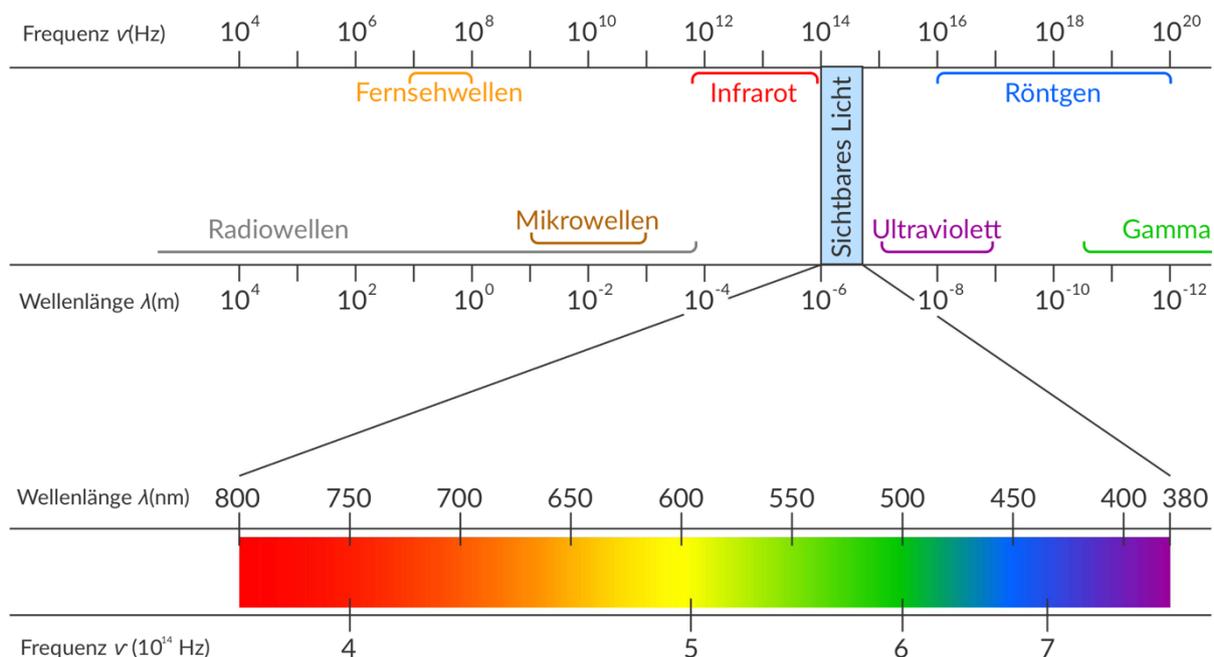


Abbildung 1: Elektromagnetische Strahlung

(Quelle: AMBOSS GmbH; Name der Abbildung: Elektromagnetische Strahlung, Kapitel Visuelles System;

[Kapitel zuletzt aktualisiert am: 18.04.2023; Kapitel zitiert am: 01.06.2023 um 14:09 Uhr; <https://next.amboss.com/de/article/mp0VJS?q=visuelles+system&m=LsawvN#Z140df76dd635c54233b98500176ebd5c>)]

2.2.2. Die Verarbeitung des Lichtreizes im menschlichen Körper

Die Augen sind die primären Sinnesorgane zur Verarbeitung der optischen Reize im menschlichen Organismus.⁶⁶ Mit dem Eintritt des Lichts in das Auge beginnt die visuelle Wahrnehmung.⁶⁶ Das visuelle Sinnessystem umfasst also die Sinnesorgane, die Augen und somit die Sehnerven, das Sehnervenchiasma, den Sehnerventrakt, den Nucleus geniculatus lateralis im Thalamus und die Sehrinde.⁶⁶ Ein natürlich oder künstlich erzeugter Lichtstrahl gelangt auf seinem Wege durch die Hornhaut, Linse und Glaskörper. Dies ist der dioptrische Apparat, welcher für die Lichtbrechung verantwortlich ist.⁶⁷ Das vom optischen System erzeugte Bild wird von den lichtempfindlichen Photorezeptoren in Nervensignale umgesetzt.⁶⁶ Diese Signale werden an Netzhautneuronen weitergeleitet, verarbeitet und schließlich an das Gehirn weitergeleitet.⁶⁸ Diese Strukturen projizieren ein verkleinertes und umgekehrtes Bild auf der Netzhaut, aufgrund verschiedener Eigenschaften ihrer Brechkraft.⁶⁶ Die weitere Reizverarbeitung findet in den Schichten der Retina statt, woraufhin über die sog. Transduktion der Lichtreiz als elektrisches Signal ins ZNS weitergeleitet wird.⁶⁹ Im Folgenden werden der anatomische Aufbau des Auges sowie der Netzhaut und die Signalverarbeitung des Lichtes näher erläutert.

2.2.2.1. Der anatomische Aufbau des Auges

Wenn der Lichtstrahl ins Auge fällt, dringt dieser durch die gesamten Schichten des Auges, bis er auf die Netzhaut trifft.⁶⁶ Der Augapfel, Bulbus oculi, befindet sich in der Augenhöhle, einer schützenden knöchernen Struktur im Schädel.⁶⁶ Dort ist der Augapfel von extraokularen Muskeln, die die Augenbewegung steuern, und mehreren intrakraniellen Nerven und Blutgefäßen umgeben. Zudem ist er in ein orbitales Fettgewebe eingebettet.^{66,67} Das in der Augenhöhle liegende Auge ist von folgenden Strukturen umgeben: extraokuläre Muskeln, die die Bewegung des Auges steuern, mehrere intrakranielle Nerven, Blutgefäße und orbitales Fettgewebe.⁶⁶ Somit werden mechanischer Schutz und eine Isolierung des Augapfels gewährleistet.⁶⁶

Der Augapfel wird in drei Schichten aufgeteilt.⁶⁶ Die äußerste Schicht, die Tunica fibrosa bulbi, besteht im vorderen, lichtzugewandten, Abschnitt aus der Hornhaut, auch Cornea genannt.⁶⁷ Die Lederhaut, auch Sklera genannt, befindet sich im hinteren Abschnitt, sie ist lichtdurchlässig und setzt sich aus kollagenen Fasern zusammen.^{66,67} Die kollagenen Fasern dienen zur Stabilität und Erhaltung der rundlichen Form.⁶⁶ Darauf folgt die nächste Schicht, die Tunica vasculosa bulbi (auch Uvea genannt).⁶⁷ Diese Schicht setzt sich aus der Iris, dem Ziliarkörper, auch Corpus ciliare genannt, und der Aderhaut, auch Choroidea genannt, zusammen.^{66,67} Die innerste Schicht ist die Tunica interna bulbi, die Netzhaut.⁶⁶

Die genannten Strukturen umschließen die lichtbrechenden Anteile des Auges, die Hornhaut, die Linse und den Glaskörper. Diese lenken somit das Licht auf den lichtempfindlichen Bereich der Netzhaut, die Makula.⁶⁶ Die Iris besitzt eine zentrale Öffnung (auch Pupille genannt) und gewährleistet somit die Verbindung zwischen der vorderen und hinteren Augenkammer sowie die Regulation des Lichteinfalls.⁶⁷ Letztere wird durch Muskeln durchgeführt; zum einen durch den ringförmigen Musculus sphincter pupillae, welcher parasympathisch innerviert wird und für die Miosis zuständig ist. Zum anderen durch den strahlenförmig zur Pupille verlaufenden Musculus dilatator pupillae, welcher sympathisch innerviert wird.^{67,70} Der Ziliarkörper ist über die Zonulafasern der Aufhängeapparat der Linse sowie zuständig für die Produktion des Kammerwassers.⁶⁷

Über die Zonulafasern wird die Kontraktion des Musculus ciliaris, welcher parasympathisch innerviert wird, übertragen, was zu einer Linsenverformung führt. Somit sind diese an der Akkommodation und Anpassung der Brechkraft beteiligt.^{67,70} Als letztes ist die Choroidea zu nennen, welche die Versorgung der äußeren Netzhaut gewährleistet.⁷¹

Die innerste Schicht ist die Tunica interna bulbi, auch Tunica nervosa oder Retina (Netzhaut) genannt. Hier findet die visuelle Reizverarbeitung statt.⁶⁷ Diese Schicht kann in zwei Lagen unterteilt werden, und zwar in eine lichtempfindliche Pars optica retinae, welche den Augenhintergrund einnimmt und mit der Innenseite der Choroidea anliegt, und eine lichtunempfindlichen Pars caeca retinae.⁶⁷ Beide gehen an der Ora serrata (Grenzlinie) ineinander über.⁶⁷ Die Pars optica enthält die ersten drei Neuronen der Sehbahn, deren Fortsätze den Nervus opticus bilden, welcher über den Discus nervi optici aus dem Bulbus austritt.⁶⁷ Hier findet somit keine Sinneswahrnehmung statt, weshalb dieser Punkt auch als „blinder Fleck“ bezeichnet wird.⁶⁷

Die Macula lutea, der gelbe Fleck, ist nicht vaskularisiert und in ihrem Zentrum befindet sich eine kleine Einbuchtung, die Fovea centralis.^{72,73} Die Fovea centralis wird auch als der Ort des schärfsten Sehens bezeichnet, da sich in ihr dicht aneinandergereiht ausschließlich Zapfen befinden.⁶⁷

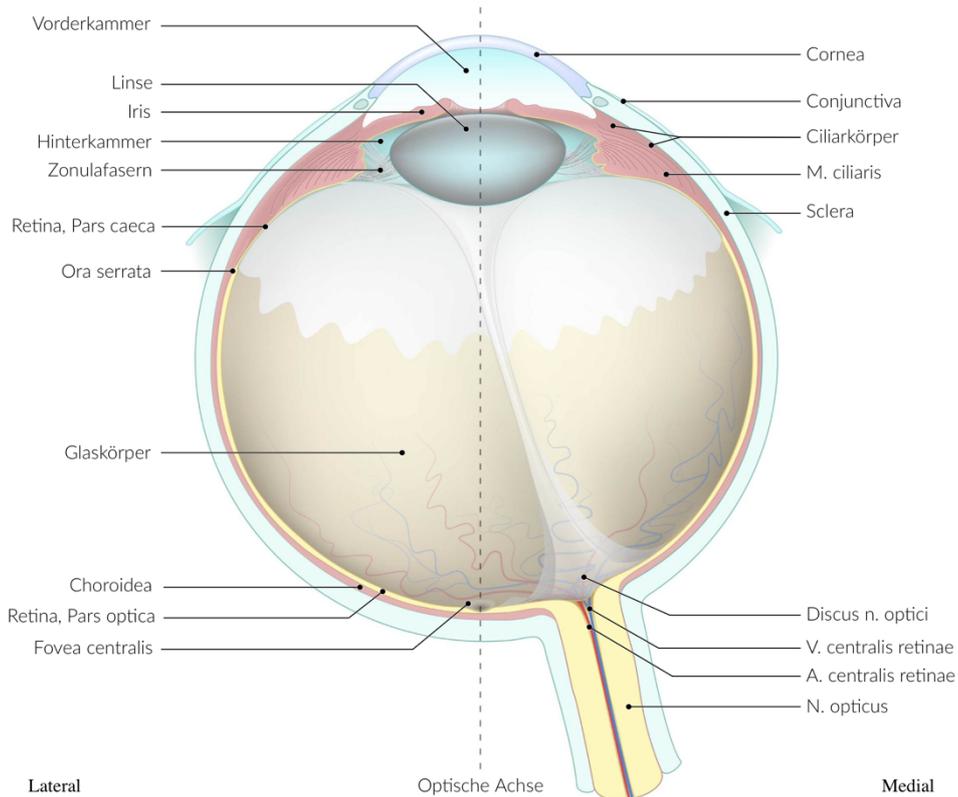


Abbildung 2: Aufbau des Auges

(Quelle: AMBOSS GmbH; Name der Abbildung: Aufbau des Auges, Kapitel Auge und Orbita; [Kapitel zuletzt aktualisiert am: 04.05.2023; Kapitel zitiert am: 01.06.2023 um 14:21 Uhr; <https://next.amboss.com/de/article/Ho0KWS?q=auge+und+orbita&m=Z4YZ36#Z73aca09d6854534edf53da2477a0e52c>)]

2.2.2.2 Der anatomische Aufbau der Retina

Die Retina, die Netzhaut des Auges, ist der Ausgangspunkt für unser Sehen.⁷⁴ Sie ist im Prinzip der Sensor unseres Auges und besitzt verschiedene Sinnes- und Nervenzellen, die im weiteren Verlauf erörtert werden.⁷⁵ Die Netzhautperipherie ist für das Nachtsehen und gewisse Aspekte des Bewegungssehens verantwortlich und hat eine geringere räumliche Sehschärfe.^{73,74}

Die Makula hingegen befindet sich zentral und ist für das räumliche Sehen mit hoher Sehschärfe verantwortlich, was zum Beispiel für Gesichtserkennung oder Lesen ausschlaggebend ist.⁷⁴ Die neuronale Netzhaut besteht aus mehreren Schichten, alle Schichten zusammen sind ungefähr 200 µm dick und setzen sich – vereinfacht – aus drei großen charakteristischen Zelltypen zusammen: den Photorezeptoren, Interneuronen und Ganglienzellen.⁷⁶

Die Photorezeptoren wandeln Lichtreize in Nervenimpulse um, die Interneurone verschalten die Photorezeptoren untereinander und die Ganglienzellen leiten die gebildeten visuellen Reize über den Sehnerv weiter.^{73,77,78}

Der schichtförmige Aufbau lässt sich grob in zwei Schichten unterteilen und zwar in das Stratum pigmentosum retinae und das Stratum nervosum retinae.⁷⁶ Das Stratum pigmentosum retinae ist eine sogenannte Pigmentepithelschicht.^{69,77,79} Diese dient dazu, das einfallende Licht zu absorbieren, die Streuung dieser Strahlung zu verhindern; ferner sind die dort befindlichen Epithelzellen für die Phagozytose zugrunde gegangener Zellen zuständig.^{76,78,80} Das Stratum nervosum retinae hingegen lässt sich in mehrere Schichten einteilen.⁷⁶ Betrachtet man die Retina von außen nach innen, wie auch die Lichtverarbeitung stattfindet, ist diese wie folgt aufgebaut:⁷⁷ An die Pigmentepithelschicht grenzt die Photorezeptorenschicht, das Stratum neuroepitheliale retinae, mit einem Außensegment, in dem die Lichtabsorption stattfindet und sich der Sehfärbstoff befindet, sowie einem Innensegment, in dem sich die Zellorganellen zur Energiebereitstellung und Proteinbiosynthese befinden.⁷⁷ Somit findet die Verarbeitung des Lichtes in den Photorezeptoren statt, in denen das Licht absorbiert und zu elektrischen Signalen umgeformt wird.⁷⁷ Danach wird dieses elektrische Signal durch die folgenden Schichten weitergeleitet:⁷⁸ Die äußerste Schicht des Stratum nervosum retinae beginnt mit der äußeren Grenzmembran, Membrana limitans externa, in der die Photorezeptoren untereinander durch tight junctions verbunden sind.⁷⁷ Daran schließt sich die äußere Körnerschicht, das Stratum nucleare externum, mit den Zellkörpern der Stäbchen und Zapfen an. Diese zählen zu den Photorezeptoren, welche für die visuelle Wahrnehmung zuständig sind.⁷⁴ Bei den Zapfen lassen sich drei verschiedene Unterformen differenzieren, die das einfallende Licht farb- bzw. wellenlängenselektiv (kurzwellig, mittelwellig, langwellig) absorbieren.⁶⁹ Die Empfindlichkeit dieser Unterformen für gewisse Wellenlängen bestimmt unsere Wahrnehmung.⁷⁶

Danach folgt die äußere plexiforme Schicht, das Stratum plexiforme externum, welches durch dazugehörige Neurone die synaptische Verbindung zwischen den Photorezeptoren und den Interneuronen darstellt.⁷³ In den plexiformen Schichten befinden sich Astrozyten, Mikrogliazellen und das retinale Gefäßsystem, welches sich aus sogenannten Perizyten und Endothelzellen zusammensetzt. Die daran anliegende innere Körnerschicht, das Stratum nucleare internum, enthält die Zellkörper der Amakrinen-, Bipolar- und Horizontalzellen.⁷⁷

Die Horizontalzellen ermöglichen den Signalaustausch zwischen den Photorezeptoren untereinander und die Amakrinzellen sind zwischen die Bipolarzellen und Ganglienzellen geschaltet.^{76,80} Darauf folgt erneut eine plexiforme Schicht zur synaptischen Verbindung, in diesem Falle die innere plexiforme Schicht, das Stratum plexiforme internum. Hier liegen die Synapsen zwischen Bipolarzellen und Ganglienzellen.⁷⁷

Daran anschließend befindet sich die Ganglienzellschicht, das Stratum ganglionare fasciculi optici, mit den Ganglienzellen, und als vorletztes die Nervenfaserschicht, das Stratum neurofibrarum, mit den Axonen der Ganglienzellen.⁷⁷ Als letztes schließt sich die innere Grenzmembran, Membrana limitans interna, an, wodurch die Retina vom Glaskörper getrennt wird.⁷⁷

Die Signale werden im weiteren Verlauf über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet, dieser wird aus den Nervenfortsätzen der Ganglienzellen gebildet.⁷⁷

Diese mehrschichtige neurale Retina wird auf der Photorezeptorseite von der Aderhaut und dem retinalen Pigment bedeckt und eben dadurch versorgt, da dort Endothelzellen, Fibroblasten, Perizyten und Melanozyten vorhanden sind.⁷³ Somit wird die Gesamtheit der neuralen Retina (= Stratum nervosum retinae), des retinalen Pigmentepithels (= Stratum pigmentosum retinae) und der Aderhaut zusammen als Netzhaut bezeichnet.⁷³

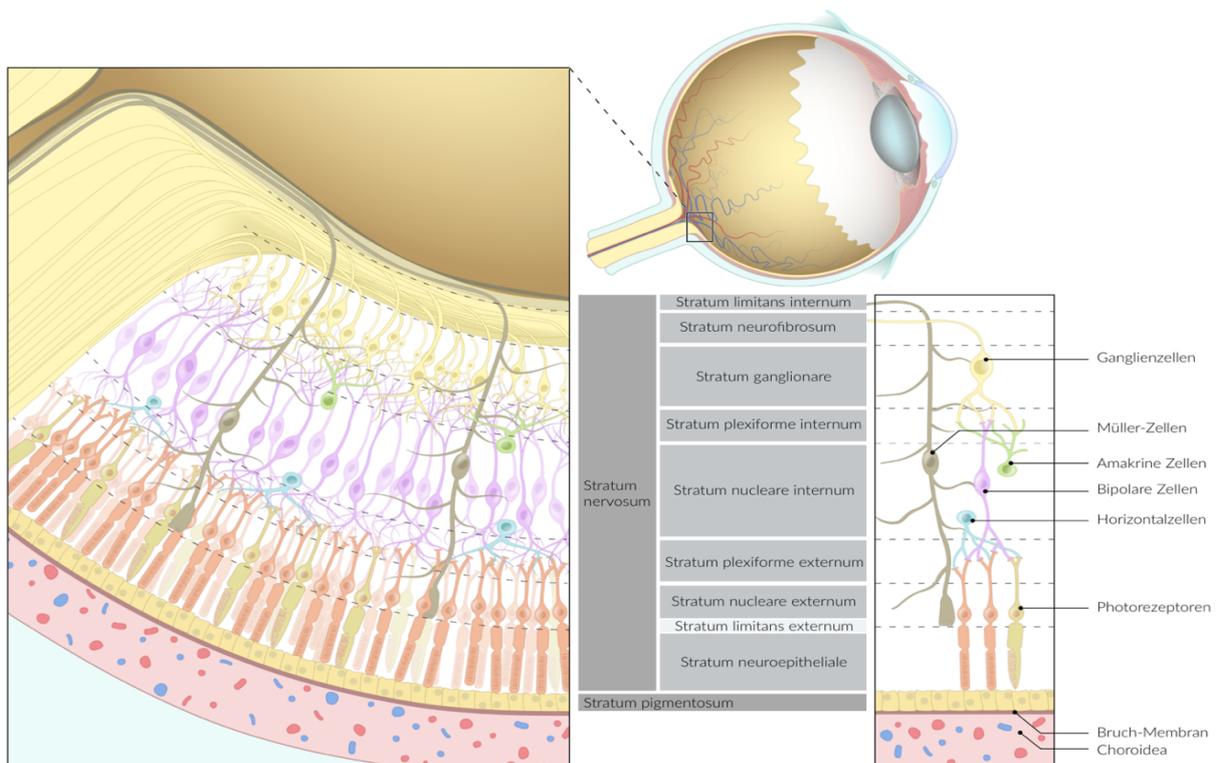


Abbildung 3: Retina

(Quelle: AMBOSS GmbH; Name der Abbildung: Retina, Kapitel Visuelles System;
 [Kapitel zuletzt aktualisiert am: 18.04.2023; Kapitel zitiert am: 01.06.2023 um 14:15 Uhr;
<https://next.amboss.com/de/article/mp0VJS?q=visuelles+system&m=04Ye36#Z140df76dd635c54233b98500176ebd5c>)]

In Abb. 3 sind die Schichten der Retina, die der Lichtstrahl durchlaufen muss, anschaulich dargestellt. Dieser muss die oben ausführlich beschriebenen Schichten der Retina durchlaufen, bis er auf die Photorezeptorenschicht trifft,⁷⁷ da die Lichtsinneszellen auf der lichtabgewandten Seite der Retina liegen.⁷⁹ Trifft der Lichtstrahl auf die Photorezeptorenschicht der Retina, werden durch ihn Prozesse in Gang gesetzt und diese durch die zuvor erwähnten Zellen weitergeleitet.⁶⁹ Diese molekularen Prozesse werden detaillierter im nächsten Kapitel beschrieben.

2.2.2.3 Photorezeptoren, ipRGCs und der Sehprozess

Beim Sehprozess reagiert der Mensch auf einen Umgebungsreiz und fokussiert diesen. Anschließend erfolgt die Reizaufnahme und -weiterleitung.⁸¹ Das Licht, das in das Auge einfällt, führt zu einer Stimulation unserer Sinneszellen auf der Retina.⁷⁶

Die dort befindlichen lichtempfindlichen Sinneszellen werden Photorezeptoren genannt und wandeln Licht in elektrische Signale um.⁸¹

Diese sind mit einer Reihe von Nervenzellen verbunden und aufgrund des Aufbaus der Retina mit diesen überdeckt und für die Reizumwandlung zuständig.⁷⁶ Früher wurde davon ausgegangen, dass zwei Photorezeptoren, Stäbchen und Zapfen, existieren.⁸¹ In den letzten Jahrzehnten und dem weiteren Verlauf der Forschung wurden insbesondere die retinalen Ganglienzellen (RGCs) entdeckt und bisher noch immer nicht abschließend erforscht.⁸¹ Die Stäbchen und die Zapfen liegen auf der lichtabgewandten Seite der Retina. Die Stäbchen sind so empfindlich, dass sie das Sehen auch bei Sternenlicht ermöglichen, die Zapfen hingegen sind zuständig für das Farbsehen bei Tageslicht.⁸¹ Auf der dem Licht- und dem Glaskörper zugewandten Seite der Retina liegen die retinalen Ganglienzellen. Diese sind zur Weiterleitung gewisser Signale und Merkmale des visuell erstellten Bildes an das Gehirn nachgeschaltet.⁸¹ Somit gelangt durch diese Neurone Information vom Auge an das Gehirn. Insbesondere eine spezielle Untergruppe, die lichtempfindlichen retinalen Ganglienzellen, spielt in der Forschung eine zunehmend zentrale Rolle. Diese retinalen Ganglienzellen werden intrinsische lichtempfindliche retinale Ganglienzellen genannt und exprimieren das Sehpigment Melanopsin.⁸¹ Nach aktuellem Stand der Forschung gibt es somit drei Zelltypen, die Licht in elektrische Signale umwandeln können, Stäbchen, Zapfen und ipRGCs.⁸¹ Die Zapfen und Stäbchen bestehen aus einem äußeren Segment, einem inneren Segment, einem Zellkörper und dem synaptischen Ende. Im äußeren Segment befindet sich das Sehpigment, auch Sehfärbstoff, das der Stäbchen nennt sich Rhodopsin und besteht aus Opsin und 11-cis-Retinal.^{74,76} Die Stäbchen sind lichtempfindlicher als die Zapfen und sind für das Sehen in der Dunkelheit zuständig.⁷⁶ Die Zapfen wiederum sind weniger sensitiv, aber schneller in der Signalweiterleitung.

Beim Menschen gibt es einen Stäbchentypen und drei Zapfentypen, die sich darin unterscheiden, dass sie verschiedene Wellenlängen des Lichts wahrnehmen.⁷⁶ Es gibt ungefähr 100 Millionen Stäbchen und sechs Millionen Zapfen; in der Fovea centralis liegen ganz dicht gepackt nur Zapfen, welche für das Farbsehen zuständig sind und somit ist dieser Teil ohne Stäbchen nachts blind.^{76,80} Der Übergangsbereich wird auch Dämmerungssehen oder mesopisches Sehen genannt, in diesem Bereich sind beide Rezeptorarten aktiv.⁷⁶ Damit die Rezeptoren des Auges auf die Leuchtdichten reagieren können, ist eine vorherige Adaptation nötig, das heißt eine „Gewöhnung“ bzw. Anpassung der Rezeptoren an die Dunkelheit.⁷⁶ Verschiedene Prozesse wirken bei der Adaptation zusammen, der Durchmesser der Pupille ändert sich, um den Lichteinfall ins Auge zu regulieren. Der weitaus wichtigere Schritt ist der Übergang von den Zapfen zu den Stäbchen, der zudem mit chemischen und neuronalen Prozessen verbunden ist.⁷⁶

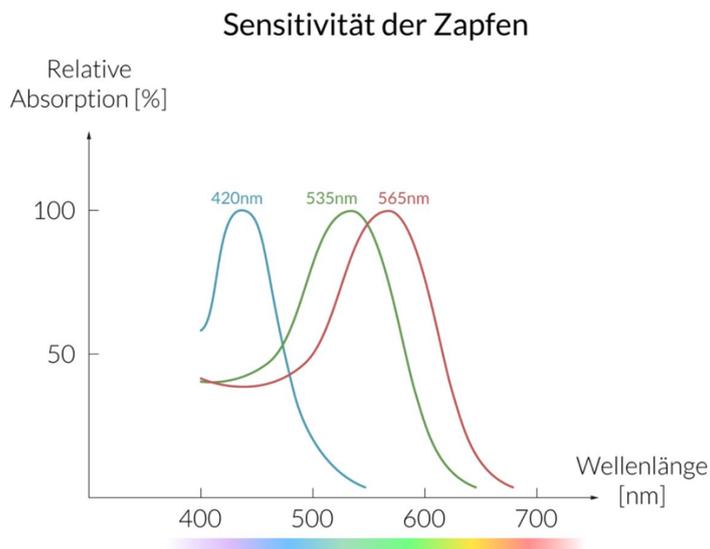


Abbildung 4: Sensitivität der Zapfen

(Quelle: AMBOSS GmbH; Name der Abbildung: Sensitivität der Zapfen, Kapitel Visuelles System; [Kapitel zuletzt aktualisiert am: 18.04.2023; Kapitel zitiert am: 01.06.2023 um 14:18 Uhr;

<https://next.amboss.com/de/article/mp0VJS?q=visuelles+system&m=wsYhCq#Z140df76dd635c54233b98500176ebd5c>)

Dunkeladaptation

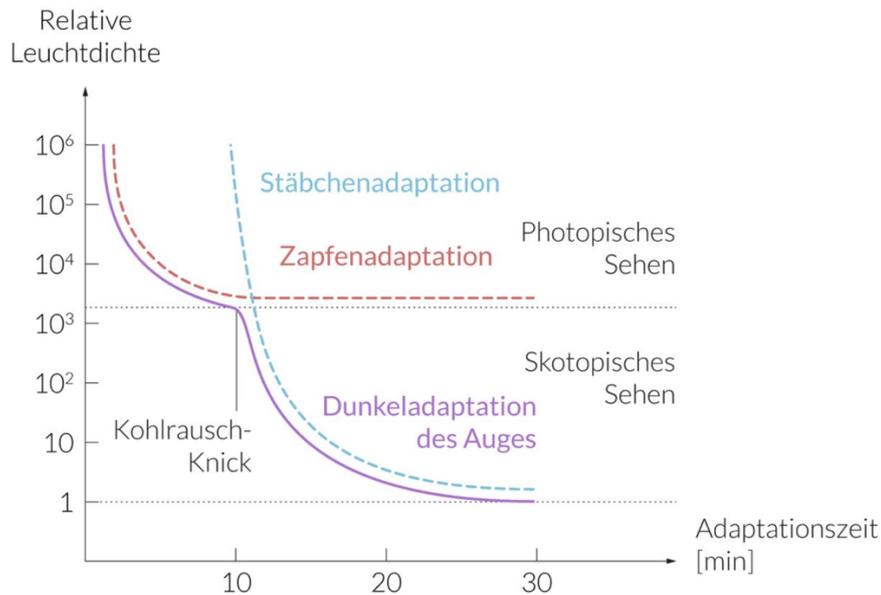


Abbildung 5: Dunkeladaptation

(Quelle: AMBOSS GmbH; Name der Abbildung: Dunkeladaptation, Kapitel Visuelles System; [Kapitel zuletzt aktualisiert am: 18.04.2023; Kapitel zitiert am: 01.06.2023 um 14:19 Uhr; <https://next.amboss.com/de/article/mp0VJS?q=visuelles+system&m=ZuYZpl#Z140df76dd635c54233b98500176ebd5c>)]

Wenn Licht einfällt, ändert das 11-cis-Retinal durch Absorption eines Photons seine Struktur zu einem all-trans-Retinal.⁷⁸ Dadurch wird aus inaktivem Rhodopsin aktives Rhodopsin bzw. Metarhodopsin II.^{74,76} Dieses aktiviert nun Transducin, welches aus drei Untereinheiten besteht, und zwar der alpha-, beta- und gamma-Untereinheit, und Guanosindiphosphat (GDP) und Guanosintriphosphat (GTP) bindet.^{74,76}

Das Metarhodopsin II tauscht GDP gegen GTP und Transducin zerfällt in ein T-alpha- GTP. Ein Metarhodopsin II aktiviert durch das Austauschen von GDP mit GTP hunderte der T-alpha-GTP-Komplexe. Dieser Komplex aktiviert das Enzym Phosphodiesterase (PDE).^{74,76} Die PDE besteht aus drei Untereinheiten, die gamma-Untereinheit fungiert als Inhibitor der PDE und im Ruhezustand hemmt sie deren enzymatische Aktivität. Das aktivierte Transducin bindet die gamma-Untereinheit der PDE und hebt somit die Blockade auf. Dadurch wird die PDE aktiviert und spaltet bis zu 1000 zyklische Guanosinmonophosphat-Moleküle (cGMP) pro Sekunde.^{74,76} Die PDE sprengt den Ring des cyclischen GMP, durch Hydrolyse, indem sie ein Wasserstoffmolekül einbaut. Dadurch sinkt die cGMP-Konzentration, woraufhin sich die Ionenkanäle schließen. Das Membranpotential wird negativer als - 40 Millivolt (mV), wodurch ein Nervenimpuls ausgelöst wird.⁷⁶ Dadurch, dass die Zelle hyperpolarisiert und die Glutamatfreisetzung unterbunden wird, werden die Bipolarzellen weniger gehemmt, wodurch diese mehr Transmitter ausschütten.⁷⁶ Dadurch depolarisiert die Ganglienzellmembran,

wodurch Aktionspotentiale der Ganglienzelle ausgelöst werden.⁷⁶ Die Unterbrechung des Impulses geschieht durch eine chemische Uhr in der alpha-Untereinheit. Diese inaktiviert Transducin durch Umwandeln des GTP in GDP.⁸² Das Transducin gibt die inhibitorische gamma-Untereinheit der PDE frei; diese heftet sich wieder an die PDE und stellt somit den Ruhezustand wieder her.⁷⁶ Danach vereinigt sich die alpha-Untereinheit des Transducins mit dem beta-gamma-Komplex und bringt das Transducin damit in die GDP Form.^{76,82} Das Rhodopsin wird durch eine spezifische Kinase inaktiviert. Die Bindung von Transducin wird blockiert und das System in einen Dunkelzustand versetzt.^{74,76} Zur Umwandlung des Lichtreizes in eine elektrische Erregung dienen die lichtabsorbierenden Sehfärbstoffe sowie eine Vielzahl an Enzymen und Signalmolekülen. Dieser Vorgang wird auch als photoelektrische Transduktion bezeichnet.⁶⁹ Die elektrische Erregung wird über den Sehnerv zum Gehirn übertragen und in den Hirnregionen des Hypothalamus, in der Hypophyse, verarbeitet. Im Hypothalamus findet die Sekretion des Corticotropin-Releasing-Hormons (CRH) statt, welches über eine weitere Reaktionskette die Cortisolsekretion in den Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren stimuliert.⁶⁹

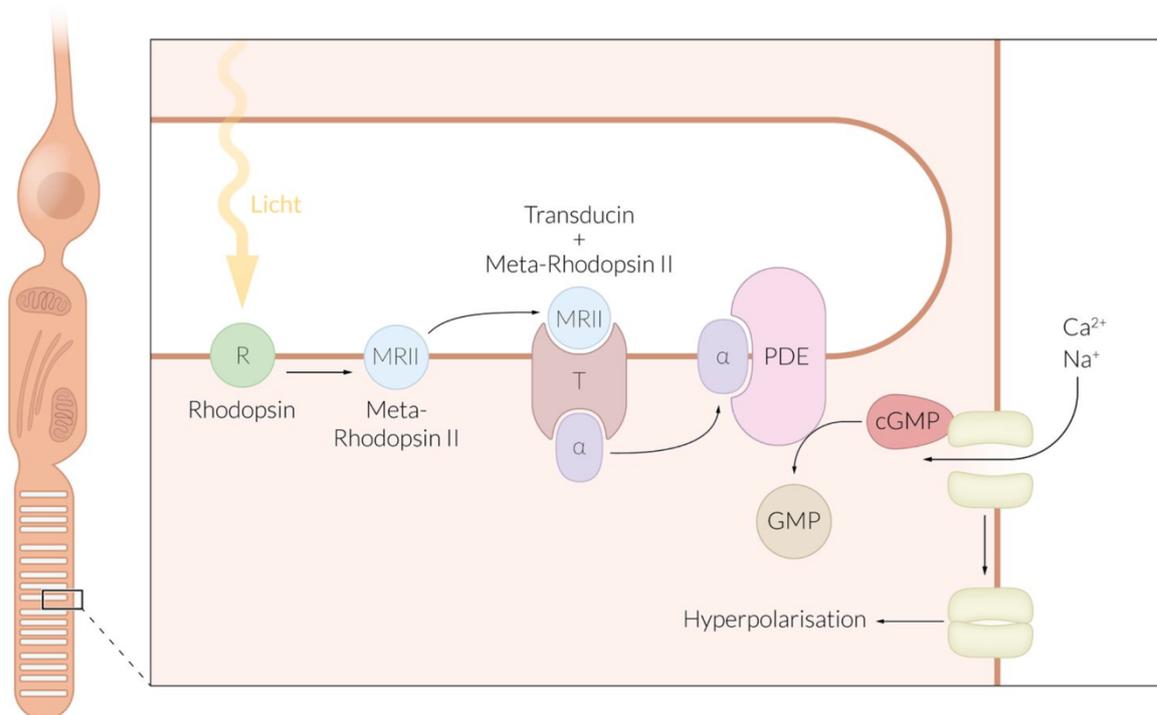


Abbildung 6: Phototransduktion

(Quelle: AMBOSS GmbH; Name der Abbildung: Phototransduktion, Kapitel Visuelles System; [Kapitel zuletzt aktualisiert am: 18.04.2023; Kapitel zitiert am: 01.06.2023 um 14:17 Uhr;<https://next.amboss.com/de/article/mp0VJS?q=visuelles+system&m=m7YVmq#Z140df76dd635c54233b98500176ebd5c>)]

Bei der Verarbeitung des Lichtreizes im menschlichen Organismus ist – wie bereits erwähnt – zwischen den nicht-visuellen und visuellen Informationen zu unterscheiden.⁶² Diese Verarbeitung erfolgt über unterschiedliche Nervenbahnen. Die nicht-visuelle verläuft über die retinohypothalamischen Bahnen, die visuelle Lichtreizweiterleitung hingegen über die Photorezeptoren, Zapfen und Stäbchen, weiter über retinale Ganglienzellen bis hin zur primären Sehrinde.⁸⁰ Farbwahrnehmung findet in Abhängigkeit der Wellenlänge (nm) der ausgesetzten farbigen Lichtexposition statt. Es muss eine bestimmte Wellenlänge gegeben sein, damit retinale Photorezeptoren gereizt, biochemische Reizweiterleitungs-Vorgänge ausgelöst und so der Lichtstimulus als Farbe wahrgenommen werden kann.⁸³

Die intrinsisch lichtempfindlichen retinalen Ganglienzellen, die das Photopigment Melanopsin enthalten, liefern Signale sowohl direkt an die innere Uhr, das Verhalten, den Hormonspiegel, den Schlaf, die Körpertemperatur und den Stoffwechsel als auch an verschiedene Hirnregionen, die an der Regulation von Wachheit, Aufmerksamkeit, kognitiver Leistungsfähigkeit und Stimmung beteiligt sind.⁶³

Durch Licht wird Melanopsin aktiviert, dadurch wird eine G-Protein-Kaskade ausgelöst, welche eine Depolarisation der Zellmembran bewirkt.⁸¹ Aktuell stehen diesbezüglich noch weitere Forschungen aus, es wird vermutet, dass Glutamat als primärer Neurotransmitter fungiert.⁸¹ Diese Reaktion ist derjenigen von Stäbchen und Zapfen gegenübergestellt, die sich hyperpolarisieren. Die ipRGCs innervieren unterschiedlichste Regionen des gesamten Gehirns.⁸¹

2.2.2.4 Der Lichteinfluss auf den SCN und hypothalamische Regionen

Die genannten ipRGCs und Signalweiterleitungen sind noch nicht abschließend erforscht, ein wichtiges Ziel ist aber die Analyse des hypothalamischen suprachiasmatischen Nukleus (SCN), der einen zentralen Schrittmacher beherbergt, zur Verschaltung verschiedener Prozesse, um die zirkadiane rhythmische Kohärenz zu steuern.^{84,85} Der zirkadiane Rhythmus ist einer der endogenen Biorhythmen des menschlichen Organismus. Zirkadiane Rhythmen sind intrinsische Rhythmen, die mit einer Periodizität von etwa einem Tag, ungefähr 24 Stunden erzeugt werden. Das zirkadiane System besteht aus mehreren Oszillatoren, wobei die zentrale Uhr im SCN des Hypothalamus die peripheren Uhren im ganzen Körper reguliert und damit synchronisiert.⁸⁶ Die genetische Ablation von ipRGCs hebt den Lichtempfang auf der Ebene des SCN vollständig auf, was darauf hindeutet, dass ipRGCs der einzige Kanal für den Lichteingang zur Modulation zirkadianer Gehirnfunktionen sind.^{87,88} Durch die Projektion der ipRGCs auf die zirkadiane Uhr in die suprachiasmatischen Kerne sorgen sie für eine Anpassung an den 24-Stunden-Tag-Nacht-Zyklus, und auch Veränderungen der Tageslänge lösen die entsprechenden saisonalen Verhaltensweisen aus.⁸⁵

Zudem projizieren sie auch in den Nucleus perihabenularis und die weiteren umliegenden Hirnregionen, die Stress, Stimmung, Konzentrationsverhalten wie das Lernen bei Menschen modulieren. Aufgrund der Auswirkungen von Licht auf ebendiese Eigenschaften wird es präventiv bzw. therapeutisch bei Erkrankungen in Betracht gezogen.⁸⁵ Die Lichtinformationen werden über den retinohypothalamischen Trakt (RHT) an den SCN und weitere hypothalamische Hirnregionen projiziert.⁸⁹ Studien zeigen, dass speziell Licht, welches die ipRGCs stimuliert, zu Verbesserungen der Wachsamkeit führt, welche mit einer Zunahme der Thalamus- und SCN-Aktivität einhergehen.^{81,90,91}

Die Wachsamkeit wird über Hirnregionen des Hypothalamus gesteuert. Da Lichteinfluss insbesondere diese Hirnregionen beeinflusst, wurden Hypothesen aufgestellt, dass Licht die Wachsamkeit reguliert.⁸⁹ Zu diesen Bereichen des Hypothalamus zählen der ventrale laterale präoptische Bereich (VLPO) und der Locus coeruleus (LC). Sobald der VLPO durch Lichteinfluss aktiv ist, entweder durch direkte Projektionen der ipRGCs oder aufgrund indirekter Projektion aus dem SCN, findet eine Hemmung der aufsteigenden Erregungssysteme statt.⁸⁹

Diese Projektionen des Lichteinflusses direkt und indirekt zum VLPO wurden bei Ratten und ähnliche Schaltkreise beim Menschen nachgewiesen, was darauf schließen lässt, dass Licht eine wichtige Rolle spielt.⁸⁹ Diese erwähnte Hemmung der aufsteigenden Erregungssysteme führt zu einer Förderung des Schlafs. Gegenätzlich fördert die Inaktivität der hemmenden Neurotransmitter des VPLO die Wachheit.⁸⁹ Zudem wurde belegt, dass Lichtexposition die Aktivität des SCN beeinflusst, und dass Licht ein Zeitgeber für den Hauptschrittmacher im SCN ist.^{85,92}

Melatonin und Cortisol, auch zirkadiane Hormone genannt, haben Einfluss auf den SCN.⁹³ Melatonin wird bei fehlendem Lichteinfluss in der Epiphyse produziert und wirkt hemmend auf den SCN.⁹³ Die Cortisolproduktion und -sekretion des sogenannten Stresshormons wird von der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HPA-Achse) reguliert.⁹⁴ Das Corticotropin Releasing Hormon des Hypothalamus wird durch die Störung der Homöostase, bzw. durch einen Stressor, freigesetzt.⁹⁴ Dies führt zur Freisetzung des Adrenocorticotropen Hormons (ACTH) des Hypophysenvorderlappens.⁹⁴ Das ACTH wirkt auf die Nebennierenrinde, was wiederum zur Freisetzung von Cortisol führt. Die Sekretion des CRH im Hippocampus und ACTH in der Hypophyse wird über den Cortisolspiegel im Blut über die negative Rückkopplung gehemmt.⁹⁴ Der genannte Ablauf, also die Aktivierung der HPA-Achse, veranlasst eine Erhöhung der Glukoseaufnahme und vermehrte Durchblutung des Gehirns.⁹⁵ Somit spielt Cortisol eine gravierende Rolle bei der Gedächtnisfunktion. Diese geht jedoch mit der Dauer und Plasmakonzentration einher, da bei einem langanhaltenden hohen Cortisolspiegel neurodegenerative Prozesse im Bereich des Hippocampus festgestellt wurden.^{96,97}

Der Hippocampus übernimmt eine entscheidende Funktion im deklarativen Gedächtnis, wie bereits erwähnt z.B. die Sekretion des CRH.⁹⁴ Es wurde nachgewiesen, dass geringer Stress die Gedächtnisfunktion positiv beeinflusst, starker Stress diese hingegen blockiert.⁹⁸⁻¹⁰⁰ Dieser Effekt hängt mit den Rezeptoraffinitäten zusammen. Der Glucocorticoidrezeptor (GR) bindet einzig GCs. Jedoch ist die Affinität von Cortisol und Corticosteron zum Mineralocorticoidrezeptor wesentlich höher als zum GR, weshalb der GR erst bei erhöhten Plasmakonzentrationen von Cortisol bzw. Corticosteron gebunden wird.^{101,102} In diesem Falle, bei einem sehr hohen Cortisolspiegel, wird auch der GR besetzt, woraufhin es zur negativen Rückkopplung kommt.^{98-100,103} Da Cortisol der zirkadianen Rhythmik unterliegt¹⁰⁴, liegt es nahe, dass Lichtexposition Auswirkungen auf den Cortisolspiegel hat.

Der Cortisolspiegel erreicht morgens seinen höchsten Konzentrationsanstieg, ca. eine Stunde vor dem Erwachen, während er um Mitternacht die niedrigste Konzentration aufweist.^{105,106} Lichtexpositionen können die genannten zirkadianen Hormone in unterschiedlicher Weise beeinflussen. Der Melatoninspiegel verändert sich schnell und kontinuierlich, die Cortisolspiegelschwankung hingegen ist komplexer ist, was noch weiter erforscht wird und abhängig von der Dauer der Lichtexposition ist.⁹³

Das heißt, dass die Wirkung von Licht auf den Cortisolspiegel unterschiedliche Ergebnisse erbringt: Die Lichtexposition kann die Cortisolkonzentration senken^{20,23}, ebenso erhöhen²¹, aber auch nur minimal beeinflussen²². Diese gegensätzlichen Ergebnisse lassen sich möglicherweise auf die unterschiedlichen Studiendesigns hinsichtlich der Lichtintensität, Dauer der Lichtexposition, der unterschiedlichen Wellenlängen des Lichtes und die verschiedene Probandenzahl erklären.^{23,107} Wenn der Melatoninspiegel während der Nacht erhöht ist, wurde ein niedriges Niveau der Wachsamkeit nachgewiesen, wohingegen bei Nachweis von geringerem Melatonin, während des Tages, ein hohes Niveau an Wachsamkeit aufgezeigt wurde.⁸⁹ Außerdem zählt der LC ebenso zur Regulierung der Wachsamkeit. Der LC projiziert in mehrere Regionen des zentralen Nervensystems (ZNS) und besteht aus einer Ansammlung von Noradrenalin-Neuronen.⁸⁹ Wird der LC angeregt, was durch Lichteinfluss und indirekte Projektionen vom SCN zum LC geschieht, steigt das Erregungsniveau. Daraufhin nimmt die Aktivität gewisser Hirnareale zu, wie des frontalen Neokortex und des Hippocampus, wo sich die Aktivität in Thetawellen äußert. Dieser Prozess lässt auf erhöhte Wachsamkeit schließen.⁸⁹ Durch Untersuchungen mit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) wurde gezeigt, dass eine Lichtexposition mit kurzwelligem blauen (465 nm – 485 nm) Licht^{25,108,109} Areale im Bereich des Hirnstamms aktiviert, welche dem LC entsprechen.¹¹⁰ Das kurzwellige blaue Licht stimuliert insbesondere die ipRGCs.²⁵ Wie oben erwähnt, enthält der LC Noradrenalin als Neurotransmitter. Funktionen die dem LC zugeordnet werden, zählen zum Bereich kognitiver Prozesse, wie zum Beispiel das Lernen und die Aufmerksamkeit.¹¹¹⁻¹¹³

Die Projektion der ipRGCs in die Habenulae, kleine gepaarte Kerne im Gehirn, beeinflusst die Kognition einerseits durch Beteiligung am zirkadianen Schaltkreis, andererseits aber auch unabhängig davon, da diese an vielen kognitiven und motivationalen Funktionen beteiligt sind.⁸⁵ Probandinnen und Probanden welche blauem Licht ausgesetzt wurden, waren nicht nur in Leistungstests – bezogen auf die Aufmerksamkeit – den Expositionen mit anderen Lichtspektren überlegen¹¹⁴; auch auf emotionaler Ebene reagierten sie sensibler.¹¹⁵

2.3. Stand der Forschung zu Licht und Aufmerksamkeit und Konzentration

Das Licht zeigt Effekte auf die Stimmung, den Schlaf, die Konzentration und auch die Motivation.^{63,64,85} Studien belegen, dass Lichtexposition einen positiven Effekt auf die Konzentration und Reaktionszeit hat.^{6,116,117} Das Licht ist somit nicht nur für das Sehvermögen essenziell, sondern auch die kognitive Leistungsfähigkeit kann durch verschiedene Lichteinstellungen, wie die Farbtemperatur (in K) oder die Beleuchtungsstärke (in lx) beeinflusst werden.^{85,117,118}

Mehrere Studien belegen, dass die Exposition von kurzwelligem (455 nm – 480 nm), blauem Licht während des Tages (dreiminütige Lichtexposition am Morgen) und der Nacht (im Zeitbereich von circa 23 Uhr bis 6:45 Uhr) die kognitive Leistung und Reaktionszeit in aufgabenspezifischen Prozessen verbessern kann.¹¹⁹⁻¹²³ Bei Aufgaben, die die Erinnerung betrafen, erbrachten die Probanden bei mäßig heller Lichtexposition (319,75 lx ± 13,89 lx) die besten Ergebnisse, wohingegen bei wahrnehmungsorientierten Aufgaben die Ergebnisse bei etwas hellerer Beleuchtung (2202,14 lx ± 22,21 lx) besser ausfielen (die Leuchtumgebung wurde durch natürliches Licht und kaltweiße trichromatische Lampen erzeugt).¹¹⁸ Die kognitive Leistung sowie die Reaktionszeit in aufgabenspezifischen Prozessen am Tage kann durch die Exposition von kurzwelligem (455 nm – 480 nm), blauem Licht verbessert werden.¹¹⁹⁻¹²³ Der positive Lichteinfluss gewisser Lichtspektren (420 nm ≤ λ ≤ 480 nm) auf die kognitive Leistungsfähigkeit wurde bereits bei kurzer 30-minütiger Lichtexposition¹²⁰ nachgewiesen, wohingegen bei einer 48-minütigen Lichtexposition¹²⁴ dieser Effekt nicht beobachtet werden konnte.¹²⁵ Bei der 30-minütigen Lichtexposition am Morgen konnte, mittels Messung der lexikalischen Entscheidungsaufgaben und des Aufmerksamkeits-Netzwerktests (ANT), die Steigerung der Konzentration und Aufmerksamkeit, sowie der Reaktionszeit, durch den positiven Lichteinfluss des blauen Lichtspektrums (420 nm – 480 nm) dargestellt werden.¹²⁵

Insbesondere für Nachtschichtarbeiterinnen und Nachtschichtarbeiter spielt die Lichtforschung eine bedeutende Rolle.^{126,127}

So wurde in Studien zur Nachtschicht eine Steigerung der Wachsamkeit und kognitiven Leistungsfähigkeit bei Exposition insbesondere gegenüber kurzwelligem Licht (420 nm – 480 nm) mit erhöhter Intensität (106 lx, 17000 K) nachgewiesen.^{128,129} Die Verbesserung der Lerneffizienz kann – wie schon erwähnt – durch die physikalischen Umgebungsfaktoren in Innenräumen angepasst werden.^{118,130}

Zudem wurde nachgewiesen, dass Umgebungsfaktoren wie Lufttemperatur, Lärmpegel und Beleuchtungsstärke einen signifikanten Haupteffekt auf die kognitive Leistungsfähigkeit haben.¹¹⁸ Die Farbtemperatur spielt eine entscheidende Rolle bezüglich der Wachsamkeit und somit Aufmerksamkeit, was durch die Messung einer Reaktionszeitaufgabe aufgezeigt werden konnte.¹³¹ Es wurde beobachtet, dass die geringste mentale Arbeitsbelastung, somit die beste kognitive Leistungsfähigkeit, bei einer Farbtemperatur von 3000 K und Beleuchtungsstärke von 750 lx nachgewiesen werden konnte.¹¹⁷ Bei höheren Farbtemperaturen (über 4000 K) verlängerte sich die Reaktionszeit, im Gegensatz zu niedrigeren Farbtemperaturen (2700 K, 55 lx), wobei eine verkürzte Reaktionszeit nachgewiesen werden konnte.¹³¹ Außerdem minimieren die erhöhten Temperaturen und Beleuchtungsstärken die Aufmerksamkeit. Die Reaktionszeit verlangsamt sich und die Fehlerquote nahm zu.³¹

Eine Leistungssteigerung und erhöhte Wachsamkeit konnten durch die Lichtexposition mit höherer Lichtintensität (min. 100 lx) und kurzwelligem (470 nm) Licht nachgewiesen werden.³¹ Da diese Effekte eher für das Bearbeiten simpler Aufgabenstellungen und nicht komplex zu bearbeitender Aufgaben aufgezeigt wurde, ist weitere Erforschung der Lichteinflüsse notwendig.³¹ Das Tageslicht ist allgegenwärtig und von wesentlicher Bedeutung für das Sehvermögen wie auch für die nicht-visuellen Informationsweiterleitungen an das Gehirn, was insbesondere die lichtempfindlichen retinalen Ganglienzellen, die das Photopigment Melanopsin exprimieren, in den Vordergrund stellt.⁸⁵ Bereits durch eine Studie mit erwachsenen Mäusen wurde gezeigt, dass die Lernfähigkeit dieser durch fehlende ipRGCs in der Kindheit und somit fehlende Projektionen der lichtgeförderten Signale beeinträchtigt wurde.⁸¹ Dadurch wurde die Bedeutung von Lichtverarbeitungen im frühen Lebensalter für die Konzentrations- bzw. Lernfähigkeit hervorgehoben.⁸¹ Zudem ist bereits die Lichttherapie in einigen Therapiekonzepten etabliert, bei Winter- und anderen Depressionen oder auch bei zirkadianen Schlafstörungen.⁸⁵ Somit deuten die Ergebnisse darauf hin, dass bei Aufgaben, die den Einsatz kognitiver Funktionen wie Aufmerksamkeit, Wachsamkeit, Konzentration und Reaktionszeit erfordern, diese durch Optimierung der Beleuchtungs- und Temperatureinstellung verbessert werden können, aber nicht nur die Beleuchtungseinstellungen allein zu betrachten sind.^{85,130}

Die Forschung der ipRGCs, also der nicht visuellen Verarbeitung und Weiterleitung des Lichtreizes, gewinnt zum genaueren Verständnis der Lichtwahrnehmung sowie zur Verbesserung der Lichtnutzung und zum Einsetzen neuartiger LED-Leuchten in öffentlichen Gebäuden an Interesse.^{128,132}

Aufgrund der genannten Forschungsergebnisse sowie noch nicht optimal genutzter Lichtverhältnisse für Lernumgebungen, das Gesundheitswesen, die Arbeitswelt, sowie auch für Privathaushalte (z. B. für eine Stimmungsaufhellung) und somit für das Minimieren von psychischen Erkrankungen, geht diese Studie auf die Auswirkung verschiedener Lichtspektren auf die Konzentrationsleistung ein. Um die Effekte von Licht auf die kognitive Leistungsfähigkeit, also auf die Aufmerksamkeit und die Konzentration zu spezifizieren, wurde die vorliegende Studie zur gleichen Tages- bzw. Uhrzeit, ausschließlich mit jungen männlichen und gesunden Probanden, in einer Umgebung, in der die Einflussfaktoren so gering wie möglich gehalten wurden, durchgeführt. Als Testinventar wurde der d2-Test zur Messung der Konzentrationsleistung eingesetzt. Der d2-Test ist sensitiv für kurze eingeplante Aktivitäten zur Steigerung der Aufmerksamkeit.¹³³ Die Untersuchung der grundlegenden Mechanismen im Zusammenhang mit dem Auge und der Signalweiterleitung zum Gehirn und die weitere Verschaltung sowie Neurotransmitterbeteiligung muss weiterführend im Labor unter Verwendung kontrollierter und genau definierter elektrischer Lichtquellen durchgeführt werden. Diese Studie konzentriert sich auf die Testung mittels d2-Test, um die Unterschiede zwischen den verschiedenen Lichtparametern herauszustellen.

2.4. Ableitung der Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Licht beeinflusst den zirkadianen Rhythmus, Schlaf, Wachsamkeit, Körpertemperatur und die Stimmung des Menschen.^{6,7,85,134,135} Wie bereits dargelegt, beschäftigen sich zahlreiche Studien mit dem Einfluss des Lichts, in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Lichtexposition, der Lichtfarbe und Lichtintensität auf die kognitive Leistungsfähigkeit.⁸⁵ Die Sensitivität der kognitiven Prozesse – wie auch der zirkadianen Rhythmik und Wachheit – gegenüber dem Einfluss einer künstlichen Lichtexposition durch LEDs wurde bereits von verschiedenen Forschungsgruppen bestätigt.^{8,61,136}

Vor dem Hintergrund dieses Wissenstands zu den visuellen und nicht-visuellen Wirkungen von Licht ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, den Einfluss unterschiedlicher künstlicher Lichtexpositionen von LEDs auf die kognitive Leistungsfähigkeit zu untersuchen. Durch den Untersuchungsaufbau mit je zwei Messungen pro Probanden werden die Unterschiede zwischen einer Standardbeleuchtung und einer Lichtfarbe als blau, rot, grün oder weiß untersucht.

Als Endpunkte wurden der d2-R Test und die Karolinska Sleepiness Scale (KSS) gewählt. Diese wurden in der Literatur mit der kognitiven Leistungsfähigkeit in Verbindung gebracht.^{129,137}

Zudem wurden als weitere Aspekte der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen und der State-Trait Anxiety Inventory (STAI) als Endpunkte gewählt, da das Wohlbefinden und das Empfinden von Angst Emotionen ausdrücken und diese ebenfalls auf die Konzentration eine Auswirkung haben können.^{138,139}

In der vorliegenden Arbeit wird – zusammenfassend – folgenden Fragestellungen nachgegangen:

- Werden Veränderungen in der Konzentrationsleistung, gemessen mit dem d2-R Test, durch Lichtexpositionen in unterschiedlichen Spektralfarben beobachtet und unterscheidet sich die Wirkung hinsichtlich der verschiedenen Spektralfarben?
- Werden Veränderungen in der Schläfrigkeit, gemessen mit der KSS, durch Lichtexpositionen in unterschiedlichen Spektralfarben beobachtet und unterscheidet sich die Wirkung bei den verschiedenen Spektralfarben?
- Werden Veränderungen im Wohlbefinden, gemessen mit MDBF, durch Lichtexpositionen in unterschiedlichen Spektralfarben beobachtet und unterscheidet sich die Wirkung in Abhängigkeit von den verschiedenen Spektralfarben?
- Werden Veränderungen in Bezug auf Ängste, gemessen mit dem STAI, durch Lichtexpositionen in unterschiedlichen Spektralfarben beobachtet und unterscheidet sich die Wirkung bei den verschiedenen Spektralfarben?

Hierfür wird den folgenden Hypothesen nachgegangen:

1. Es gibt einen Unterschied in der Differenz der Vorher- und Nachher-Messung der KL des d2-R Tests nach Lichtfarbe.
2. Anhand der Schläfrigkeit zeigen sich Unterschiede der kognitiven Leistungsfähigkeit nach Lichtexposition.
3. Anhand des Wohlbefindens zeigen sich Unterschiede der kognitiven Leistungsfähigkeit nach der Lichtexposition.
4. Anhand der Angst zeigen sich Unterschiede der kognitiven Leistungsfähigkeit nach Lichtexposition.

3. Material und Methoden

3.1. Probandenrekrutierung und Studienbeschreibung

Vor Beginn der Probandenrekrutierung wurde die vorliegende Studie von der Ethikkommission (Aktenzeichen: EK 353092014) in Deutschland anerkannt.

Die teilnehmenden Probanden nahmen freiwillig an der Studie teil; dafür wurden sie ausführlich über den Studienablauf, die Diagnostik und die Venenpunktion aufgeklärt. Zudem stimmten sie der Venenpunktion und der Diagnostik zu und unterschrieben dies sowie eine Datenschutzerklärung. Dazu erhielten sie vorab schriftliche Informationsblätter. Die entsprechenden Dokumente sind im Anhang hinterlegt (Aufklärungsbogen zum Studienablauf und Diagnostik, Einverständniserklärung zur Diagnostik, Aufklärung zur Venenpunktion, Einwilligung zur Venenpunktion, Datenschutzerklärung). Durch eine Ausschreibung der Deutschen Sporthochschule Köln im Internet wurden gesunde männliche Probanden angeworben und auch die Testungen wurden an ebendieser Hochschule von März 2016 bis September 2016 durchgeführt. Der Zeitaufwand für die Probanden belief sich auf jeweils 3,5 Stunden und die Vergütung für die einmalige Teilnahme betrug 50 Euro. Aufgrund von technischen Problemen bzw. erfolglosen Blutabnahmen wurden von 101 Probanden fünf ausgeschlossen. Um standardisierte Bedingungen zu schaffen, wurde die Studie unter Laborbedingungen durchgeführt. Zur Gewährleistung einer gewissen Homogenität der Stichprobe wurden nur männliche Probanden akquiriert, da der Cortisolspiegel bei Frauen zusätzlich noch zyklusabhängig ist. Das Probandenkollektiv der Studie setzte sich somit aus 96 männlichen Probanden im Alter von 18 bis 35 Jahren zusammen. Das Durchschnittsalter betrug 24,95 Jahre (SD = 4,095).

Zur weiteren Gewährleistung der genannten Homogenität und zur Vergleichbarkeit untereinander, vor dem Hintergrund einiger Einflussfaktoren auf Konzentration und Aufmerksamkeit sowie der Sensitivität des Steroidhormons Cortisol auf Umwelteinflüsse, wurden Ein- und Ausschlusskriterien festgelegt.

3.2. Ein- und Ausschlusskriterien

Wie bereits erwähnt haben hormonelle Schwankungen des weiblichen Zyklus eine Auswirkung auf den Cortisolspiegel und im weiteren eine Auswirkung auf die Konzentrationsleistung.¹⁴⁰ Die weiblichen Probandinnen hätten sich, um eine Verfälschung der Cortisolwerte und somit der Auswertung zu verhindern, in der Lutealphase befinden müssen.¹⁴⁰

Aufgrund der erschwerten Umsetzung beziehungsweise der problematischen Kontrolle der Zyklusphasen wurden nur männliche Probanden rekrutiert.

Ein weiteres Ausschlusskriterium bezog sich darauf, dass keine akuten oder chronischen Erkrankungen, wie Stoffwechselerkrankungen, Autoimmunerkrankungen, Bluterkrankungen, Lungenerkrankungen, Herz-, Kreislaufkrankungen, chronisch-entzündliche Erkrankungen und Infektionserkrankungen bestehen durften. Dies wurde aufgrund der bestehenden Auswirkung der Produktion von z.B. Zytokinen und deren möglicher Auswirkung auf die Cortisolwerte bzw. Verbindung mit dem Immunsystem als Ausschlusskriterium festgelegt.¹⁴¹ Ebenso wurde ausgeschlossen, dass die Probanden in der Gegenwart oder auch in der Vergangenheit an psychischen Vorerkrankungen leiden oder litten bzw. unter Einfluss von Psychopharmaka standen. Das Probandenalter belief sich auf die Altersspanne 18 Jahre bis 35 Jahre. Aufgrund von Auswirkungen auf die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HHNA) der bereits genannten Psychopharmaka, Nikotin und cortisonhaltiger Medikamente zählte deren Einnahme ebenfalls zu den Ausschlusskriterien. Somit überschritt der Nikotinkonsum der Probanden nicht zehn Zigaretten pro Tag und der Body-Mass-Index (BMI) lag unter 27 Kilogramm Körpergewicht pro Quadratmeter. Die Probanden wurden in den letzten zwei Wochen vor der Testung nicht geimpft. Ferner wurde der Nikotin-, Drogen-, Alkohol- und Nikotinkonsum dokumentiert, um mögliche Einflüsse auf die Blutparameter erklären zu können.

Diese Kriterien wurden im Vorfeld bereits telefonisch, anhand des „Strukturierten Klinischen Interviews für DMS-IV“¹⁴², sichergestellt. Zudem wurde im weiteren Studienverlauf durch Fragebögen nach außergewöhnlichen Belastungen, depressiven Verstimmungen sowie Schläfrigkeit der Probanden gefragt, da diese Einflussfaktoren auf die Konzentration und Aufmerksamkeit darstellen.^{134,143}

3.3. Das Studiendesign

Die vorliegende Studie fand in der Halle 6 der Deutschen Sporthochschule Köln am Sportpark Müngersdorf 6 in 50933 Köln statt. Am Testungstag wurden die Probanden für 12:45 Uhr einbestellt. Das Probandenkollektiv der Studie setzte sich aus 96 männlichen Probanden zusammen, welche über eine Ausschreibung akquiriert wurden. Wie bereits bei der Stichprobenbeschreibung erwähnt, wurden die oben genannten Ausschlusskriterien beachtet, damit die Homogenität der Stichprobe gewährleistet war. Damit standardisierte Testbedingungen gewährleistet werden konnten, wurden der Testraum sowie der Vorraum durch Vorhänge abgedunkelt und mit dem Luxometer die Beleuchtungsstärken gemessen. Ziel der Messungen waren die Ermittlung der Lichtverhältnisse auf Augenhöhe des Probanden im Vorraum und die Erfassung von Streulicht im Testraum. Die Licht- bzw. Beleuchtungsverhältnisse wurden in der Beleuchtungsstärke Lux (lx) dokumentiert.

Für die Messungen wurde ein Luxometer (Seriennummer: 3278) der Firma LMT GmbH, Berlin, verwendet. Des Weiteren wurde die Beleuchtungsstärke am Anfang und am Ende der Lichtexposition in der LED-Lichtkugel mit Hilfe einer installierten Halterung standardisiert gemessen, um eventuelle Abweichungen im Pre-Post-Vergleich der Lichtexposition festhalten zu können. Im Vorraum lag der Lichteinfluss bei ungefähr 940 Lux, verursacht durch die Deckenbeleuchtung. Im Testraum hingegen war es dunkel und nur die LED-Kugel war eingeschaltet. Dort wurde, wie bereits erwähnt, durch das Luxometer die genaue Beleuchtungsstärke passend zur Farbe überprüft. Um durch die Umgebung und Umwelt bedingte Schwankungen des zirkadianen Rhythmus auszuschließen, wurde ein einheitlicher Untersuchungsbeginn ab 13 Uhr gewählt. Zeitlich wurden für die Durchführung 3,5 Stunden eingeplant. Um die Herzfrequenz sowie die Zeit durchgehend zu dokumentieren, wurden den Probanden ein Polargurt und die dazugehörige Armbanduhr angelegt.

Um 13 Uhr wurde durch mich oder andere Medizinstudenten eine Venenverweilkanüle in eine geeignete Vene am Unterarm gelegt. Im Verlauf wurden darüber zehn Blutabnahmen à zehn Milliliter vorgenommen. Um eine Baseline bei der Herzratenvariabilität (HRV) zu erhalten, wurde der Proband gebeten, sich in eine regelmäßige Taktatmung zu begeben. Unter Taktatmung wurde im vorliegenden Fall das Ein- und Ausatmen in einem viersekündigen Intervall verstanden. Nachdem der Proband in die Atmung gefunden hatte, setzte der Studienleiter den ersten Marker an der Polaruhr. Daraufhin hielten die Probanden eine 60-minütige Ruhepause ein, in der sie standardisierte Tests und Fragebögen durchliefen. Zuerst füllte der Proband die standardisierten Fragebögen aus. Diese Fragebögen dienten dazu, mögliche Einflussvariablen auf die HPA-Achse und Konzentration sowie Aufmerksamkeit zu kontrollieren bzw. zu erfassen. Die Fragebögen werden im Kapitel 3.3.1 erläutert.

Nachdem der Proband die Fragebögen ausgefüllt hatte, wurde ein Farbsehtest mit Hilfe von Ishihara-Farbtafeln durchgeführt, durch welchen eine Rot-Grün- bzw. Gelb-Blau-Sehchwäche ausgeschlossen wurde. Im Anschluss wurde mit jedem Probanden der „Test d2-R“ durchgeführt. Der Test dauert insgesamt vier Minuten und 40 Sekunden. Anschließend wurde über einen Zeitraum von ca. elf Minuten eine Pupillographie durchgeführt, um die Müdigkeit der Probanden zu kontrollieren. Diese fand in Dunkelheit statt. Kurz vor der ersten Blutabnahme bzw. der Lichtexposition füllte der Proband den State-Trait-Angstinventar-Fragebogen und das Primary Appraisal Secondary Appraisal Scale (PASA) aus, womit der subjektiv empfundenen Stress der Probanden erfasst wurde.

Die erste Blutabnahme erfolgte eine Minute vor der 120-minütigen Lichtexposition. Die Studienleiterin oder der Studienleiter nahm zehn ml Blut über eine Sarstedt S-Monovette ab. Danach wurde der Proband in den Testraum gebracht, in dem er 120 Minuten in die konstruierte LED-Kugel schaute. Der Kopf lag währenddessen auf einer Kopfstütze auf. Daraufhin wurde er einem ausgewählten Farbspektrum ausgesetzt und der zweite Marker an

der Polar-Uhr wurde gesetzt. Ab der ersten Blutabnahme (-1 Minute) erfolgten regelmäßig alle 15 Minuten Blutabnahmen (15 min – 120 min) während der Lichtexposition. Zudem wurde durch das „AuReTim“ die Aufmerksamkeit des Probanden während der Lichtexposition erfasst. Das „AuReTim“ wurde zu Anfang der Lichtexposition, nach 50 Minuten und nach 100 Minuten für ungefähr vier Minuten durchgeführt. Der Proband hörte über Ohrstöpsel ein akustisches Signal und sollte schnellstmöglich reagieren und einen Knopf drücken. Das Zeitintervall wurde aufgezeichnet und so die Aufmerksamkeit ermittelt. Nach 120 Minuten Lichtexposition wurde der Proband aus dem Testraum geholt. Es erfolgte eine erneute Blutentnahme und der nächste Marker wurde an der Polaruhr gesetzt.

Ebenso wie kurz vor der Lichtexposition füllten die Probanden im Anschluss das State-Trait-Angstinventar und visuelle Analogskalen (VAS) aus, um die persönliche Einschätzung, bezogen auf die vorangegangene Erfahrung, zu erfassen. Zusätzlich wurde vor und nach der Lichtexposition der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen und die Karolinska Sleepiness Scale eingesetzt, um den Allgemeinzustand und Schläfrigkeit vor und nach der Lichtexposition zu vergleichen. Im Anschluss daran erfolgte erneut eine Testung mit dem Test d2-R sowie eine Pupillographie. Mit der letzten Blutabnahme, 15 Minuten nach der Lichtexposition, war der Versuchsablauf des Probanden beendet. Die Studienleiterin oder der Studienleiter stoppte die Polaruhr und zog dem Probanden diese sowie den Gurt aus. Zuletzt wurde die Venenverweilkanüle gezogen und der Proband füllte, bevor er ging, die Probandenabrechnung aus. Als Aufwandsentschädigung erhielten die Probanden 50 Euro.

Anschließend wurden die zehn Blutproben im Labor bei 3400 Umdrehungen pro Minute zehn Minuten lang durch die Studienleiterin oder den Studienleiter zentrifugiert. Danach wurden jeweils zwei Milliliter des Serums in zwei beschriftete Röhrchen pipettiert.

Diese wurden ins Labor zur Auswertung des Cortisols zum Labor Dr. Wissplinghof geschickt. Der Studienablauf wird in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

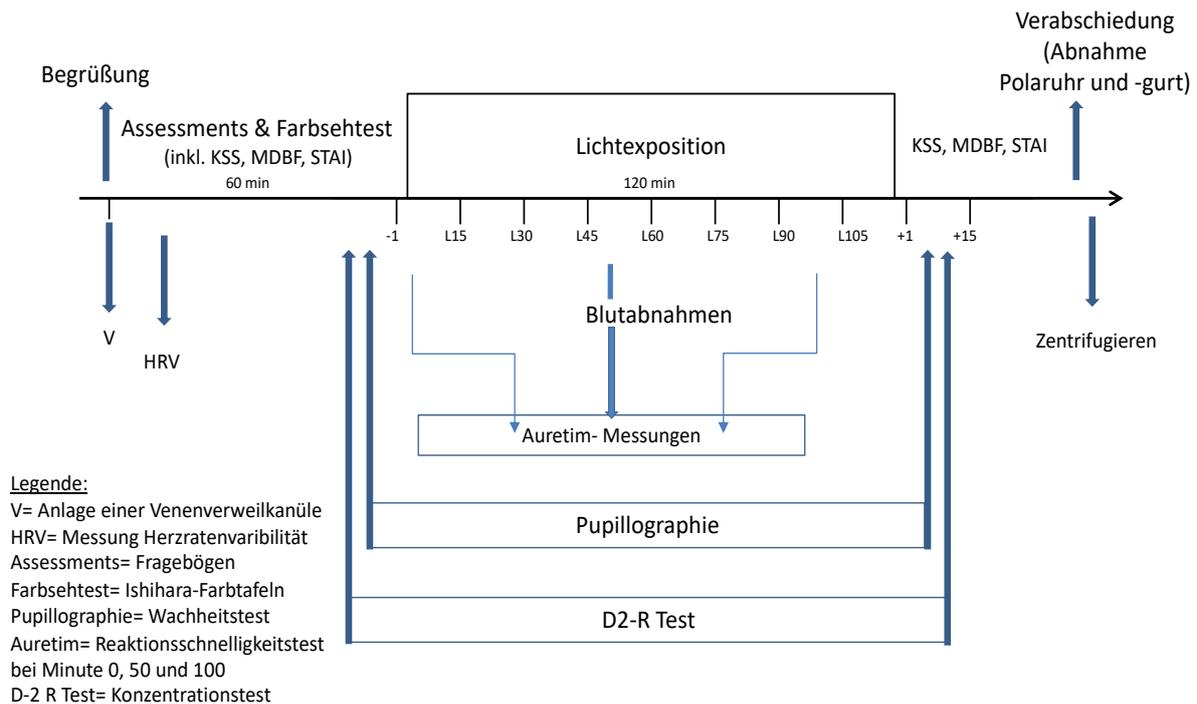


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Studienablaufs

3.4. Untersuchungsinstrumente

Im Folgenden werden die Untersuchungsinstrumente näher erläutert. Begonnen wird mit den Fragebögen, die während der Studie eingesetzt wurden. Anschließend wird der Aufbau des Tests d2-R ausführlich erklärt und zusätzlich die Kennwerte sowie die Auswertung erörtert. Darauf folgend wird der Reaktionstest AuReTim und die Pupillographie mit dem PupillenschlÄfrigkeitstests näher beschrieben. Zum Abschluss werden die LED-Lichtkugeln und deren Aufbau und Funktion behandelt.

Die eingesetzten Instrumente sind in Tabelle 1 mit ihren jeweiligen Messzeitpunkten dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der eingesetzten Studieninstrumente

Instrument		Messzeitpunkte	
Polaruhr	Herzratenvariabilitätsmessung	Uhr	gesamter Studienablauf
PSS	Perceived Stress Scale (Stress des letzten Monats)	Fragebogen	Pre LE
TICS	Trier Inventar zum chronischen Stress (Stress der letzten drei Monate)	Fragebogen	Pre LE
PHQ-9	Gesundheitsfragebogen (letzte zwei Wochen)	Fragebogen	Pre LE
Short Form 12	Gesundheitsfragebogen	Fragebogen	Pre LE
D-MEQ	Morning-Evening-Questionnaires (Erfassung des Chronotypen)	Fragebogen	Pre LE
NEO-FFI-25	NEO-Fünf-Faktoren- Inventar- 25 (Persönlichkeitsmerkmale)	Fragebogen	Pre LE
ERQ	Emotional-Regulation-Questionnaire (Emotionsregulationsfragebogen)	Fragebogen	Pre LE
PASA	Primary Appraisal Secondary Appraisal Scale	Fragebogen	Pre LE
MDBF	Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen	Fragebogen	Pre & Post LE
KSS	Karolinska Sleepiness Scale	Fragebogen	Pre & Post LE
STAI	State-Trait Anxiety Inventory	Fragebogen	Pre & Post LE
VAS	Visual Analog Scale	Fragebogen	Post LE
Pupillographie	Pupillen-Unruhe-Index (PUI)	Test	Pre & Post LE
d2	d2 Test (Konzentrationsleistungstest)	Test	Pre & Post LE
Cortisol	Hormonbestimmung	Blut/Serum	(siehe Skizze Studienablauf)
AuReTim	Reaktionstest	Test	(siehe Skizze Studienablauf)

Hinweis: Pre LE: vor Lichtexposition; Post LE: nach Lichtexposition

3.4.1. Fragebogen-Erhebungen

Im Folgenden findet sich eine detaillierte Beschreibung aller Fragebögen. Zunächst wird jeder Fragebogen allgemein vorgestellt, um danach näher auf seine Relevanz für das durchgeführte Projekt einzugehen.

Soziodemographischer Fragebogen

Der soziodemografische Fragebogen dient zur genaueren Beschreibung der Studienpopulation. Dadurch wurde das Alter, das Geschlecht, der Familienstand und der erworbene Schul- sowie Berufsabschluss erhoben.

Außerdem wurden Koffeinkonsum und Schlafprobleme abgefragt. Dies ist insbesondere aufgrund der Auswertung bezüglich der Konzentrationsleistung wichtig.

Perceived Stress Scale (PSS)

Die Auswirkungen des subjektiven Stressniveaus wurden anhand der Perceived Stress Scale ausgewertet (PSS). Dies ist ein Messinstrument, das die subjektive Stressempfindung in bestimmten Situationen erfasst, die auf eine Überschätzung der eigenen Fähigkeit im letzten Monat zurückzuführen ist.¹⁴⁴ Die Originalversion umfasst 14 Elemente, in dieser Studie wurde jedoch mit einer Kurzversion gearbeitet. Diese erfasst mittels zehn Items, wie unkontrollierbar, unvorhersehbar und überwältigend das Leben retrospektiv empfunden wurde.^{145,146} Sie besteht aus einer fünfstufigen Antwortskala, beginnend mit 0 (= nie) bis 4 (= sehr häufig). Zur Auswertung werden die Punkte addiert und je höher die Summe, nach vorheriger Umcodierung der positiven Items, ausfällt, desto belastender empfand der Proband den im letzten Monat erlebten Stress. Die Konstruktvalidität und Reliabilität ist gegeben.^{147,148}

Trier Inventar zum chronischen Stress (TICS/ Screening-Skala (SCSS))

TICS und SCSS beziehen sich auf die in den letzten drei Monaten chronischen Stressoren.¹⁴⁹ Bei der sogenannten SCSS handelt es sich um eine Kurzfassung, eine 12-Item-Screening-Skala zur unspezifischen und globalen Erfassung von chronischer Stressbelastung, da das TICS mit 57 Items für die durchgeführte Studie zu zeitaufwändig war. Aufgrund der durch verschiedene Untersuchungen belegten Validität und Reliabilität kann die SCSS als ein zuverlässiges und gültiges Testinstrument angesehen werden.^{149,150} Es werden mit einer fünfstufigen Antwortskala, beginnend mit null „nie“ bis vier „sehr häufig“, Ausprägungen zu fünf verschiedenen Stressarten erfragt. Diese fünf verschiedenen Stressarten sind chronische Besorgnis, arbeitsbezogene und soziale Anerkennung, Überforderung und Mangel an sozialer Anerkennung.¹⁵¹

Patients Health Questionnaire for Depression-9 (PHQ-9)

Das Depressionsmodul des Gesundheitsfragebogen „PHQ-9“ ist ein Screeninginstrument für subjektiv empfundene Beeinträchtigungen in den letzten zwei Wochen. Es werden mit einer vierstufigen Antwortskala, beginnend mit 0 (= überhaupt nicht) bis 3 (= beinahe jeden Tag), Ausprägungen zu vier verschiedenen Empfindungen bzw. Symptomen erfragt. Zur

Auswertung werden diese Punkte addiert; je höher der Punktescore, desto stärker ist die depressive Veranlagung.¹⁵² Aufgrund der leichten Umsetzung und Durchführbarkeit ist dies ein ideales Instrument zur schnellen Abklärung von depressiven Symptomen, welche somit die subjektive Stimmung widerspiegeln.¹⁵³

Zur Überprüfung der Konstruktvalidität des Fragebogens wurden Testergebnisse mit denen aus unabhängigen professionellen Psychologengesprächen verglichen.¹⁵³ Die Studienergebnisse bestätigen die Konstruktvalidität der PHQ-Depressionsskala.¹⁵³

Short Form-12, Kurzform vom Short Form-36 Gesundheitsfragebogen

Der Short Form-12 (SF-12) ist ein Gesundheitsfragebogen zur Erfassung der krankheitsübergreifenden Erfassung der Lebensqualität, anhand eines selbstverwalteten schriftlichen Erhebungsinstruments.¹⁵⁴ Die Leistungsfähigkeit, Validität und Reliabilität des SF-12 wurde anhand von Patienten mit zerebralen Aneurysmen, sowie gesundheitsbezogener Lebensqualität älterer Menschen und zudem für die psychische Gesundheit in der epidemiologischen Forschung untersucht.¹⁵⁵⁻¹⁵⁸ Auch wurde dargelegt, dass der SF-12 Gesundheitsfragebogen als nützliches Screening-Instrument für Depression und auch für Angststörungen geeignet ist.¹⁵⁸

Morningness-Eveningness-Questionnaires (D-MEQ)

Dieses Testverfahren wurde 1976 von J. A. Horne und O. Östberg entwickelt.¹⁵⁹ Die Intention war es, einen Fragebogen zu erstellen, der es ermöglicht, Menschen anhand ihrer Präferenz bezüglich der zirkadianen Phasen zu klassifizieren.¹⁵⁹ Somit dient der D-MEQ der Erfassung des Chronotyps.^{159,160} Es zeigte sich eine hohe Korrelation zwischen dem Verlauf der Körperkerntemperatur und der Chronotypenzuordnung.^{161,162} Aufgrund der signifikanten Korrelation der Testergebnisse des D-MEQ mit den Vergleichsparametern, wurde dieser ein validiertes Instrument.¹⁶⁰ Durch die Abfrage von 19 Fragen wird die präferierte Tageszeit für gewisse Tätigkeiten abgefragt.¹⁶² Es können 16–86 Punkte gesammelt werden und anhand von Cut-off-Werten erfolgt die Chronotyp-Klassifizierung der Probandinnen und Probanden.¹⁶³

- Definitiver Abendtyp: 16–30 Punkte,
- Moderater Abendtyp: 31–41 Punkte,
- Intermediärer Typ: 42–58 Punkte,
- Moderater Morgentyp: 59–69 Punkte
- Definitiver Morgentyp: 70–86 Punkte.¹⁶³

NEO-Fünf-Faktoren-Inventar-25 (NEO-FFI-25)

Dieser Fragebogen zeigt die Persönlichkeitsmerkmale des Probanden. Es werden mit einer fünfstufigen Antwortskala, beginnend mit „starker Ablehnung“ bis „starke Zustimmung“, Ausprägungen zu fünf verschiedenen Persönlichkeitsmerkmalen erfragt.¹⁶⁴ Dieses Screeninginstrument ist validiert und wird weltweit, nicht nur in der Grundlagenforschung zur Entwicklung von Persönlichkeitsstrukturen, sondern auch für den klinischen Gebrauch eingesetzt.¹⁶⁵

Emotional Regulation Questionnaire (ERQ)

Der ERQ ist ein Fragebogen zur Emotionsregulation. Hierbei handelt es sich um einen der am weitesten verbreiteten und validen Fragebögen zur Bewertung von Emotionsregulationsstrategien.¹⁶⁶ Er wurde entwickelt zur Messung kognitiver Strategien der Emotionsregulation. Es gibt unterschiedliche Formen, Kurzformen sowie Langformen. Für diese Testung wurde eine Kurzform mit zehn Items gewählt. Die zehn Fragen sollen zeigen, wie die oder der Befragte Emotionen empfindet sowie diese nach außen hin verbalisiert werden.¹⁶⁷ Es geht um die Regulation der Emotionen, somit um die Strategien, die dafür angewandt werden, Unterdrückung oder eine Neubewertung. Dafür gibt es eine Antwortskala von eins „Stimmt überhaupt nicht“ bis sieben „stimmt vollkommen“.¹⁶⁷

State-Trait Angstinventar (STAI)

Der State-Trait Angstinventar zeigt bzw. misst die Neigung der zu testenden Person zu Ängsten.¹⁶⁸ Somit werden das Vorhandensein, der Schweregrad von Angstsymptomen und die Neigung zu Angstzuständen durch einen Fragebogen ermittelt. In diesem Fall wird insbesondere auf die Zustandsangstskala geachtet, welche den aktuellen Zustand der Angst bewertet, indem Fragen zu der Gefühlslage in diesem Moment gestellt werden.¹⁶⁹ Diese besteht aus 20 Items, welche durch eine Antwortskala aus vier Möglichkeiten die Intensität der Gefühle bewerten, indem eine der vier Antwortmöglichkeiten ausgewählt werden muss von „fast nie“, „manchmal“, „oft“, „fast immer“.¹⁶⁹ „Fast nie“ entspricht demnach einem Punkt und bis zu „fast immer“ jeweils ein Punkt mehr, somit können pro Frage ein bis vier Punkte erzielt werden. Diese Punkte werden summiert; je höher die Gesamtpunktzahl, desto größer ist der Hinweis auf Angstzustände.¹⁶⁹

Primary Appraisal Secondary Appraisal Scale (PASA)

Der PASA ist ein Instrument für die kognitive Bewertung der Situation.¹⁷⁰ Er besteht aus einer Erstbewertung sowie Zweitbewertung.¹⁷⁰ Erst wird die Situation und das Ausmaß eingeschätzt, die ein Stressor mit sich bringen könnte. Anschließend geht es darum, die Ressourcen und Optionen zur Bewältigung dieses Stressors einzuschätzen.¹⁷⁰

Visuelle Analogskala (VAS)

Die visuelle Analogskala besteht aus acht Fragen zur persönlichen Einschätzung der Situation. Die Skala beginnt bei null „trifft überhaupt nicht zu“ und geht bis 100 „trifft vollkommen zu“.¹⁷¹ Mit der Erhebung der visuellen Analogskala wurde die persönliche Einschätzung bezüglich der Empfindungen und Emotionen der aktuellen Situation vor und nach der Lichtexposition durchgeführt.

Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)

Der mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen dient der Erfassung der momentanen Gemütslage und Befindlichkeit der Probanden.¹⁷² Die Erfassung erfolgt mithilfe einer Antwortskala von fünf Stufen, beginnend mit „überhaupt nicht“ bis „sehr“, der drei bipolaren Befindlichkeiten „gute – schlechte Stimmung“, „Wachheit – Müdigkeit“ und „Ruhe – Unruhe“.¹⁷² Jede der genannten Zuordnungen besteht aus zwei bipolaren Items zur Kennzeichnung der Pole. Wir nutzten aus Zeitgründen die Kurzversion mit insgesamt 12 Items und somit einer kürzeren Bearbeitungsdauer von ungefähr fünf Minuten. Der MDBF wurde vor und nach der Lichtexposition durchgeführt, wodurch eine eventuelle habituelle Veränderung der Befindlichkeit erfasst werden konnte.^{172,173}

Karolinska sleepiness scale (KSS)

Zum Vergleich des subjektiven Wachheitsempfindens vor und nach der Lichtexposition wurde die Karolinska-Schläfrigkeitsskala (KSS) verwendet. Die KSS ermöglicht es, die situative Müdigkeit bzw. das Wachheitsempfinden des Probanden einzuschätzen.¹⁷⁴ Diese Einschätzung wurde vor und nach der Lichtexposition durchgeführt, um Vergleichswerte zu schaffen. Die genannte Skala ist ein eindimensionales Testverfahren; indem der Proband auf

einer Skala von 1 (= äußerst wach) bis 10 (= äußerst schläfrig, kann nicht wachbleiben) beantwortet, wird sein subjektives Wachheitsempfinden eingeschätzt.

Das Testverfahren stellt ein zuverlässiges Instrument für die Bestimmung der subjektiven Schläfrigkeit dar und findet in diversen Settings Anwendung.^{175,176} Es wurde erstmalig 1990 anhand von Alpha- und Theta-EEG-Aktivität validiert und später durch den Vergleich elektroenzephalographischer Aktivität erneut bestätigt.^{5,177}

3.4.2. Test d2-R

Der Test d2-R zählt zu den allgemeinen Leistungstests und ist die altersspezifisch normierte Weiterentwicklung des Tests d2.^{47,178} Da er keine Grundbildung wie das Rechnen verlangt, zählt er zu den häufig angewendeten psychischen Testverfahren im Altersbereich von neun bis sechzig Jahren.⁴⁷ Die Testvorlage enthält insgesamt 798 Zeichen, die beiden Buchstaben d und p, welche mit ein bis vier Strichen oberhalb oder unterhalb versehen sind. Die Aufgabe besteht darin, alle Zielitems, somit alle d's mit zwei Strichen, im Test zu finden und dann durchzustreichen.¹⁷⁹ Der Test besteht aus vierzehn Zeilen und jede Zeile aus 57 Zeichen. Für die abschließende Auswertung des Testverfahrens werden die Zeilen in Blöcke zusammengefasst, ein Block setzt sich aus drei Zeilen und somit 171 Zeichen zusammen. In den Blöcken sind jeweils 77 Zielobjekte und 94 Distraktoren, sogenannte Verwechslungsfehler, vorhanden.¹⁷⁹

Die erste sowie die letzte Zeile werden nicht gewertet, um die Fehlerrate zu minimieren, welche aufgrund von verspäteter Wahrnehmung des Start- oder Stoppsignals zustande kommen könnten.¹⁸⁰ Demnach sind bei einer vollständigen fehlerfreien Bearbeitung des Tests 308 Zielobjekte durchgestrichen. Für die gesamte Bearbeitung wird eine Zeit von vier Minuten und 40 Sekunden benötigt bzw. geplant, nach jeweils 20 Sekunden wird ein Signal gegeben und der Proband beginnt die Bearbeitung der nächsten Zeile.¹⁷⁹ Es werden insgesamt fünf Kennwerte ermittelt, um den Test ordnungsgemäß auswerten zu können. Dazu zählen die Konzentrationsleistung, bearbeiteten Zielobjekte (BZO), Fehlerprozent (F%), Auslassfehler (AF) sowie die Verwechslungsfehler (VW).⁴⁷ Die Konzentrationsleistung ist der wichtigste Kennwert und ist vom Arbeitstempo sowie der Genauigkeit abhängig.⁴⁷ Somit spiegelt dieser Wert das Arbeitsverhalten der Probandin und des Probanden wider. Der Konzentrationsleistungskennwert entspricht der Anzahl der entdeckten bzw. durchgestrichenen Zielobjekte nach Abzug der Verwechslungsfehler und Auslassfehler.⁴⁷ Von den bearbeiteten Zielobjekten, summiert über alle Zeilen, werden die Auslassfehler, also übersehene bzw. ausgelassene Zielobjekte (auch als falsch negativ bezeichnet), sowie die Verwechslungsfehler, irrtümlich angestrichene Zielobjekte bzw. falsch positive, subtrahiert und

ergeben somit die Konzentrationsleistung.¹⁷⁹ Im Idealfall wird der Konzentrationsleistungskennwert immer gleich ausfallen, unabhängig vom individuellen Arbeitstempo und der individuellen Genauigkeit.¹⁷⁹

Die Fehlerprozentage stellen die Genauigkeit der Testbearbeitung dar. Sie geben die Anzahl der Fehler bezogen auf die Anzahl bearbeiteter Zielobjekte an. Diese Fehlerprozentage werden durch eine spezielle Formel über alle Blöcke addiert.

Die Formel lautet $F\% = 100 \times (AF + VF)/BZO$.¹⁷⁹ Die Anzahl der Fehler besteht somit aus den Auslassfehlern (AF) und Verwechslungsfehlern (VF). Die Verwechslungsfehler fallen deutlich höher aus, wenn Probandinnen und Probanden ihren Fokus auf das Arbeitstempo legen.¹⁸¹ Die Variabilität ist der Konzentrationsverlauf der Testleistung.¹⁷⁹ Da beim Test d2-R die Konzentrationsleistung von vier aufeinanderfolgenden Blöcken bzw. Abschnitten, mithilfe eines Durchschlagbogens ausgewertet werden, besteht die Möglichkeit, Unterschiede zu prüfen.⁴⁷

3.5. AuReTim

Das AuReTim ist ein Konzentrationstest während der Lichtexposition. Es wurde so konzipiert, dass es über einen Zeitraum von vier Minuten circa 30 akustische Reize abgibt. Wenn der Ton erklingt, muss der Proband auf einen Knopf drücken. Die Reaktionszeit und die Fehlerrate der falsch gedrückten bzw. überhörten akustischen Reize sind die entscheidenden Kriterien, die am Ende ausgewertet werden. Somit kann die Reaktionszeit des Probanden während der Lichtexposition gemessen und verglichen werden und zur weiteren Auswertung in Bezug auf die Konzentration und Aufmerksamkeit herangezogen werden.

3.5.1. Pupillographie

Die Pupillographie ist eine circa elfminütige Aufnahme der Pupille in Dunkelheit mittels Infrarottechnik. Das Untersuchungsverfahren dient zur Ermittlung von Aufmerksamkeitsstörungen und Tagesschläfrigkeit. Somit können Schwankungen der Pupillenoszillation aufgezeichnet und anhand dessen die Wachheit der Probanden objektiv bewertet werden. Es ist eine nicht-invasive und für den Probanden nicht belastende Untersuchung.¹⁸²

3.5.1.1. Physiologische Grundlagen

Die Pupillenreaktionen auf Lichtreize werden durch das vegetative Nervensystem gesteuert, somit unwillkürlich. Auf die Pupillenweite haben der Sympathikus und der Parasympathikus

Einfluss. Die Sympathikusaktivierung führt zur Mydriasis, also einer Weitstellung der Pupille durch den Musculus dilatator pupillae.¹⁸³ Bei Überwiegen des Parasympathikus resultiert eine Miosis, also eine Verengung der Pupille durch Kontraktion des Musculus sphincter pupillae bzw. auch eine reduzierte Aktivität des Musculus sphincter dilatator pupillae.¹⁸³

Somit sind Miosis und Mydriasis Gegenspieler.¹⁸³ Die Pupillenbewegung ergibt sich aus einem Zusammenspiel des Sympathikus und des Parasympathikus, also dem Gleichgewicht zwischen der Aktivität des Musculus sphincter pupillae und des Musculus dilatator pupillae.¹⁸³

Diese Pupillenreaktion wird durch die bereits in Kapitel 1.2.2.3 erklärten intrinsischen lichtempfindlichen Melanopsin-haltigen retinalen Ganglienzellen, welche die Reize von den Photorezeptoren erhalten, vermittelt.¹⁸³

Physiologisch oszillieren (schwingen) beide Pupillen synchron. Zum Beispiel bei Müdigkeit überwiegt der Parasympathikus und die Pupillen weiten sich, die Pupillen oszillieren langsamer.¹⁸³ Zur genaueren Auswertung der Schläfrigkeit wurde der sogenannte pupillographische Schläfrigkeitstest (PST) eingesetzt. Hierbei werden mittels Infrarotkamera die Pupillenoszillationen ausgewertet. Die Ergebnisse werden anhand des Pupillary Unrest Index bzw. Pupillen-Unruhe-Index (PUI) bewertet, einem Parameter, der die Tendenz zur Instabilität der Pupille angibt.¹⁸⁴

3.5.1.2. Durchführung und Auswertung der Pupillographie

Die Pupillographie wurde in dem Raum durchgeführt, in dem auch die Lichtexposition stattfand. In der durchgeführten Studie wurde die Infrarottrille F2D2 der Firma AMTech verwendet.

Der Proband setzte die Kamerainfrarotbrille auf, welche mit einer Blende versehen war, damit äußere Lichteinflüsse ausgeblendet werden konnten.

Der Proband fixierte eine Infrarot-Leuchtdiode, die innerhalb der Kamerabrille angebracht wurde. Anschließend wurde die Kamerabrille mittels USB-Kabel mit dem Laptop und mit der dazugehörigen Software verbunden. Somit konnten darüber die Daten der Pupillenoszillation erhoben werden und der Untersucher oder die Untersucherin die Messung genauestens mitverfolgen. Das Messprotokoll gab nicht nur die Aufzeichnung der Pupille wieder, sondern auch Informationen über den zeitlichen Verlauf des PUI und die Lidschläge.

Zur exakten Berechnung des Pupillendurchmessers analysierte die Software zunächst das Auge. Zudem kann die Software kleineren Blickbewegungen folgen und benötigt für eine erfolgreiche Messung ungefähr 50 % der Pupille.¹⁸⁵

Die Messung wurde für elf Minuten durchgeführt. Die Artefakte wurden für die Berechnung des Datensatzes eliminiert. Dieser wurde zur Analyse in acht Abschnitte, je 82 Sekunden, unterteilt. Für die acht Abschnitte wurden durch die Software die Mittelwerte der folgenden

Parameter berechnet: Amplitudenspektrum, Pupillendurchmesser und Pupillen-Unruhe-Index. Der Pupillen-Unruhe-Index wird, aufgrund des Maßes für die Tendenz der Pupille zur Veränderung des Durchmessers, als Faktor für die Müdigkeit angesehen. Die Einheit für den PUI beträgt Millimeter pro Minute (mm/min). Je höher der Wert ist, desto ausgeprägter ist die Müdigkeit bzw. das Maß der Änderung des Pupillendurchmessers.

Je niedriger der Wert ist, desto höher ist die Vigilanz.¹⁸² Ebenso deutet das Amplitudenspektrum durch höhere Werte auf eine ausgeprägtere Müdigkeit. Es gibt die Häufigkeiten der langsamen Pupillenzillationen in einem gewissen Frequenzbereich, 0 bis 0,8 Hertz, an.¹⁸⁵

3.5.2. LED-Lichtkugeln und die vier Lichtexpositionen

Für die vorliegende Experimentalstudie wurden die zwei LED-Lichtkugeln von der kooperierenden Arbeitsgruppe der Fakultät IV, Elektrotechnik und Informatik, Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin konstruiert und bereitgestellt. Es war entscheidend, eine homogene und kontrollierte Ausleuchtung der Retina zu gewährleisten; dies wurde durch die halbkreisförmige Anordnung der LEDs und die standardisiert gewählte Kopfposition der Probanden zur Lichtkugel umgesetzt. Diese Ausleuchtung der Retina ist mithilfe der diffusen Streuung des Lichts, bedingt durch die Halbkreisform der Lichtkugel, erreicht worden. Eine in zehn Zentimeter Abstand frontal angebrachte Kinnstütze sichert die Standardisierung der Kopfposition der Probanden. Zusätzlich ist die Halbkugel mit der Photometerfarbe PHP 80 beschichtet.

Folgende LEDs der Firma Nichia (Hauptsitz: Tokushima, Japan) sind eingesetzt worden:

- - CREE XPE2 Blau XPEBBL-L1-0000-00201 (Peak-Wellenlänge: 465 nm – 485 nm)
- - CREE XPE2 Rot XPEBRD-L1-0000-00601 (Peak-Wellenlänge: 620 nm – 630 nm)
- - CREE XPE2 Grün XPEBGR-L1-0000-00E01 (Peak-Wellenlänge: 520 nm – 535 nm)
- - CREE 90 CRI Weiß XPEBWT-U1-0000-007E7

Die Probanden wurden für eine Dauer von zwei Stunden den oben genannten vier verschiedenen Lichtbedingungen ausgesetzt. Die Lichtbedingungen rot, grün und blau sind als Interventionen anzusehen, die Lichtbedingung weiß hingegen ist als Kontrollbedingung anzusehen. Diese wurde dem natürlichen Licht im Monat März nachempfunden.

Die einzelnen Parameter der Lichtexposition sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Diese Parameter wurden mithilfe des Vergleichs zur Himmelleuchtdichte und Überprüfung der Lichtstärke (Lux) ermittelt. Hierfür wurde die Beleuchtungsstärke in Form von Lux mit dem Luxmeter (Seriennummer: 3278) der Firma Lichtmesstechnik (LMT) GmbH (Berlin, Deutschland) gemessen.

Tabelle 2: Eigenschaften der getesteten Farben

Farbe (N = Probandenanzahl)	Lichteigenschaften			
	Rot (24)	Grün (24)	Blau (24)	Weiß (24)
Beleuchtungsstärke (Lux), M	235	806	201	417
Bestrahlungsstärke (W/m ²)	1,341	1,598	1,760	1,566
Farbspektrum (nm)	630	520	475	
Photonendichte	4,26 E + 14	4,26 E + 14	4,26 E + 14	4,26 E + 14

Hinweis: M: Mittelwert; nm: Nanometer; W/m²: Watt pro Quadratmeter

Es wurde jeweils vor Beginn und zum Ende der Lichtexposition bei Probanden der Gruppe der gleichen Lichtexposition zum Gewährleisten einer vergleichbaren Beleuchtungsstärke in Lux diese mit dem oben genannten Luxmeter gemessen. Diese Messung wurde durch eine Haltevorrichtung für das Messgerät an der Lichtkugel unter Standardisierung gewährleistet. Durch die kooperierende Arbeitsgruppe der Fakultät IV, Elektrotechnik und Informatik, Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin wurde eine thermische Gefährdung mittels Vergleichs zu den Himmelsleuchtdichten ausgeschlossen und somit eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt.

3.6. Statistische Verfahren

3.6.1. Deskriptive Statistik

Die statistische Auswertung aller erhobenen Daten erfolgte mit IBM Statistics 28.0.1.0. Zuvor wurden diese auf Normalverteilung mittels des Anpassungstests nach Kolmogorov-Smirnov geprüft. Zur Stichprobenbeschreibung wurden die Probanden anhand der verschiedenfarbigen Lichtexpositionen in vier Gruppen aufgeteilt. Diese wurden auf die Einflussfaktoren Alter, BMI, Nikotin- und Koffeinkonsum, Schlafzeit der vorherigen Nacht, Schichtarbeit und Schlafproblem, sowie Hochschulabschluss mit dem Chi-Quadrat-Test bzw. mit einer einfaktorien Varianzanalyse ausgewertet. Auch die durchgeführten Fragebögenassessments wurden mit derselben Auswertung berechnet.

Zudem wurden die Werte der Konzentrationsleistung und der Fehlerquotienten, somit die Auswertungen des d2-R-Tests, der KSS, STAI und MDBF von Ausreißern bereinigt.

Werte, die mehr als drei Standardabweichungen unter oder über dem Mittelwert lagen, wurden durch den Mittelwert der jeweiligen Interventionsgruppe ersetzt. Zum Vergleich der Testvariablen vor und nach der Lichtexposition und um einen möglichen Effekt durch das Licht nicht von vornherein auszuschließen, wählten wir die Extremwerte wie folgt: Durch Ermittlung des Mittelwertes der gesamten Stichprobe und Abweichungen von über und unter drei Standardabweichungen (SD) wurden die Extremwerte festgelegt.

Diese Extremwerte, ermittelt durch die vor der Lichtexposition entstandenen Werte, wurden ebenfalls unverändert für die Werte nach der Lichtexposition verwendet. Anschließend wurden die fehlenden Werte mit den Mittelwerten der jeweiligen Interventionsgruppen ersetzt. Mit diesen von Ausreißern bereinigten Datensätzen wurden die weiteren statistischen Auswertungen durchgeführt.

Die Variablen wurden vor und nach der Lichtexposition verglichen. Bei dem MDBF erfolgte keine Unterteilung in die drei möglichen Untergruppen, sondern eine Auswertung erfolgte anhand des Gesamtscores.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Studie, insbesondere die Wirkung der verschiedenen LED-Lichtspektren auf die Konzentrationsleistung unter Laborbedingungen, dargelegt. Die Testung der Konzentrationsleistung wurde anhand des d2-R Tests, vor einer Lichtexposition und nach einer Lichtexposition, durchgeführt. Zudem wurden das Wohlbefinden, die Schläfrigkeit und die Angst anhand von Fragebögen vor und nach der Lichtexposition mit einbezogen. Der genaue Studienablauf ist in Kapitel 2.3 dargelegt.

4.1. Vergleich der vier unterschiedlichen Lichtspektren-Interventionsgruppen hinsichtlich verschiedener Parameter

4.1.1. Soziodemographische Daten

Zum Ausschluss eines möglichen Stichprobeneffekts wurden die unterschiedlichen Lichtexpositionsgruppen bezogen auf die soziodemographischen Daten und Angaben in den Fragebögen vor der Lichtexposition verglichen. Die Analysen wurden mit dem Chi-Quadrat-Test bzw. mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse ausgewertet. Die Stichprobe in der vorliegenden Studie bezieht sich auf insgesamt 96 männliche Probanden. Pro Farbspektrum ergab sich somit eine Gruppe von 24 Männern.

Der Altersdurchschnitt der gesamten Stichprobe betrug 24,95 Jahre (SD = 4,1 Jahre) und der Mittelwert des Body-Mass-Index 23,54 (SD = 1,71; in kg/m²). Der Großteil der Probanden gab bei der Frage nach der Nationalität Deutsch an, jedoch wählte jeweils ein Proband „Deutscher Übersiedler“ und die Variante „andere Nationalität“.

Sechs der Probanden gaben an, regelmäßig zu rauchen, jedoch täglich weniger als zehn Zigaretten. Keiner der Probanden bejahte eine Arbeitsunfähigkeit. Insgesamt 91 Probanden gaben den Familienstand ledig an und fünf weitere verheiratet. Jedoch gaben mehr als 50 % an, in einer festen Partnerschaft zu sein. Der Beziehungsstatus wurde über die Frage nach dem Status der Partnerschaft erhoben.

Bei Abfrage des Berufsstandes gab es von Auszubildenden, Studierenden bis hin zu bereits abgeschlossenen Berufsausbildungen verteilte Antworten. Zudem bejahte keiner der Probanden Alkoholkonsum an dem Versuchstag. Der Altersdurchschnitt der unterschiedlichen Gruppen lag, aufgrund der vorgegebenen Altersspanne und dadurch, dass es sich bei den Probanden insbesondere um Studenten handelte, nicht weit auseinander ($p = 0,38$). Der BMI ($p = 0,76$) unterschied sich ebenfalls kaum, da es sich um größtenteils sportliche junge Männer handelte. Da die überwiegende Mehrheit Studenten waren, ergab sich auch kein großer Unterschied bezüglich des Schulabschlusses.

Bis auf zwei der 96 Probanden, einen Probanden in der blauen Interventionsgruppe und einen Probanden in der weißen Interventionsgruppe, gaben alle weiteren Studienteilnehmer als Schulabschluss Abitur ($p = 0,56$) an. Der Koffeinkonsum am Tag des Studienablaufs war in den Interventionsgruppen rot, grün und weiß vergleichbar. In der blauen Gruppe gaben nur sieben Personen den Konsum von Koffein am Tag der Studie an.

Insgesamt wurde auch bei den Angaben zum Koffeinkonsum, Nikotinkonsum und der Schlafzeit kein signifikanter Unterschied nachgewiesen und in der gesamten Stichprobenpopulation gaben wenige an im Schichtdienstsystem zu arbeiten. Der Anteil der Probanden mit den Schlafproblemen zeigte sich fast auf alle Gruppen gleichmäßig verteilt, nur bei der weißen Interventionsgruppe gab ein Proband mehr Schlafprobleme an.

Somit zeigt sich anhand der Tabelle, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Interventionsgruppen vorliegen, wodurch sich die Homogenität der Stichprobe bezüglich der soziodemographischen Daten bestätigt.

Eine Übersicht über weitere Merkmale der Stichprobe, aufgeteilt anhand der Farbspektren, ist in der folgenden Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Charakteristika der Studienpopulation für ausgewählte Einflussfaktoren in den Interventionsgruppen

Gesamtstichprobe N = 96 (100%)							
Farbe	Rot (N = 24)	Grün (N = 24)	Blau (N = 24)	Weiß (N = 24)	Test- statistik	df	p
Alter (in Jahren), M (SD in Jahren)	24,12 (4,03)	26 (4,36)	25,25 (4,23)	24,42 (3,73)	1,03	3	0,38
BMI (kg/m ²), M (SD in kg/m ²)	23,72 (1,93)	23,24 (1,8)	23,51 (1,5)	23,7 (1,67)	0,39	3	0,76
Abitur, N (%)	24 (100)	24 (100)	23 (95,8)	23 (95,8)	2,04	3	0,56
Koffein am Versuchs- tag (%)	12 (50)	12 (50)	7 (29,2)	12 (50)	3,16	3	0,37
Schichtarbeiter, N (%)	1 (4,2)	2 (8,3)	0 (0)	1 (4,2)	2,09	3	0,56
Raucher, N (%)	2 (8,3)	0 (0)	3 (12,5)	1 (4,2)	3,56	3	0,31
Schlafprobleme, N (%)	1 (4,2)	1 (4,2)	1 (4,2)	2 (8,3)	0,633	3	0,89
Schlafzeit der vorherigen Nacht in Stunden (h), M (SD)	7,44 (0,74)	7,7 (0,76)	7,4 (0,9)	7,61 (1,16)	0,62	3	0,60

Hinweis: N: Anzahl; M: Mittelwert; SD: Standardabweichung; BMI= Body-Mass-Index; df= degrees of freedom, Teststatistik: F-Statistik für Alter, BMI, Schlafzeit, sonst Chi²-Statistik; p-Wert zum F-Test oder Chi²-Test; Prozentangaben können durch Rundungen mehr als 100 % betragen

4.1.2. Fragebögen

Die Studienpopulation wurde anhand der vor der Lichtexposition durchgeführten Fragebögen verglichen. Aufgrund der zuvor festgelegten Ausschlusskriterien waren bezüglich des psychischen Gesundheitszustands der Probanden keine signifikanten Unterschiede zu erwarten. Dies wurde durch die statistische Auswertung der Fragebögen PSS, TICS, PHQ, SF-12 und D-MEQ bestätigt – siehe Tabelle 4.

In Bezug auf das Stresslevel im vorangegangenen Monat mittels der Perceived Stress Scale zeigt sich in den vier Interventionsgruppen ein ähnlicher Mittelwert und eine ähnliche Standardabweichung zwischen den Gruppen.

Der chronische Stress, welcher durch den Trier Inventar zum chronischen Stress festgehalten wurde, wies lediglich einen geringen Unterschied auf; insbesondere die grüne Interventionsgruppe und die blaue Interventionsgruppe waren auffällig, jedoch ist dieser Unterschied nicht signifikant. Zudem konnte anhand der Fragebögen PHQ und SF 12 Bezug auf die Ausprägung von depressiven Symptomen genommen werden. Auch hier zeigten sich keine signifikanten Unterschiede der Interventionsgruppen. Der Chronotyp der Probanden wurde anhand des DMEQ ermittelt, alle Interventionsgruppen wiesen einen Mittelwert

zwischen M = 42 und M = 58 Punkten auf, somit konnten sie anhand des Mittelwertes dem Intermediärtyp zugeordnet werden. Anhand der aufgeführten Tabelle und statistischen Auswertungen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede der Interventionsgruppen. Somit konnte die Homogenität der Stichprobe auch durch die Auswertung der Fragebögen bestätigt werden.

Die getesteten Variablen wiesen keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Interventionsgruppen auf. Aufgrund der aufgeführten Ergebnisse ist eine Verzerrung der Ergebnisse durch einen potenziellen Stichprobeneffekt unwahrscheinlich.

Tabelle 4: Fragebögen vor der Lichtexposition

Farbe		Rot	Grün	Blau	Weiß	Gesamt	Test-statistik	df	p
Fragebögen									
PSS	M,	18,83	18	17,13	18,21	18,04	1,12	3	0,35
	(SD)	(2,9)	(2,27)	(3,93)	(3,72)	(3,28)			
TICS	M,	11,17	8,65	13	11,42	11,04	1,58	3	0,20
	(SD)	(6,26)	(5,7)	(7,46)	(7,61)	(6,87)			
PHQ	M,	3,67	4,13	4,5	4,88	4,54	0,41	3	0,75
	(SD)	(2,67)	(2,4)	(2,75)	(1,83)	(2,42)			
SF 12	M,	31,63	31,58	31,08	31,12	31,35	32,38	27	0,22
	(SD)	(1,69)	(1,44)	(1,64)	(1,9)	(1,67)			
D-MEQ	M,	50,04	46,38	50,08	46,25	48,19	1,20	3	0,31
	(SD)	(9,71)	(10,82)	(7,85)	(10,14)	(9,71)			

Hinweis: N: Anzahl; M: Mittelwert; SD: Standardabweichung; df= degrees of freedom, Teststatistik: F-Statistik für PSS, TICS, PHQ, D-MEQ, sonst Chi²-Statistik; p zum F-Test oder Chi²-Test

4.2. Unterschiede vor und nach der Lichtexposition

In den folgenden Unterkapiteln wird mit Hilfe des allgemeinen linearen Modells und der Messwiederholung die Wirkung vor und nach der Lichtexposition anhand ausgewählter Zielparameter verglichen.

4.2.1. Konzentrationsleistung

Die Konzentrationsleistungswerte werden in Tabelle 5, nach Farben aufgeteilt, verglichen. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass nach der Lichtexposition für alle Farben eine höhere Konzentrationsleistung nachgewiesen werden konnte, da die Mittelwerte im Vergleich zu den Werten vor der Lichtexposition leicht angestiegen sind. Bei dem allgemeinen linearen Modell zeigte sich ein signifikanter Unterschied der Konzentrationsleistung in dem Zeitablauf, also zu den zwei Zeitpunkten ($F = 18,175$; $df = 1$; $p = < 0,001$). Bei dem Interaktionseffekt Konzentrationsleistung x Farbe hingegen zeigt sich kein signifikanter Effekt ($F = 0,905$; $df = 3$; $p = 0,442$).

Die verschiedenen Interventionsgruppen, also verschiedenen Farbspektren, haben keinen signifikanten Effekt auf die Konzentrationsleistung. Die Effektstärke (f) nach Cohen für die Konzentrationsleistung vorher und nachher bei partiellem Eta Quadrat (η^2) von $\eta^2 = 0,165$ ergibt $f = 0,445$; somit beträgt die Effektstärke $f \geq 0,4$, was einem starken Effekt entspricht. Somit hat die Zeitkomponente einen großen Einfluss auf die Konzentration. Da die Farben keinen signifikanten Effekt auf die Konzentrationsleistung ausüben, wurde keine Effektstärke berechnet. Die Annahme, dass die Konzentrationsleistung durch die verschiedenen Farbspektren vor und nach der Lichtexposition beeinflusst werden, bestätigt sich demnach nicht.

Die Konzentrationsleistung ist jedoch mit dem zeitlichen Verlauf assoziiert.

Tabelle 5: Deskriptive Statistik der KL vor und nach der Lichtexposition im Vergleich

Konzentrationsleistung		
	vor der Lichtexposition	nach der Lichtexposition
Blau M, (SD)	189,30 (37,37)	197,38 (43,43)
Grün M, (SD)	194,52 (28,99)	201,5 (34,55)
Weiß M, (SD)	183,38 (40,23)	196,33 (37,45)
Rot M, (SD)	195,39 (39,68)	199,48 (35,45)
Gesamt M, (SD)	190,6 (38,75)	198,66 (37,35)
Hinweis: M= Mittelwert; SD= Standardabweichung		

Tabelle 6: Allgemein lineares Modell der KL

Konzentrationsleistung			
	df	F	p
Konzentrationsleistung	1	18,175	<0,001
Interaktionseffekt Konzentrationsleistung \times Farbe	3	0,905	0,442
Hinweis: df= degrees of freedom; F= F-Wert; p= Signifikanzniveau			

4.2.2. Karolinska-Sleepiness-Scale

Die Schläfrigkeitseinschätzung wird in Tabelle 7, nach Farben aufgeteilt, verglichen. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass nach der Lichtexposition bei allen Farben eine höhere subjektive Schläfrigkeit angegeben wurde, da die Mittelwerte im Vergleich zu den Werten vor der Lichtexposition leicht angestiegen sind. Der größte Unterschied vor und nach der Lichtexposition findet sich bei der Farbe Blau; der geringste Unterschied bei der Farbe Rot.

Bei dem allgemeinen linearen Modell zeigte sich ein signifikanter Unterschied der Schläfrigkeit in dem Zeitablauf, also zu den zwei Zeitpunkten ($F = 16,994$; $df = 1$; $p = <0,001$). Doch zeigt sich anhand der Tabelle 8 und den Mittelwerten im Vergleich vor und nach der Lichtexposition, dass der Unterschied zwar signifikant ist, jedoch die Schläfrigkeit zunimmt.

Bei dem Interaktionseffekt Schläfrigkeit x Farbe hingegen zeigt sich kein signifikanter Effekt ($F = 0,551$; $df = 3$; $p = 0,649$).

Die verschiedenen Interventionsgruppen, also verschiedenen Farbspektren, haben keinen signifikanten Effekt auf die subjektive Schläfrigkeit. Die Effektstärke nach Cohen für die Schläfrigkeit vorher und nachher bei η^2 von $\eta^2 = 0,003$ ergibt $f = 0,05$ und somit beträgt die Effektstärke $f = 0,05$, was kaum einem Effekt entspricht. Somit hat die Zeitkomponente nur wenig Einfluss auf die Schläfrigkeit. Die Schläfrigkeit nimmt mit der Zeit in diesem Versuchsaufbau nach der Lichtexposition zu. Da die Farben keinen signifikanten Einfluss auf die Schläfrigkeit haben, wurde keine Effektstärke berechnet. Die Annahme, dass die subjektive Schläfrigkeit durch die verschiedenen Farbspektren vor und nach der Lichtexposition beeinflusst werden, bestätigt sich demnach nicht. Die Schläfrigkeit ist jedoch mit dem zeitlichen Verlauf assoziiert.

Tabelle 7: Deskriptive Statistik KSS vor und nach der Lichtexposition im Vergleich

Karolinska Sleepiness Scale		
	vor der Lichtexposition	nach der Lichtexposition
Blau M, (SD)	3,54 (1,31)	4,68 (1,54)
Grün M, (SD)	3,87 (1,23)	4,67 (1,3)
Weiß M, (SD)	3,99 (1,53)	4,57 (1,86)
Rot M, (SD)	4,30 (1,49)	4,78 (1,86)
Gesamt M, (SD)	3,92 (1,4)	4,67 (1,63)
Hinweis: M= Mittelwert; SD= Standardabweichung		

Tabelle 8: Allgemein lineares Modell KSS

Karolinska Sleepiness Scale			
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
KSS	1	16,994	<0,001
Interaktionseffekt KSS x Farbe	3	0,551	0,649
Hinweis: <i>df</i> = degrees of freedom; <i>F</i> = F-Wert; <i>p</i> = Signifikanzniveau			

4.2.3. Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen

Das Wohlbefinden wird in Tabelle 9 nach Farben aufgeteilt verglichen.

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass nach der Lichtexposition bei allen Farben ein geringeres Wohlbefinden angegeben wurde, da die Mittelwerte im Vergleich zu den Werten vor der Lichtexposition leicht gesunken sind. Der größte Unterschied vor und nach der Lichtexposition zeigt sich bei der Farbe Blau und der geringste Unterschied bei der Farbe Weiß. Bei dem allgemeinen linearen Modell zeigte sich ein signifikanter Unterschied des Wohlbefindens in dem Zeitablauf, also zu den zwei Zeitpunkten ($F = 13,651$; $df = 1$; $p = <0,001$). Doch zeigt sich anhand Tabelle 10 und den Mittelwerten im Vergleich vor und nach der Lichtexposition, dass der Unterschied zwar signifikant ist, jedoch das Wohlbefinden abnimmt. Bei dem Interaktionseffekt $MDBF \times$ Farbe hingegen ergibt sich kein signifikanter Effekt ($F = 1,02$; $p = 0,388$). Die verschiedenen Interventionsgruppen, also verschiedenen Farbspektren, haben keinen signifikanten Effekt auf das Wohlbefinden. Die Effektstärke nach Cohen für das Wohlbefinden vorher und nachher bei η^2 von $\eta^2 = 0,023$ ergibt $f = 0,153$ und somit beträgt die Effektstärke $f \geq 0,15$, was einem schwachen Effekt entspricht. Somit hat die Zeitkomponente einen geringen Einfluss auf das Wohlbefinden. Die Annahme, dass das Wohlbefinden durch die verschiedenen Farbspektren vor und nach der Lichtexposition beeinflusst wird, bestätigt sich demnach nicht. Das Wohlbefinden ist jedoch mit dem zeitlichen Verlauf assoziiert.

Tabelle 9: Deskriptive Statistik des MDBF vor und nach der Lichtexposition im Vergleich

Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen		
	vor der Lichtexposition	nach der Lichtexposition
Blau M, (SD)	48,97 (5,98)	44,68 (6,24)
Grün M, (SD)	51,17 (4,25)	47,78 (7,08)
Weiß M, (SD)	48,03 (6,29)	47,14 (6,56)
Rot M, (SD)	48,83 (6,18)	46,83 (7,45)
Gesamt M, (SD)	49,25 (5,76)	46,61 (6,83)

Hinweis: M= Mittelwert; SD= Standardabweichung

Tabelle 10: Allgemein lineares Modell MDBF

Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen			
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
MDBF	1	13,651	< 0,001
Interaktionseffekt MDBF \times Farbe	3	1,02	0,388

Hinweis: *df*= degrees of freedom; *F*= F-Wert; *p*= Signifikanzniveau

4.2.4. State-Trait Anxiety Inventory

Der Zielparameter Angst bzw. Sorge, welcher anhand des STAI ermittelt wurde, wurde anhand der Mittelwerte und Standardabweichung sowie des allgemeinen linearen Modells vor und nach der Lichtexposition verglichen. Der STAI wird in Tabelle 11 nach Farben aufgeteilt verglichen. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass nach der Lichtexposition bei den Farben Blau und Rot ein höheres Angstepfinden nach-gewiesen werden konnte. Bei dem allgemeinen linearen Modell zeigte sich kein signifikanter Unterschied des Angstepfindens in dem Zeitablauf, also zu den zwei Zeitpunkten ($F = 1,037$; $df = 1$; $p = 0,311$).

Bei dem Interaktionseffekt STAI x Farbe ergab sich ebenfalls kein signifikanter Effekt ($F = 1,398$; $df = 3$; $p = 0,249$). Die Zeit und die verschiedenen Interventionsgruppen, also die verschiedenen Farbspektren, haben keinen signifikanten Einfluss auf das Wohlbefinden. Auch in diesen Modellen zeigt sich, dass die Zeit und die Farben keinen nachweislichen Einfluss auf das Empfinden von Angst haben.

Tabelle 11: Deskriptive Statistik des STAI vor und nach der Lichtexposition im Vergleich

	STAI	
	vor der Lichtexposition	nach der Lichtexposition
Blau M, (SD)	31,64 (6,08)	32,54 (6,03)
Grün M, (SD)	30,33 (5,73)	30,00 (6,33)
Weiß M, (SD)	33,00 (5,52)	32,39 (7,52)
Rot M, (SD)	28,94 (4,02)	31,23 (7,14)
Gesamt M, (SD)	31,00 (5,53)	31,54 (6,75)
Hinweis: M= Mittelwert; SD= Standardabweichung		

Tabelle 12: Allgemeines lineares Modell STAI

	STAI		
	df	F	p
STAI	1	1,037	0,311
Interaktionseffekt STAI x Farbe	3	1,398	0,249
Hinweis: df= degrees of freedom; F= F-Wert; p= Signifikanzniveau			

5. Diskussion

Im Rahmen einer experimentellen Studie wurde in der vorliegenden Arbeit der Frage nachgegangen, ob die Konzentrationsleistung durch unterschiedliche Lichtexpositionen beeinflusst wird. Es zeigte sich, dass der d2-R-Test, die individuell empfundene Schläfrigkeit, das Wohlbefinden und die Selbsteinschätzung zu Angst und Sorge in einem Testaufbau mit zwei Messungen nicht durch unterschiedliche Farbspektren zwischen den beiden Messungen beeinflusst wurden. Die Lichtexpositionen wurden dabei als monochrome Spektren in blau, grün, weiß und rot über Ulbricht-Kugeln nach der Vorher-Untersuchung generiert. Im Anschluss an die Lichtexposition fand die zweite Messung aller Endpunkte statt.

Die Testung wurde unter Laborbedingungen durchgeführt. Die Vergleichbarkeit der Interventionsgruppen war hinsichtlich der soziodemographischen Daten, des Gesundheitszustandes und der Abläufe gegeben.

5.1. Einfluss von Lichtfarbe auf die Konzentrationsleistung

Bei der Betrachtung der Konzentrationsleistung wurde beobachtet, dass sich die Vorher-Messungen von den Nachher-Messungen unterschieden. Die Lichtexposition zeigte keinen signifikanten Unterschied. Dies ist ein Hinweis darauf, dass im Verlauf des Versuchs die Konzentrationsleistung zugenommen hat, was aber nicht nachweisbar auf den Lichteffekt zurückzuführen ist.

In anderen Studien konnten Veränderungen in der kognitiven Leistung bei Vorher-Nachher-Messungen gezeigt werden, die durch die Lichtverhältnisse beeinflusst wurden.^{186,187}

Diese Studien fanden aber während der Nachtschicht statt, bei der das Leistungsniveau insgesamt möglicherweise niedrig ist, d.h. hier hat man vielleicht die negative Wirkung der Nachtschicht durch die Beleuchtung abschwächen können.

So zeigte sich in einer Studie, dass die Leistung, Stimmung und Wachsamkeit von Nachtschichtarbeitern in Bezug auf die Lichtintensität und den Gehalt an kurzwelligem Licht gesteigert werden konnte.¹²⁹ Die Auswirkung der Lichtexposition in der Nacht und daraufhin eine Verbesserung der Wachsamkeit und kognitiven Leistungsfähigkeit wurde bereits in mehreren Studien untersucht, insbesondere die positiven Auswirkungen des kurzwelligen Lichts.^{129,187,188} In der vorliegenden Studie hingegen konnte dieser positive Effekt von Licht und insbesondere von blauem, kurzwelligem Licht nicht nachgewiesen bzw. bestätigt werden. Dies zu einem Zeitpunkt am Tag, wo eine hohe Leistungsfähigkeit insgesamt möglicherweise gegeben ist. Unter diesen experimentellen Bedingungen auch hinsichtlich der gewählten Zeitpunkte lassen sich keine Änderungen beobachten. Aufgrund des Hormonspiegels, der

möglicherweise die Wachsamkeit und somit die Konzentration beeinflusst, unterscheiden sich die Studienergebnisse zwischen Tag und Nacht. Aufgrund dieser Faktoren könnte es sein, dass die nächtlichen Ergebnisse sich von den am Tage unterscheiden.⁸⁹ Da die vorliegende Studie nur am Tag durchgeführt wurde, liegen ausschließlich für diesen Zeitraum Ergebnisse vor.

Eine Crossover-Studie, die mit neun gesunden Probandinnen und Probanden im Alter zwischen 18 und 36 Jahren stattfand, untersuchte, wie sich zehn Stunden Lichtexposition am Tag mit unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen auf die Aufmerksamkeit und Schläfrigkeit auswirkten.¹⁸⁹ Es gab definierte Ausschlusskriterien, wie z.B. Raucher, chronische Krankheiten und Schlafstörungen; nur intermediäre Chronotypen wurden verglichen.¹⁸⁹

Es wurde eine dreitägige Vorbereitung z. B. mittels Einhaltung einer Schlafhygiene vor der bevorstehenden Lichtexposition im Labor durchgeführt.¹⁸⁹

Die vier unterschiedlichen Lichtexpositionen erfolgten im Abstand von mindestens zwei Wochen und hatten jeweils die gleiche photopische Beleuchtungsstärke (100 lx) und eine ähnliche korrelierte Farbtemperatur (~ 4000K), unterschieden sich aber in der spektralen Zusammensetzung.¹⁸⁹ Der Laborteil belief sich auf 26 Stunden in einer zeitlich isolierten Suite. Es wurde direkt zu Beginn ein Testdurchlauf gestartet, welcher nicht gewertet wurde. Anschließend wurden die Probandinnen und Probanden nach 7 Stunden Schlaf geweckt und die Tests wurden 2, 5, 8, 11 und 15,5 Stunden danach durchgeführt.¹⁸⁹

Es wurden die Wachsamkeit und Aufmerksamkeit anhand der Stanford Sleepiness Scale (SSS), der auditiven psychomotorischen Vigilanzaufgabe (aPVT) und des Karolinska Drowsiness Tests (KDT) ausgewertet. Dabei zeigte sich eine verbesserte Aufmerksamkeit und Wachsamkeit am Tag bei LED-Breitbandlicht.¹⁸⁹ Daraufhin wurde angenommen, dass diese Lichtexposition am Tag bei weißem Licht mit hoher melanopischer Wirksamkeit die kognitive Leistungsfähigkeit, am ehesten als Folge der lichtinduzierten Veränderung der Wachsamkeit, verbessert.¹⁸⁹

Zu der vorliegenden Studie zeigen sich deutliche Unterschiede, welche auf die fehlenden Lichteffekte schließen könnten. Die Lichtexpositionsdauer war in der Crossover-Studie einerseits deutlich länger, auch die Messzeitpunkte wurden häufiger gewählt. Die dreitägige Vorbereitung schaffte gleiche Bedingungen unter den Probandinnen und Probanden. Zudem wurden dieselben Probandinnen und Probanden jeder der vier Lichtexpositionen in gewissen zeitlichen Abständen ausgesetzt, wodurch die Lichteffekte verglichen werden konnten.

Im genauen Vergleich zeigen sich die aufgeführten Unterschiede im Versuchsaufbau und Ablauf, was darauf schließen lässt, dass die Effekte der Lichtexposition in der vorliegenden Arbeit möglicherweise durch äußere Einflüsse beeinträchtigt wurden oder durch die kürzere Lichtexposition von 120 Minuten noch nicht ausgeprägt genug waren.

Eine weitere experimentelle Studie wurde in einer Arbeitsumgebung mit 94 Probanden mit dem Durchschnittsalter von 36,4 Jahren (SD = 10,2 Jahre) durchgeführt, wobei ebenfalls unterschiedliche Lichtverhältnisse verglichen wurden, die jedoch jeweils 4 Wochen dauerten.³ Der Zeitraum der Lichtexposition begann gegen 8:30 Uhr und endete um 16:30 Uhr, die Messzeitpunkte der Konzentration, Stimmung und Wachsamkeit wurden innerhalb von vier Wochen, jeden Dienstag am Morgen, am Mittag und späten Nachmittag durchgeführt.³ Anfänglich wurde anhand des allgemeinen demographischen Fragebogens, des Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) und des Horne-Östberg(H-O)-Fragebogen zur Tageszeitpräferenz eine Einschätzung der Probandinnen und Probanden durchgeführt. Zu Beginn der Studie wurde die 7-Punkte-Likert-Skala, der so genannte Workplace Questionnaire, durchgeführt und zwei Wochen später, um den Verlauf der Zielparameter festzuhalten, eine 9-Punkte-Likert-Skala.³

Jeden Dienstag wurde morgens das Karolinska-Schlafstagebuch (KSD), die KSS und die Ratingskala für mentale Anstrengung (RSME) ausgefüllt.³

Bei der Mittagsmessung wurden die KSS und die RSME wiederholt, bei der Nachmittagsmessung die Kopfschmerz- und Augenbelastungsskala, die Skala für positiven und negativen Affekt (PANAS), die KSS und der RSME.³ Bei der Auswertung der Fragebögen zeigte sich erneut, dass blau angereichertes weißes Licht (17000 K) die Messwerte für Wachsamkeit ($p \leq 0,001$), positive Stimmung ($p \leq 0,001$), Leistungsfähigkeit ($p \leq 0,001$) und Konzentration ($p \leq 0,001$) verbesserte.³ Auch in diesem Fall wurde die Lichtexposition über mehrere Wochen durchgeführt und nicht einmalig für 120 Minuten. Somit kann die Lichtexpositionsdauer über einen längeren Zeitraum ein Grund für den ausbleibenden Effekt sein. Zudem wurden die Untersuchungsinstrumente wöchentlich und über den Tag verteilt bearbeitet. Beispielsweise wurde die KSS morgens, mittags und am späten Nachmittag ausgefüllt; somit konnte diesbezüglich eine genauere Einschätzung erfolgen und ein Verlauf festgehalten werden. Eine durchgeführte Literaturstudie über verschiedene nicht-bildgebende Reaktionen durch Licht, in der die Auswirkungen auf die Wachsamkeit sowohl am Tag als auch in der Nacht untersucht wurden, hat gezeigt, dass die Ergebnisse heterogen sind, insbesondere in Bezug auf die kognitive Leistung.¹⁹⁰ Generell ist es aufgrund der geringen Stichprobengröße in Studien über die akuten Auswirkungen von Licht auf die Wachsamkeit schwierig, endgültige Schlussfolgerungen zu ziehen, und es werden Studien mit besserer Datengrundlage benötigt.¹⁹⁰ Tatsächlich führen die Auswirkungen von Licht auf die subjektive Wachsamkeit nicht immer zu statistisch signifikanten Verbesserungen bei Leistungsmessungen.¹⁹¹ Die Lichtexposition kann vorübergehend bessere Leistung und Wachsamkeit hervorrufen, doch nach kurzer Zeit kann dies auch wieder abklingen.^{191,192} Das kann möglicherweise an den unterschiedlichen Zeitpunkten und Dauern der Lichtexposition liegen.

Es gibt kaum Untersuchungen, die mittels des d2-R-Tests unterschiedliche Lichtexpositionen und die Auswirkungen auf die Konzentrationsleistung analysieren. Der d2-R-Test wurde beispielsweise für die Untersuchung der Auswirkungen von körperlichem Training auf die Entwicklung des heranwachsenden Gehirns genutzt und um die kognitiven Effekte zu zeigen.¹⁹³

In der vorliegenden Studie zeigt sich ein signifikanter Unterschied der Konzentrationsleistung vor und nach der Lichtexposition. Die Konzentrationsleistung verbesserte sich somit im zeitlichen Verlauf.

Die Steigerung der Konzentrationsleistung könnte an einem gewissen Lerneffekt liegen oder der erste Testdurchlauf aufgrund von erster Begegnung mit dem Untersuchungsinstrument schlechter ausgefallen sein.

Möglich ist, dass der d2-R-Test aufgrund der aufgezählten Aspekte nicht geeignet ist. Nach unserer Kenntnis ist dies die erste Studie, die mit dem d2-R-Test stattgefunden hat. Um keinen ausgeprägten Lern- bzw. Erinnerungseffekt zu kreieren, sollte das Zeitintervall zwischen den zwei Messzeitpunkten nicht allzu gering sein, um die Erinnerungseffekte auszuschließen.

Aufgrund der Unterschiede der Studienaufbauten bei der Lichtforschung, bezüglich der unterschiedlichen Teilnehmeranzahlen sowie der unterschiedlichen Messzeitpunkte bzw. Studiendauern, wird ein Vergleich und die Schlussfolgerung der Studienergebnisse deutlich erschwert.⁸⁹

In der bereits genannten Crossover-Studie mit neun Probandinnen und Probanden wurden zudem auch andere Testverfahren gewählt und zu Beginn ein Testdurchlauf durchgeführt, der nicht gewertet wurde.¹⁸⁹ Somit konnte eine Verzerrung der Testinstrumente ausgeschlossen werden, da die Probandinnen und Probanden mit den Testinstrumenten bereits vertraut waren.¹⁸⁹ In dem Versuchsablauf der vorliegenden Studie wurde eine Testreihe durchgeführt, welche nicht gewertet wurde; möglicherweise ist diese Übung zu kurz bemessen. Bei der Literaturrecherche gab es kaum Veröffentlichungen zur Lichtforschung mit dem d2-R-Test, auch in der bereits oben genannten Studie zu Arbeitsumgebung, Konzentration und Wachsamkeit wurde der d2-R-Test ebenfalls nicht als Untersuchungsinstrument ausgewählt.³ Dies legt die Vermutung nahe, dass es ggf. andere validere Untersuchungsinstrumente gibt.

Möglicherweise ist es erforderlich, eine größere Stichprobengröße zu untersuchen, sowie mehrere Lichtintensitäten über einen längeren Zeitverlauf zu untersuchen, um statistisch signifikante bzw. aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

5.2. Einfluss von Lichtfarbe auf die Schläfrigkeit

Bei der Betrachtung der Schläfrigkeit wurde erneut beobachtet, dass sich die Vorher-Messungen von den Nachher-Messungen unterscheiden haben. Die Lichtexposition zeigte auch in diesem Falle keinen signifikanten Unterschied. Da die Mittelwerte der KSS bei der zweiten Messung zugenommen haben, lässt sich annehmen, dass im Verlauf des Versuchs die Schläfrigkeit zugenommen hat, was aber nicht nachweisbar auf den Lichteffect zurückzuführen ist. Wie bereits im Kapitel 4.1 erwähnt, gibt es Studien insbesondere zu Nachtschichtarbeitern, jedoch auch im Tagesverlauf, die sich auf die Konzentrationsleistung und Wachsamkeit beziehen. Die meisten Untersuchungen beziehen sich auf beide Zielparameter, da vermutet wird, dass diese in engem Zusammenhang stehen, und angenommen wird, dass die Lichtexposition am Tag bei einer Studie die kognitive Leistungsfähigkeit, am ehesten aufgrund der lichtinduzierten Wachsamkeit, verbessert.¹⁸⁹ Die vorliegende Studie zeigt, dass bei dem ersten Zeitpunkt die Schläfrigkeit geringer war und diese nach Lichtexposition zunahm. Die Probanden saßen in dieser Untersuchung vor den LED-Lichtkugeln und bis auf die dreimalige Durchführung des AuReTim-Reaktionstest wurden keine weiteren Aufgaben während der Lichtexposition absolviert, in anderen Studien hingegen bestritten sie zum Beispiel ihren normalen Arbeitsalltag.³ Somit liegt die Vermutung nahe, dass durch die fehlende Bewegung und Konzentration die Müdigkeit angestiegen sein könnte.

Eine weitere Crossover-Interventionsstudie, die mit zwölf Probandinnen und Probanden im Labor durchgeführt wurde, erfolgte in zwei nächtlichen Untersuchungen unter Laborbedingungen.¹³⁸ Kriterien zur Teilnahme waren der Ausschluss von Schlafstörungen nach dem Pittsburgh Sleep Quality Index, keine Krankheiten, Nichtraucher, sowie der Ausschluss von Schichtarbeit. Zudem wurde jeweils sechs Nächte vor Durchführung der Untersuchung unter Laborbedingungen ein fester Schlaf-Wach-Zeitplan vorgegeben, welcher einzuhalten war.¹³⁸

Fünf Stunden vor der üblichen Schlafenszeit begann die Untersuchung im Labor. Im Laufe dieser Zeit wurden die folgenden Testverfahren zweimalig durchgeführt: der Psychomotorische Vigilanz-Aufgabe Test (PVT), die KSS und die VAS.¹³⁸ Der Schlaf wurde mittels Elektroenzephalographie (EEG) überwacht und bei Aufzeichnung von mindestens zehn aufeinanderfolgenden dreißigsekündigen Epochen von slow wave sleep (SWS) ertönte ein Alarmsignal, anschließend wurden viermal im Abstand von 15 Minuten wiederholt die Testungen durchgeführt, somit zwei, 17, 32, und 47 Minuten nach dem Weckruf. Daraufhin wurden alle Lichter ausgeschaltet und ein erneuter Ablauf wie beschrieben fand statt.¹³⁸

Diese Studie zeigte die positive Auswirkung von polychromatischem, kurzwelligem Licht auf die Wachsamkeit unmittelbar nach dem Aufwachen.¹³⁸

In der vorliegenden Studie nimmt die Schläfrigkeit zu, jedoch fehlen der Alarmton und die vorherige Schlafphase wie in der Crossover-Interventionsstudie.

Eine Studie mit zehn gesunden männlichen Studenten, nach Sicherstellung ausführlicher Ausschlusskriterien wie z.B. Medikationseinnahme, Schlafstörungen, Nacharbeit und viele weitere, wurde Ende 2017 durchgeführt.¹⁹⁴ Die Umgebungsluft in den Untersuchungsräumen wurde auf 25 °C (SD= 0,04 °C) gehalten und unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen untersucht.¹⁹⁴ Es wurde festgestellt, dass eine hohe Beleuchtungsstärke während des Tages positiv mit der subjektiven Wachsamkeit korrelierte, zudem erhöhte sie die positive Stimmung am Morgen und verringerte sie am Nachmittag.¹⁹⁴

In dieser Studie wurde somit zusätzlich die Umgebungstemperatur als Faktor mit einbezogen, der in der vorliegenden Studie nicht bedacht wurde, was einen nicht signifikanten Lichteffect ggf. bedingen könnte.

5.3. Einfluss von Lichtfarbe auf MDBF

Bei der Betrachtung des Wohlbefindens wurde ebenfalls beobachtet, dass sich die Vorher-Messungen von den Nachher-Messungen unterschieden haben. Die Lichtexposition wies auch in diesem Falle keinen signifikanten Unterschied auf. Somit lässt sich annehmen, dass im Verlauf des Versuchs das Wohlbefinden zugenommen hat, was aber nicht nachweisbar auf den Lichteffect zurückzuführen ist.

In den anderen Studien wurde das Wohlbefinden bzw. die Stimmung mit anderen Untersuchungsinstrumenten durchgeführt, wie bspw. der Skala für positiven und negativen Affekt in der bereits erwähnten Lichtstudie, die über vier Wochen zu den Arbeitszeiten andauerte.³ Es gibt kaum Literatur zur Lichtforschung mit vergleichbarem Untersuchungsablauf, in denen der MDBF zur Auswertung herangezogen wurde. Jedoch konnte in anderen Lichtstudien eine Auswirkung der Farbspektren auf die Stimmung und Emotionen festgestellt werden.^{3,194,195}

Zudem wurde festgestellt, dass eine hohe Beleuchtungsstärke morgens die positive Stimmung erhöht, die Prozesse sind aber noch nicht abschließend geklärt.¹⁹⁴

5.4. Einfluss von Lichtfarbe auf STAI

Bei der Betrachtung der Selbsteinschätzung zu Angst und Sorge wurde beobachtet, dass sich die Vorher-Messungen von den Nachher-Messungen nicht unterschieden haben. Die Lichtexposition zeigte ebenso keinen signifikanten Unterschied.

Somit lässt sich annehmen, dass die durchgeführte Lichtexposition keinen positiven Effekt auf die empfundene Angst und Sorge hatte. Ein mit der Zeit assoziierter Effekt konnte ebenfalls nicht nachgewiesen werden.

In einer Studie wurden Probanden im Alter zwischen 60 und 75 Jahren (M = 66,6 Jahre ; SD= 4,5 Jahre) und im Alter zwischen 18 und 30 Jahren (M = 23,4 Jahre; SD 3,8 Jahre) an drei aufeinanderfolgenden Tagen drei Stunden lang hellem Licht (3.000 lx) ausgesetzt.¹³⁹ Diese Exposition wurde zufällig zu einer von acht Tages- oder Nachtzeiten durchgeführt, jedoch die gleiche Zeit für alle drei Tage. Es gab eine lange Liste an Ausschlusskriterien, insbesondere chronische Erkrankungen.¹³⁹ Es wurde der STAI fünf Minuten vor und 20 Minuten nach allen drei Lichtexpositionen durchgeführt. Es konnte ein signifikanter anxiolytischer Effekt nach der hellen Lichtexposition festgestellt werden,¹³⁹ jedoch kein signifikanter Effekt von Alter und Geschlecht.¹³⁹

In der vorliegenden Studie konnte im Vergleich zu dem genannten Untersuchungsaufbau kein anxiolytischer Effekt ermittelt werden. Es ergab sich kein Haupteffekt der Zeit und auch kein Interaktionseffekt mit der Farbe. Die Lichtexposition unterscheidet sich allerdings in der Länge sowie in der dreitägigen Wiederholung der Lichtexposition, wodurch der anxiolytische Effekt möglicherweise zu begründen ist. Zudem waren die Probanden in der vorliegenden Untersuchung zwei Stunden zur Lichtexposition in einem kleinen Raum bei geschlossener Tür, was bei ängstlichen Probanden ggf. die anxiolytischen Effekte verhindert hat. Jedoch ist die Studienlage zu anxiolytischen Beleuchtungsszenarien noch nicht ausreichend.

5.4.1. Klinische Implikation

Licht als Einflussfaktor der Konzentrationsleistung sowie des Gemütszustandes und der Wachsamkeit ist klinisch bedeutsam, da die spezifische Lichtexposition als einfache, kostengünstige und nicht-invasive Ressource betrachtet werden kann. Zudem kann die Lichtexposition mit spezifischen Lichtspektren auch als Therapieoption genutzt werden, wie zum Beispiel bei psychiatrischen Krankheitsbildern.¹⁹⁶⁻¹⁹⁸ Aufgrund der lichtemittierenden Dioden ist das künstliche Erzeugen von verschiedenen Lichtspektren möglich.¹⁹⁹ Nicht nur für Erkrankungen, sondern auch für Förderung der Aufmerksamkeit, Steigerung der Konzentrationsleistung und Steigerung der Wachsamkeit stellt die gezielte Auswahl der Lichtexposition und gezielte Einsatz der verschiedenen Lichtspektren eine mögliche Präventions- und Behandlungsmaßnahme dar.¹⁹⁶ Insbesondere Schichtarbeit kann den zirkadianen Rhythmus stören, was im weiteren Sinne zur Schläfrigkeit und abnehmender Konzentration führen kann.¹⁸⁷ Durch Lichtinterventionen mit blau angereicherterem Licht kann sich die Schläfrigkeit von Nachtschichtarbeiterinnen und Nachtschichtarbeitern wirksam verbessern.²⁰⁰

Daraus resultierend verbessern sich z.B, in einem Krankenhaus, an Schulen, an Universitäten und an vielen weiteren öffentlichen Einrichtungen nicht nur die Wachsamkeit und Arbeitsleistung des Personals, sondern im weiteren Sinne auch die Zufriedenheit des Personals und der Patientinnen und Patienten, sowie die Arbeitseffizienz und Sicherheit des Personals sowie die Sicherheit der Patientinnen und Patienten.²⁰⁰ Diese positive Wirkung von spezifischen Lichtspektren auf die zirkadiane Synchronisation und somit die Stimmung, die Schlafqualität und die kognitive Leistung hängt von vielen Faktoren wie Lichtzusammensetzung und Zeitpunkt der Exposition ab.²⁰¹

5.4.2. Stärken und Schwächen der Studie

Der Untersuchungsablauf fand unter Laborbedingungen statt. Die Vergleichbarkeit der Interventionsgruppen war hinsichtlich der soziodemographischen Daten, des Gesundheitszustandes und der Abläufe gegeben. Demnach sind die Effekte auf die Konzentrationsleistung nicht durch einen Stichprobeneffekt verzerrt worden. Zudem wurden nur männliche Probanden zur Studie zugelassen, um die Hormonschwankungen, denen insbesondere der weibliche Körper unterlegen ist, außen vor zu halten.

Die experimentelle Studie fand in den Räumlichkeiten der Sporthochschule zu Köln statt. Der Beginn war gegen 13:30 Uhr, was einheitliche Voraussetzungen schaffte. Die Probanden waren bereits zuvor unterschiedlichen Lichteinflüssen ausgesetzt, künstlich sowie natürlichem Licht, was einen möglichen Einfluss auf die Konzentration, Schläfrigkeit, das Wohlbefinden und das Empfinden von Angst und Sorge haben könnte.

Des weiteren bestand das Probandenkollektiv zum größten Teil aus Studenten; da der Zeitraum der Studie über mehrere Monate andauerte, befanden sich einige Probanden während der Testung in der vorlesungsfreien Zeit, einige in der Vorlesungszeit und weitere in der Lernphase. Somit bestand keine Kontrolle über die Ausgangssituation des Stresslevels, der bestehenden Arbeitsbelastung und der Schlafqualität.

Es wurden zudem nur einzelne Genussmittel berücksichtigt, durch den soziodemographischen Fragebogen wurden Koffein und Alkoholkonsum erfragt. Die Genussmittel sind als Störgrößen zu werten, da ihr Konsum zu späterer Stunde mit qualitativ und quantitativ schlechtem Schlaf in Verbindung gebracht wird.²⁰² Da die fehlende Schlafhygiene durch die Genussmittel Auswirkung auf die Gesundheit und das Wohlbefinden hat, haben die Genussmittel auf diesem Wege einen Einfluss auf die Studie.²⁰²

Trotz der Vorteile auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, dass das Probandenkollektiv aus jungen Männern bestand, wirft sich die Frage auf, ob die Ergebnisse auf Frauen oder ältere Menschen übertragbar sind. Aufgrund der in dieser Studie fehlenden Lichteffekte sollten einige Faktoren in folgenden weiterführenden Studien beachtet werden, da die weitere

Lichtforschung aufgrund der einfachen Erzeugung von LED-Lichtspektren und deren Anwendung eine große Rolle für verschiedene Fachgebiete spielt.^{199,200,203} Die Testungen sollten unter Laborbedingungen und mit einer ausreichenden Anzahl von Probandinnen und Probanden stattfinden. Zudem sind die einheitlichen Lichtparameter sowie auch die Expositionszeiträume entscheidend.⁸⁹ Da in der vorliegenden Studie keine signifikanten Einflüsse der Farbspektren nachzuweisen sind, sollten weitere Einflussfaktoren beachtet werden, wie beispielsweise vorherige Lichtexpositionen und weitere äußere Stressfaktoren. Aufgrund der Einflüsse durch Genussmittel wäre die Gegenüberstellung von zum Beispiel Nichtrauchern und Rauchern bei größerem Probandenkollektiv interessant.

5.4.3. Schlussfolgerung/Fazit

Die Konzentrationsleistung ist ein wichtiger Faktor für Leistungsfähigkeit und Gesundheit in der heutigen Gesellschaft. Moderne LED-Leuchten ermöglichen unterschiedliche Beleuchtungsoptionen sowohl am Tag als auch in der Nacht. In der vorliegenden Arbeit wurden keine Effekte durch unterschiedliche Farbspektren bei jungen männlichen Erwachsenen am Tag nachgewiesen. Im experimentellen Versuchsaufbau wurde jedoch beobachtet, dass im Versuchsaufbau Veränderungen bei Konzentrationsleistung, Wohlbefinden und Schläfrigkeit stattgefunden haben.

Zusammenfassend resultieren folgende Erkenntnisse aus dieser Arbeit, die insbesondere für die künftige Forschung relevant sein könnten.

- Die durchgeführte Lichtexposition zeigte unter diesen Bedingungen und mit der vorliegenden Stichprobengröße keine Wirkung auf die Zielparameter. Bei Betrachtung der Vorher-Nachher-Differenzen liegt der Schluss nahe, dass natürliche Lichtbedingungen zu weniger Stress führen und möglicherweise die Konzentrationsleistung positiv beeinflussen. In zukünftigen Studien wäre die Berücksichtigung größerer Stichproben, anderer Zeitpunkte am Tage und gegebenenfalls längerer Expositionszeiträume zu überdenken.
- In dem hier vorliegenden experimentellen Versuchsaufbau ist unklar, was die Lichtexposition mit 120 Minuten in einem kleinen Raum emotional auslöst. Es ist anzunehmen, dass einige Probanden durch diese Situation Stress empfanden. Somit ist auch darauf bezogen eine weitere Differenzierung wünschenswert.

Abschließend lässt sich feststellen, dass diese Arbeit als kontrollierte Laborstudie durchgeführt wurde und bisher keine vergleichbare Studie am Tag erfolgte. Ein signifikanter Farbeffekt auf die Zielparameter konnte nicht dargelegt werden, jedoch eine positive Differenz insbesondere der Konzentrationsleistung mit der Zeit assoziiert. Es ist nicht auszuschließen, dass unter den bereits aufgeführten Berücksichtigungen auch ein Farbeffekt darzustellen wäre.

6. Literaturverzeichnis

1. Luo W, Kramer R, Kompier M, Smolders K, de Kort Y, van Marken Lichtenbelt W. Effects of correlated color temperature of light on thermal comfort, thermophysiology and cognitive performance. *Building and Environment* 2023; **231**: 109944.
2. Keis O, Helbig H, Streb J, Hille K. Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance. *Trends in Neuroscience and Education* 2014; **3**(3-4): 86-92.
3. Viola AU, James LM, Schlangen LJ, Dijk DJ. Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scand J Work Environ Health* 2008; **34**(4): 297-306.
4. DiLaura DL, Houser K, Mistrick R, Steffy GR. The lighting handbook: reference and application. 2011.
5. Akerstedt T, Gillberg M. Subjective and objective sleepiness in the active individual. *Int J Neurosci* 1990; **52**(1-2): 29-37.
6. Dumont M, Beaulieu C. Light exposure in the natural environment: relevance to mood and sleep disorders. *Sleep Med* 2007; **8**(6): 557-65.
7. Bedrosian TA, Nelson RJ. Timing of light exposure affects mood and brain circuits. *Translational Psychiatry* 2017; **7**(1): e1017-e.
8. Cajochen C, Münch M, Kobińska S, et al. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 2005; **90**(3): 1311-6.
9. Moore-Ede M, Heitmann A, Guttkuhn R. Circadian Potency Spectrum with Extended Exposure to Polychromatic White LED Light under Workplace Conditions. *J Biol Rhythms* 2020; **35**(4): 405-15.
10. Kent ST, Kabagambe EK, Wadley VG, et al. The relationship between long-term sunlight radiation and cognitive decline in the REGARDS cohort study. *Int J Biometeorol* 2014; **58**(3): 361-70.
11. Knez I. Effects of indoor lighting on mood and cognition. *Journal of Environmental Psychology* 1995; **15**(1): 39-51.
12. Mott MS, Robinson DH, Walden A, Burnette J, Rutherford AS. Illuminating the Effects of Dynamic Lighting on Student Learning. *SAGE Open* 2012; **2**(2): 2158244012445585.
13. Slegers P, Moolenaar N, Galetzka M, Pruyn A, Sarroukh B, van der Zande B. Lighting affects students' concentration positively: Findings from three Dutch studies. *Lighting Research & Technology* 2013; **45**(2): 159-75.
14. Brickenkamp R. Test d2: aufmerksamkeits-belastungs-test: Verlag für Psychologie Hogrefe; 1962.
15. Cheung IN, Zee PC, Shalman D, Malkani RG, Kang J, Reid KJ. Morning and Evening Blue-Enriched Light Exposure Alters Metabolic Function in Normal Weight Adults. *Plos One* 2016; **11**(5): e0155601.
16. Nijijima A, Nagai K, Nagai N, Nakagawa H. Light enhances sympathetic and suppresses vagal outflows and lesions including the suprachiasmatic nucleus eliminate these changes in rats. *J Auton Nerv Syst* 1992; **40**(2): 155-60.
17. Ishida A, Mutoh T, Ueyama T, et al. Light activates the adrenal gland: timing of gene expression and glucocorticoid release. *Cell Metab* 2005; **2**(5): 297-307.
18. Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D. Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep* 2006; **29**(2): 161-8.
19. Lucas RJ, Peirson SN, Berson DM, et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends Neurosci* 2014; **37**(1): 1-9.
20. Kostoglou-Athanassiou I, Treacher DF, Wheeler MJ, Forsling ML. Bright light exposure and pituitary hormone secretion. *Clin Endocrinol (Oxf)* 1998; **48**(1): 73-9.
21. Leproult R, Colechia EF, L'Hermite-Balériaux M, Van Cauter E. Transition from dim to bright light in the morning induces an immediate elevation of cortisol levels. *J Clin Endocrinol Metab* 2001; **86**(1): 151-7.

22. Rüger M, Gordijn MC, Beersma DG, de Vries B, Daan S. Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: comparison of daytime and nighttime exposure. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2006; **290**(5): R1413-20.
23. Jung CM, Khalsa SBS, Scheer FA, et al. Acute effects of bright light exposure on cortisol levels. *Journal of biological rhythms* 2010; **25**(3): 208-16.
24. Hattar S, Liao HW, Takao M, Berson DM, Yau KW. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 2002; **295**(5557): 1065-70.
25. Berson DM, Dunn FA, Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 2002; **295**(5557): 1070-3.
26. Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, et al. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci* 2001; **21**(16): 6405-12.
27. Thapan K, Arendt J, Skene DJ. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol* 2001; **535**(Pt 1): 261-7.
28. Tu DC, Zhang D, Demas J, et al. Physiologic diversity and development of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells. *Neuron* 2005; **48**(6): 987-99.
29. Mure LS. Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells of the Human Retina. *Front Neurol* 2021; **12**: 636330.
30. Beier C, Zhang Z, Yurgel M, Hattar S. Projections of ipRGCs and conventional RGCs to retinorecipient brain nuclei. *J Comp Neurol* 2021; **529**(8): 1863-75.
31. Siraji MA, Kalavally V, Schaefer A, Haque S. Effects of Daytime Electric Light Exposure on Human Alertness and Higher Cognitive Functions: A Systematic Review. *Front Psychol* 2021; **12**: 765750.
32. Sliney DH. What is light? The visible spectrum and beyond. *Eye (Lond)* 2016; **30**(2): 222-9.
33. Cajochen C, Frey S, Anders D, et al. Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J Appl Physiol (1985)* 2011; **110**(5): 1432-8.
34. Backović DV, Maksimović M, Davidović D, Zivojinović JI, Stevanović D. [Stress and mental health among medical students]. *Srp Arh Celok Lek* 2013; **141**(11-12): 780-4.
35. Shigemi J, Mino Y, Tsuda T, Babazono A, Aoyama H. The relationship between job stress and mental health at work. *Industrial Health* 1997; **35**(1): 29-35.
36. Marten Wd, Wilkerson B. Stress, work and mental health: a global perspective. *Acta neuropsychiatrica* 2003; **15**(1): 44-53.
37. Parslow* RA, Jorm AF, Christensen H, Rodgers B, Strazdins L, D'Souza RM. The associations between work stress and mental health: A comparison of organizationally employed and self-employed workers. *Work & Stress* 2004; **18**(3): 231-44.
38. Lohmann-Haislah A. Stressreport Deutschland 2012. *Psychische Anforderungen, Ressourcen und Befinden* 2013; **1**.
39. Beermann B, Schütte M, Lohmann-Haislah A, et al. Stressreport Deutschland 2019. *Psychische Anforderungen, Ressourcen und Befinden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*; 2020.
40. Suadicani P, Andersen LL, Holtermann A, Mortensen OS, Gyntelberg F. Perceived psychological pressure at work, social class, and risk of stroke: a 30-year follow-up in Copenhagen male study. *J Occup Environ Med* 2011; **53**(12): 1388-95.
41. Leitner W, Ortner R. Aufmerksamkeit und Konzentration im Blickfeld von Bildung und Erziehung. *Kontinuität, Krise und Zukunft der Bildung Analysen und Perspektiven Texte zur Theorie und Geschichte der Bildung Münster* 2004: 123-33.
42. Horn S. Konzentration: mit gesteigertem Aufnahme- und Erinnerungsvermögen zum Erfolg: Wirtschaftsverl. Ueberreuter; 1993.
43. Breithecker D, Dordel S. Bewegte Schule als Chance einer Förderung der Lern- und Leistungsfähigkeit. *Haltung und Bewegung* 2003; **23**(2): 5-15.
44. Wundt WM. Grundriss der psychologie: A. Kröner; 1913.
45. Moosbrugger H, Goldhammer F. Aufmerksamkeits- und Konzentrationsdiagnostik. 2006: 83-102.

46. Amelang M, Zielinski W. Ausgewählte Beispiele diagnostischer Verfahren. *Psychologische Diagnostik und Intervention*: Springer; 1997: 191-333.
47. Daseking M, Putz D. TBS-TK Rezension: "Test d2-R. Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest". *Psychologische Rundschau* 2015; **66**: 265-7.
48. Büttner G, Schmidt-Atzert L. Diagnostik von Konzentration und Aufmerksamkeit: Hogrefe Verlag; 2004.
49. Schweizer K. Leistung und Leistungsdiagnostik: Springer; 2006.
50. Flehmig HC. Reaktionszeitvariabilität als Indikator von Konzentrationsleistungen. [Dissertation]. Dresden: Technische Universität Dresden; 2010.
51. Westhoff K, Graubner J. Konstruktion eines Komplexen Konzentrationstests. *Diagnostica* 2003.
52. Durmer JS, Dinges DF. Neurocognitive consequences of sleep deprivation. *Semin Neurol* 2005; **25**(1): 117-29.
53. van Schie MKM, Lammers GJ, Fronczek R, Middelkoop HAM, van Dijk JG. Vigilance: discussion of related concepts and proposal for a definition. *Sleep Medicine* 2021; **83**: 175-81.
54. Osterode W, Schranz S, Jordakieva G. Effects of night shift on the cognitive load of physicians and urinary steroid hormone profiles - a randomized crossover trial. *Chronobiol Int* 2018; **35**(7): 946-58.
55. Killgore WD. Effects of sleep deprivation on cognition. *Prog Brain Res* 2010; **185**: 105-29.
56. Lovato N, Lack L. The effects of napping on cognitive functioning. *Prog Brain Res* 2010; **185**: 155-66.
57. McLellan TM, Caldwell JA, Lieberman HR. A review of caffeine's effects on cognitive, physical and occupational performance. *Neurosci Biobehav Rev* 2016; **71**: 294-312.
58. Carriere JS, Cheyne JA, Solman GJ, Smilek D. Age trends for failures of sustained attention. *Psychology and aging* 2010; **25**(3): 569.
59. Staub B, Doignon-Camus N, Bacon É, Bonnefond A. The effects of aging on sustained attention ability: an ERP study. *Psychology and aging* 2014; **29**(3): 684.
60. Westhoff K. Aufmerksamkeit und Konzentration. *Verhaltens-und Leistungsunterschiede* 1995; **2**: 375-402.
61. Cajochen C, Frey S, Anders D, et al. Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J Appl Physiol (1985)* 2011; **110**(5): 1432-8.
62. Hattar S, Liao H-W, Takao M, Berson DM, Yau K-W. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 2002; **295**(5557): 1065-70.
63. LeGates TA, Fernandez DC, Hattar S. Light as a central modulator of circadian rhythms, sleep and affect. *Nat Rev Neurosci* 2014; **15**(7): 443-54.
64. Hopkins S, Morgan P, Schlangen L, Williams P, Skene D, Middleton B. Blue-Enriched Lighting for Older People Living in Care Homes: Effect on Activity, Actigraphic Sleep, Mood and Alertness. *Current Alzheimer research* 2017; **14**.
65. Hunt DM, Wilkie SE, Bowmaker JK, Poopalasundaram S. Vision in the ultraviolet. *Cell Mol Life Sci* 2001; **58**(11): 1583-98.
66. Jaki Mekjavic P, Tipton MJ, Mekjavic IB. The eye in extreme environments. *Exp Physiol* 2021; **106**(1): 52-64.
67. Aumüller G, Aust G, Enegel J, et al. Anatomie 5. überarbeitete Auflage ed. Stuttgart: Thieme: (Duale Reihe); 2020.
68. Kröger RH, Biehlmaier O. Space-saving advantage of an inverted retina. *Vision Res* 2009; **49**(18): 2318-21.
69. Pape H-C, Kurtz A, Silbernagl S. Physiologie. Stuttgart: Thieme; 2019.
70. McDougal DH, Gamlin PD. Autonomic control of the eye. *Compr Physiol* 2015; **5**(1): 439-73.
71. Nickla DL, Wallman J. The multifunctional choroid. *Prog Retin Eye Res* 2010; **29**(2): 144-68.
72. Zhang Y, Ren R, Sanford LD, et al. Sleep in posttraumatic stress disorder: A systematic review and meta-analysis of polysomnographic findings. *Sleep Med Rev* 2019; **48**: 101210.

73. Cowan CS, Renner M, De Gennaro M, et al. Cell Types of the Human Retina and Its Organoids at Single-Cell Resolution. *Cell* 2020; **182**(6): 1623-40.e34.
74. Thoreson WB, Dacey DM. Diverse Cell Types, Circuits, and Mechanisms for Color Vision in the Vertebrate Retina. *Physiol Rev* 2019; **99**(3): 1527-73.
75. Baer R, Barfuß M, Seifert D. Beleuchtungstechnik: Grundlagen: Huss-Medien; 2020.
76. Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM, Siegelbaum S, Hudspeth AJ, Mack S. Principles of neural science: McGraw-hill New York; 2000.
77. Cammalleri M, Bagnoli P, Bigiani A. Molecular and Cellular Mechanisms Underlying Somatostatin-Based Signaling in Two Model Neural Networks, the Retina and the Hippocampus. *Int J Mol Sci* 2019; **20**(10).
78. R Sparrow J, Hicks D, P Hamel C. The retinal pigment epithelium in health and disease. *Current molecular medicine* 2010; **10**(9): 802-23.
79. Willermain F, Libert S, Motulsky E, et al. Origins and consequences of hyperosmolar stress in retinal pigmented epithelial cells. *Front Physiol* 2014; **5**: 199.
80. Hoon M, Okawa H, Della Santina L, Wong RO. Functional architecture of the retina: development and disease. *Progress in retinal and eye research* 2014; **42**: 44-84.
81. Do MTH. Melanopsin and the Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells: Biophysics to Behavior. *Neuron* 2019; **104**(2): 205-26.
82. Mustafi D, Engel AH, Palczewski K. Structure of cone photoreceptors. *Prog Retin Eye Res* 2009; **28**(4): 289-302.
83. Pedrotti F, Pedrotti L, Bausch W, Schmidt H. Optik für Ingenieure: Springer; 2005.
84. Morin LP. Neuroanatomy of the extended circadian rhythm system. *Exp Neurol* 2013; **243**: 4-20.
85. Wirz-Justice A, Skene DJ, Münch M. The relevance of daylight for humans. *Biochem Pharmacol* 2021; **191**: 114304.
86. Honma S. The mammalian circadian system: a hierarchical multi-oscillator structure for generating circadian rhythm. *J Physiol Sci* 2018; **68**(3): 207-19.
87. Güler AD, Ecker JL, Lall GS, et al. Melanopsin cells are the principal conduits for rod-cone input to non-image-forming vision. *Nature* 2008; **453**(7191): 102-5.
88. Fernandez DC, Fogerson PM, Lazzerini Ospri L, et al. Light Affects Mood and Learning through Distinct Retina-Brain Pathways. *Cell* 2018; **175**(1): 71-84.e18.
89. Lok R, Smolders KCHJ, Beersma DGM, de Kort YAW. Light, Alertness, and Alerting Effects of White Light: A Literature Overview. *Journal of Biological Rhythms* 2018; **33**(6): 589-601.
90. Badia P, Myers B, Boecker M, Culpepper J, Harsh JR. Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior. *Physiol Behav* 1991; **50**(3): 583-8.
91. Vandewalle G, Maquet P, Dijk DJ. Light as a modulator of cognitive brain function. *Trends Cogn Sci* 2009; **13**(10): 429-38.
92. Figueiro MG, Bierman A, Plitnick B, Rea MS. Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night. *BMC neuroscience* 2009; **10**(1): 1-11.
93. Rahman SA, Wright KP, Jr., Lockley SW, Czeisler CA, Gronfier C. Characterizing the temporal Dynamics of Melatonin and Cortisol Changes in Response to Nocturnal Light Exposure. *Sci Rep* 2019; **9**(1): 19720.
94. Miller DB, O'Callaghan JP. Neuroendocrine aspects of the response to stress. *Metabolism* 2002; **51**(6 Suppl 1): 5-10.
95. Carrasco GA, Van de Kar LD. Neuroendocrine pharmacology of stress. *Eur J Pharmacol* 2003; **463**(1-3): 235-72.
96. Watanabe Y, Gould E, McEwen BS. Stress induces atrophy of apical dendrites of hippocampal CA3 pyramidal neurons. *Brain Res* 1992; **588**(2): 341-5.
97. Starkman MN, Giordani B, Gebarski SS, Berent S, Schork MA, Schteingart DE. Decrease in cortisol reverses human hippocampal atrophy following treatment of Cushing's disease. *Biol Psychiatry* 1999; **46**(12): 1595-602.
98. Roozendaal B. Stress and Memory: Opposing Effects of Glucocorticoids on Memory Consolidation and Memory Retrieval. *Neurobiology of Learning and Memory* 2002; **78**(3): 578-95.

99. Joëls M, Pu Z, Wiegert O, Oitzl MS, Krugers HJ. Learning under stress: how does it work? *Trends in cognitive sciences* 2006; **10**(4): 152-8.
100. Joëls M, Krugers H, Karst H. Stress-induced changes in hippocampal function. *Progress in brain research* 2007; **167**: 3-15.
101. de Kloet ER, Vreugdenhil E, Oitzl MS, Joëls M. Brain Corticosteroid Receptor Balance in Health and Disease*. *Endocrine Reviews* 1998; **19**(3): 269-301.
102. de Kloet ER, Joëls M, Holsboer F. Stress and the brain: from adaptation to disease. *Nat Rev Neurosci* 2005; **6**(6): 463-75.
103. Roozendaal B. Systems mediating acute glucocorticoid effects on memory consolidation and retrieval. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry* 2003; **27**(8): 1213-23.
104. Paragliola RM, Corsello A, Troiani E, et al. Cortisol circadian rhythm and jet-lag syndrome: evaluation of salivary cortisol rhythm in a group of eastward travelers. *Endocrine* 2021; **73**(2): 424-30.
105. Horrocks PM, Jones AF, Ratcliffe WA, et al. Patterns of ACTH and cortisol pulsatility over twenty-four hours in normal males and females. *Clin Endocrinol (Oxf)* 1990; **32**(1): 127-34.
106. WEITZMAN ED, FUKUSHIMA D, NOGEIRE C, ROFFWARG H, GALLAGHER TF, HELLMAN L. Twenty-four Hour Pattern of the Episodic Secretion of Cortisol in Normal Subjects. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 1971; **33**(1): 14-22.
107. Rahman SA, Marcu S, Shapiro CM, Brown TJ, Casper RF. Spectral modulation attenuates molecular, endocrine, and neurobehavioral disruption induced by nocturnal light exposure. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2011; **300**(3): E518-27.
108. Kawasaki A, Kardon RH. Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells. *J Neuroophthalmol* 2007; **27**(3): 195-204.
109. Dacey DM, Liao HW, Peterson BB, et al. Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. *Nature* 2005; **433**(7027): 749-54.
110. Vandewalle G, Gais S, Schabus M, et al. Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure. *Cereb Cortex* 2007; **17**(12): 2788-95.
111. Bouret S, Sara SJ. Network reset: a simplified overarching theory of locus coeruleus noradrenaline function. *Trends Neurosci* 2005; **28**(11): 574-82.
112. Aston-Jones G, Rajkowski J, Cohen J. Role of locus coeruleus in attention and behavioral flexibility. *Biol Psychiatry* 1999; **46**(9): 1309-20.
113. Aston-Jones G, Cohen JD. An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: adaptive gain and optimal performance. *Annu Rev Neurosci* 2005; **28**: 403-50.
114. Rahman SA, Flynn-Evans EE, Aeschbach D, Brainard GC, Czeisler CA, Lockley SW. Diurnal spectral sensitivity of the acute alerting effects of light. *Sleep* 2014; **37**(2): 271-81.
115. Vandewalle G, Schwartz S, Grandjean D, et al. Spectral quality of light modulates emotional brain responses in humans. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2010; **107**(45): 19549-54.
116. Phipps-Nelson J, Redman JR, Dijk DJ, Rajaratnam SM. Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. *Sleep* 2003; **26**(6): 695-700.
117. Bao J, Song X, Li Y, Bai Y, Zhou Q. Effect of lighting illuminance and colour temperature on mental workload in an office setting. *Sci Rep* 2021; **11**(1): 15284.
118. Xiong L, Huang X, Li J, et al. Impact of Indoor Physical Environment on Learning Efficiency in Different Types of Tasks: A 3 × 4 × 3 Full Factorial Design Analysis. *Int J Environ Res Public Health* 2018; **15**(6).
119. Šmotek M, Vlček P, Saifutdinova E, Kopřivová J. Objective and Subjective Characteristics of Vigilance under Different Narrow-Bandwidth Light Conditions: Do Shorter Wavelengths Have an Alertness-Enhancing Effect? *Neuropsychobiology* 2019; **78**(4): 238-48.
120. Alkozei A, Smith R, Dailey NS, Bajaj S, Killgore WDS. Acute exposure to blue wavelength light during memory consolidation improves verbal memory performance. *Plos One* 2017; **12**(9): e0184884.

121. Stefani O, Cajochen C. Should We Re-think Regulations and Standards for Lighting at Workplaces? A Practice Review on Existing Lighting Recommendations. *Front Psychiatry* 2021; **12**: 652161-.
122. Weigand A, Edelkraut L, Conrad M, Grimm S, Bajbouj M. Light-Dependent Effects of Prefrontal rTMS on Emotional Working Memory. *Brain Sci* 2021; **11**(4).
123. Studer P, Brucker JM, Haag C, et al. Effects of blue- and red-enriched light on attention and sleep in typically developing adolescents. *Physiol Behav* 2019; **199**: 11-9.
124. Sahin L, Figueiro MG. Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon. *Physiol Behav* 2013; **116-117**: 1-7.
125. Tonetti L, Natale V. Effects of a single short exposure to blue light on cognitive performance. *Chronobiol Int* 2019; **36**(5): 725-32.
126. Martin JS, Laberge L, Sasseville A, et al. Timely use of in-car dim blue light and blue blockers in the morning does not improve circadian adaptation of fast rotating shift workers. *Chronobiol Int* 2021; **38**(5): 705-19.
127. Figueiro MG, Pedler D. Red light: A novel, non-pharmacological intervention to promote alertness in shift workers. *J Safety Res* 2020; **74**: 169-77.
128. Sunde E, Pedersen T, Mrdalj J, et al. Blue-Enriched White Light Improves Performance but Not Subjective Alertness and Circadian Adaptation During Three Consecutive Simulated Night Shifts. *Front Psychol* 2020; **11**: 2172.
129. Sletten TL, Raman B, Magee M, et al. A Blue-Enriched, Increased Intensity Light Intervention to Improve Alertness and Performance in Rotating Night Shift Workers in an Operational Setting. *Nat Sci Sleep* 2021; **13**: 647-57.
130. Mohebian Z, Farhang Dehghan S, Dehghan H. Evaluation of the Combined Effects of Heat and Lighting on the Level of Attention and Reaction Time: Climate Chamber Experiments in Iran. *ScientificWorldJournal* 2018; **2018**: 5171582.
131. Te Kulve M, Schlangen L, Schellen L, Souman JL, van Marken Lichtenbelt W. Correlated colour temperature of morning light influences alertness and body temperature. *Physiol Behav* 2018; **185**: 1-13.
132. Lee P, Lu WS, Liu CH, Lin HY, Hsieh CL. Test-Retest Reliability and Minimal Detectable Change of the D2 Test of Attention in Patients with Schizophrenia. *Arch Clin Neuropsychol* 2018; **33**(8): 1060-8.
133. Buchele Harris H, Cortina KS, Templin T, Colabianchi N, Chen W. Impact of Coordinated-Bilateral Physical Activities on Attention and Concentration in School-Aged Children. *Biomed Res Int* 2018; **2018**: 2539748.
134. Chellappa SL, 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? *Plos One* 2011; **6**(1): e16429.
135. Chellappa SL, Gordijn MCM, Cajochen C. Chapter 7 - Can light make us bright? Effects of light on cognition and sleep. In: Van Dongen HPA, Kerkhof GA, eds. *Progress in Brain Research*: Elsevier; 2011: 119-33.
136. Pauley SM. Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Med Hypotheses* 2004; **63**(4): 588-96.
137. Herold F, Behrendt T, Meißner C, Müller NG, Schega L. The Influence of Acute Sprint Interval Training on Cognitive Performance of Healthy Younger Adults. *Int J Environ Res Public Health* 2022; **19**(1).
138. Hilditch CJ, Wong LR, Bathurst NG, et al. Rise and shine: The use of polychromatic short-wavelength-enriched light to mitigate sleep inertia at night following awakening from slow-wave sleep. *J Sleep Res* 2022; **31**(5): e13558.
139. Youngstedt SD, Kripke DF. Does bright light have an anxiolytic effect? - an open trial. *BMC Psychiatry* 2007; **7**: 62.
140. Palmero LB, Martínez-Pérez V, Tortajada M, Campoy G, Fuentes LJ. Mid-luteal phase progesterone effects on vigilance tasks are modulated by women's chronotype. *Psychoneuroendocrinology* 2022; **140**: 105722.
141. Reinhardt É L, Fernandes P, Markus RP, Fischer FM. Night work effects on salivary cytokines TNF, IL-1 β and IL-6. *Chronobiol Int* 2019; **36**(1): 11-26.

142. Wittchen H-U, Zaudig M, Fydrich T. Skid. Strukturiertes klinisches Interview für DSM-IV. Achse I und II. Handanweisung. 1997.
143. Cajochen C. Alerting effects of light. *Sleep Med Rev* 2007; **11**(6): 453-64.
144. Cohen S, Kamarck T, Mermelstein R. A global measure of perceived stress. *J Health Soc Behav* 1983; **24**(4): 385-96.
145. Cohen S, Kamarck T, Mermelstein R. Perceived stress scale. *Measuring stress: A guide for health and social scientists* 1994; **10**(2): 1-2.
146. Lee E-H. Review of the Psychometric Evidence of the Perceived Stress Scale. *Asian Nursing Research* 2012; **6**(4): 121-7.
147. Cohen S. Perceived stress in a probability sample of the United States. 1988.
148. Andreou E, Alexopoulos EC, Lionis C, et al. Perceived stress scale: reliability and validity study in Greece. *International journal of environmental research and public health* 2011; **8**(8): 3287-98.
149. Petrowski K, Paul S, Albani C, Brähler E. Factor structure and psychometric properties of the trier inventory for chronic stress (TICS) in a representative German sample. *BMC Med Res Methodol* 2012; **12**: 42.
150. Hapke U, Maske UE, Scheidt-Nave C, Bode L, Schlack R, Busch MA. Chronischer Stress bei Erwachsenen in Deutschland. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 2013; **56**(5): 749-54.
151. Carter A, Briggs-Gowan M, Ornstein Davis N, Schulz, P., Schlotz, W. & Becker, P.(2004). Trierer In-ventar zum chronischen Stress (TICS). Göttingen: Hogrefe.
152. Manea L, Gilbody S, McMillan D. A diagnostic meta-analysis of the Patient Health Questionnaire-9 (PHQ-9) algorithm scoring method as a screen for depression. *General Hospital Psychiatry* 2015; **37**(1): 67-75.
153. Kroenke K, Spitzer RL, Williams JB. The PHQ-9: validity of a brief depression severity measure. *J Gen Intern Med* 2001; **16**(9): 606-13.
154. Ware JE, Jr., Gandek B. Overview of the SF-36 Health Survey and the International Quality of Life Assessment (IQOLA) Project. *J Clin Epidemiol* 1998; **51**(11): 903-12.
155. King JT, Jr., Horowitz MB, Kassam AB, Yonas H, Roberts MS. The short form-12 and the measurement of health status in patients with cerebral aneurysms: performance, validity, and reliability. *J Neurosurg* 2005; **102**(3): 489-94.
156. Su SW, Wang D. The Reliability and Validity of Short Form-12 Health Survey Version 2 for Chinese Older Adults. *Iran J Public Health* 2019; **48**(6): 1014-24.
157. Shah CH, Brown JD. Reliability and Validity of the Short-Form 12 Item Version 2 (SF-12v2) Health-Related Quality of Life Survey and Disutilities Associated with Relevant Conditions in the U.S. Older Adult Population. *J Clin Med* 2020; **9**(3).
158. Gill SC, Butterworth P, Rodgers B, Mackinnon A. Validity of the mental health component scale of the 12-item Short-Form Health Survey (MCS-12) as measure of common mental disorders in the general population. *Psychiatry Res* 2007; **152**(1): 63-71.
159. Roenneberg T. Having Trouble Typing? What on Earth Is Chronotype? *J Biol Rhythms* 2015; **30**(6): 487-91.
160. Griefahn B, Künemund C, Bröde P, Mehnert P. Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg: The Validity of a German Version of the Morningness-Eveningness-Questionnaire Developed by Horne and Östberg. *Somnologie* 2001; **5**.
161. Rique GLN, Fernandes Filho GMC, Ferreira ADC, de Sousa-Muñoz RL. Relationship between chronotype and quality of sleep in medical students at the Federal University of Paraíba, Brazil. *Sleep Science* 2014; **7**(2): 96-102.
162. Horne JA, Ostberg O. A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *Int J Chronobiol* 1976; **4**(2): 97-110.
163. Levandovski R, Sasso E, Hidalgo MP. Chronotype: a review of the advances, limits and applicability of the main instruments used in the literature to assess human phenotype. *Trends Psychiatry Psychother* 2013; **35**(1): 3-11.
164. Borkenau P, Ostendorf F. NEO-Fünf-Faktoren-Inventar (NEO-FFI) nach Costa und McCrae: Handanweisung; 1993.

165. Costa P, McCrae R. Neo PI-R professional manual. *Psychological Assessment Resources* 1992; **396**.
166. Foroughi AA, Parvizifard A, Sadeghi K, Moghadam AP. Psychometric properties of the Persian version of the Emotion Regulation Questionnaire. *Trends Psychiatry Psychother* 2021; **43**(2): 101-7.
167. Garnefski N, Kraaij V. Cognitive emotion regulation questionnaire - development of a short 18-item version (CERQ-short). *Personality and Individual Differences* 2006; **41**: 1045-53.
168. Knowles KA, Olatunji BO. Specificity of trait anxiety in anxiety and depression: Meta-analysis of the State-Trait Anxiety Inventory. *Clin Psychol Rev* 2020; **82**: 101928.
169. Julian LJ. Measures of anxiety: State-Trait Anxiety Inventory (STAI), Beck Anxiety Inventory (BAI), and Hospital Anxiety and Depression Scale-Anxiety (HADS-A). *Arthritis Care Res (Hoboken)* 2011; **63 Suppl 11**(0 11): S467-72.
170. Gaab J. PASA–Primary Appraisal Secondary Appraisal - Ein Fragebogen zur Erfassung von situationsbezogenen kognitiven Bewertungen. *Verhaltenstherapie* 2009; **19**(2): 114-5.
171. Klimek L, Bergmann KC, Biedermann T, et al. Visual analogue scales (VAS): Measuring instruments for the documentation of symptoms and therapy monitoring in cases of allergic rhinitis in everyday health care: Position Paper of the German Society of Allergology (AeDA) and the German Society of Allergy and Clinical Immunology (DGAKI), ENT Section, in collaboration with the working group on Clinical Immunology, Allergology and Environmental Medicine of the German Society of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery (DGHNOKHC). *Allergo J Int* 2017; **26**(1): 16-24.
172. Steyer R, Schwenkmezger P, Notz P, Eid M. Der mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF). Handanweisung [The multidimensional affect rating scale (MDBF). Manual]. *Göttingen: Hogrefe* 1997.
173. Hinz A, Daig I, Petrowski K, Brähler E. Die Stimmung in der deutschen Bevölkerung: Referenzwerte für den Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogen MDBF. *PPmP-Psychotherapie· Psychosomatik· Medizinische Psychologie* 2012; **62**(02): 52-7.
174. Shahid A, Wilkinson K, Marcu S, Shapiro CM. Karolinska sleepiness scale (KSS). STOP, THAT and One Hundred Other Sleep Scales: Springer; 2011: 209-10.
175. Schwartz JR. Modafinil: new indications for wake promotion. *Expert Opin Pharmacother* 2005; **6**(1): 115-29.
176. Axelsson J, Akerstedt T, Kecklund G, Lowden A. Tolerance to shift work-how does it relate to sleep and wakefulness? *Int Arch Occup Environ Health* 2004; **77**(2): 121-9.
177. Kaida K, Takahashi M, Akerstedt T, et al. Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables. *Clin Neurophysiol* 2006; **117**(7): 1574-81.
178. Schmidt-Atzert L, Amelang M. Diagnostische Verfahren. *Psychologische Diagnostik*: Springer; 2012: 175-357.
179. Brickenkamp R, Schmidt-Atzert L, Liepmann D. Test d2 - Revision: Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest. *Göttingen: Hogrefe*; 2010.
180. Schmidt-Atzert L, Amelang M. Grundlagen diagnostischer Verfahren. *Psychologische Diagnostik*: Springer; 2012: 35-174.
181. Romainczyk B. Bearbeitungsstrategien in Konzentrationstests: Auswirkungen des speed-accuracy-tradeoff auf die Konstruktvalidität; 2008.
182. Wilhelm BJ. [Pupillography for the assessment of driver sleepiness]. *Klin Monbl Augenheilkd* 2008; **225**(9): 791-8.
183. Pinheiro HM, da Costa RM. Pupillary light reflex as a diagnostic aid from computational viewpoint: A systematic literature review. *Journal of Biomedical Informatics* 2021; **117**: 103757.
184. Różanowski K, Bernat M, Kamińska A. Estimation of operators' fatigue using optical methods for determination of pupil activity. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 2015; **28**(2): 263-81.
185. Lüdtke H, Wilhelm B, Adler M, Schaeffel F, Wilhelm H. Mathematical procedures in data recording and processing of pupillary fatigue waves. *Vision Res* 1998; **38**(19): 2889-96.
186. Ganesan S, Magee M, Stone JE, et al. The Impact of Shift Work on Sleep, Alertness and Performance in Healthcare Workers. *Sci Rep* 2019; **9**(1): 4635.

187. Barger LK, Sullivan JP, Lockley SW, Czeisler CA. Exposure to Short Wavelength-Enriched White Light and Exercise Improves Alertness and Performance in Operational NASA Flight Controllers Working Overnight Shifts. *J Occup Environ Med* 2021; **63**(2): 111-8.
188. Sunde E, Pedersen T, Mrdalj J, et al. Alerting and Circadian Effects of Short-Wavelength vs. Long-Wavelength Narrow-Bandwidth Light during a Simulated Night Shift. *Clocks Sleep* 2020; **2**(4): 502-22.
189. Lok R, Joyce DS, Zeitzer JM. Impact of daytime spectral tuning on cognitive function. *J Photochem Photobiol B* 2022; **230**: 112439.
190. Souman JL, Tinga AM, Te Pas SF, van Ee R, Vlaskamp BNS. Acute alerting effects of light: A systematic literature review. *Behav Brain Res* 2018; **337**: 228-39.
191. Vandewalle G, Balteau E, Phillips C, et al. Daytime light exposure dynamically enhances brain responses. *Curr Biol* 2006; **16**(16): 1616-21.
192. Fisk AS, Tam SKE, Brown LA, Vyazovskiy VV, Bannerman DM, Peirson SN. Light and Cognition: Roles for Circadian Rhythms, Sleep, and Arousal. *Front Neurol* 2018; **9**: 56.
193. Santner A, Kopp M, Federolf P. Partly randomised, controlled study in children aged 6-10 years to investigate motor and cognitive effects of a 9-week coordination training intervention with concurrent mental tasks. *BMJ Open* 2018; **8**(5): e021026.
194. Xiao H, Cai H, Li X. Non-visual effects of indoor light environment on humans: A review(☆). *Physiol Behav* 2021; **228**: 113195.
195. Aurizki GE, Wilson I. Nurse-led task-shifting strategies to substitute for mental health specialists in primary care: A systematic review. *Int J Nurs Pract* 2022; **28**(5): e13046.
196. Bauer M, Glenn T, Monteith S, et al. The potential influence of LED lighting on mental illness. *World J Biol Psychiatry* 2018; **19**(1): 59-73.
197. Nussbaumer B, Kaminski-Hartenthaler A, Forneris CA, et al. Light therapy for preventing seasonal affective disorder. *Cochrane Database Syst Rev* 2015; (11): Cd011269.
198. Meyerhoff J, Young MA, Rohan KJ. Patterns of depressive symptom remission during the treatment of seasonal affective disorder with cognitive-behavioral therapy or light therapy. *Depress Anxiety* 2018; **35**(5): 457-67.
199. Gibney E. Blue LED wins physics Nobel. *Nature* 2014; **514**(7521): 152-3.
200. Wu CJ, Huang TY, Ou SF, Shiea JT, Lee BO. Effects of Lighting Interventions to Improve Sleepiness in Night-Shift Workers: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Healthcare (Basel)* 2022; **10**(8).
201. Wahl S, Engelhardt M, Schaupp P, Lappe C, Ivanov IV. The inner clock-Blue light sets the human rhythm. *J Biophotonics* 2019; **12**(12): e201900102.
202. Baranwal N, Yu PK, Siegel NS. Sleep physiology, pathophysiology, and sleep hygiene. *Prog Cardiovasc Dis* 2023; **77**: 59-69.
203. Hubbard J, Ruppert E, Gropp CM, Bourgin P. Non-circadian direct effects of light on sleep and alertness: lessons from transgenic mouse models. *Sleep Med Rev* 2013; **17**(6): 445-52.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elektromagnetische Strahlung	17
Abbildung 2: Aufbau des Auges	20
Abbildung 3: Retina	22
Abbildung 4: Sensitivität der Zapfen.....	24
Abbildung 5: Dunkeladaptation	25
Abbildung 6: Phototransduktion	26
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Studienablaufs.....	38

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der eingesetzten Studieninstrumente.....	39
Tabelle 2: Eigenschaften der getesteten Farben	48
Tabelle 3: Charakteristika der Studienpopulation für ausgewählte Einflussfaktoren in den Interventionsgruppen.....	51
Tabelle 4: Fragebögen vor der Lichtexposition	52
Tabelle 5: Deskriptive Statistik der KL vor und nach der Lichtexposition im Vergleich.....	53
Tabelle 6: Allgemein lineares Modell der KL	53
Tabelle 7: Deskriptive Statistik KSS vor und nach der Lichtexposition im Vergleich	54
Tabelle 8: Allgemein lineares Modell KSS	54
Tabelle 9: Deskriptive Statistik des MDBF vor und nach der Lichtexposition im Vergleich ...	55
Tabelle 10: Allgemein lineares Modell MDBF	55
Tabelle 11: Deskriptive Statistik des STAI vor und nach der Lichtexposition im Vergleich....	56
Tabelle 12: Allgemeines lineares Modell STAI.....	56

8. Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen

Bisher sind keine Vorabveröffentlichungen der vorliegenden Ergebnisse erfolgt.