

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

**Einfluss von LED Lichtexposition (rot /blau) um
7:30 Uhr
auf die Aufmerksamkeit anhand von Auretim**

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

vorgelegt von
Lukas Weber Czekalla

promoviert am 09. Oktober 2024

Dekanin/Dekan:

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 Prof. Dr. K. Petrowski, Prof. Dr. C. 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.

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Messergebnisse wurden ohne meine Mitarbeit im Labor Kirschbaum der technischen Universität Dresden ermittelt.

Die in dieser Arbeit angegebenen Experimente sind nach entsprechender Anleitung durch Frau Prof. Dr. Katja Petrowski von mir selbst ausgeführt worden.

Die Abnahme der Speichelproben, die Gesundheits- und Schlafanamnese, die Farbsinnesprüfung sowie die Aretim-Testung, wurden von mir bzw. meinen Studienkollegen (Paul Wefers, Thomas Spürk, Miriam Weber, Ann Naeem) selbstständig durchgeführt.

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.

Köln, den 22.07.2024

Unterschrift:

Danksagung

Für das Gelingen dieser Doktorarbeit waren viele Personen auf ganz unterschiedliche Weise beteiligt. Im Folgenden möchte ich nun einzeln auf sie eingehen.

Zu aller erst möchte ich besonders Prof. Dr. Christian Albus als meinen Doktorvater für die Ermöglichung dieser Doktorarbeit danken.

Des Weiteren gilt ein großer Dank an Prof. Dr. Katja Petrowski, die das Projekt von Anfang bis zum Ende tatkräftig unterstützt und geleitet hat und dadurch die erfolgreiche Durchführung der Studie maßgeblich ermöglichte.

Für das angenehme Arbeiten im Team mit den anderen Mitarbeiter*innen die an der Studie beteiligt waren, möchte ich mich ebenfalls herzlich bedanken. Es hat immer sehr viel Spaß gemacht mit Euch zu arbeiten.

Als letztes möchte ich mich besonders bei meiner Familie und meinen engsten Freunden bedanken, die in allen Formen der Unterstützung für mich da waren.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	8
1. ZUSAMMENFASSUNG	9
2. EINLEITUNG	11
2.1. Vorwort und Zielsetzung	11
2.2. Anatomischer Aufbau des Auges	13
2.2.1. Das visuelle System	13
2.2.2. Anatomie des Auges	14
2.3. Lichtverarbeitung am Auge	16
2.3.1. Signalverarbeitung in der Retina	16
2.3.2. Verarbeitung und Weiterleitung des Lichtreizes	18
2.3.3. Verarbeitung in den neuronalen Zentren	20
2.3.4. Fotosensitive retinale Ganglienzellen	21
2.4. Kognitionspsychologische Grundlagen	23
2.4.1. Vigilanz	24
2.4.2. Bewusstsein	24
2.4.3. Gerichtete Aufmerksamkeit	24
2.4.4. Selektive Aufmerksamkeit	26
2.4.5. Gedächtnis	27
2.5. Physiologische und hormonelle Effekte der Lichteinwirkung	28
2.6. Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit und auf kognitive Prozesse	30
2.6.1. Subjektive, objektive und physiologische Messung von Aufmerksamkeit	31
2.6.2. Übersicht: Auswirkungen von Licht auf die Aufmerksamkeit und kognitive Prozesse	33
2.6.3. Einflussfaktoren von Licht auf die Aufmerksamkeit	35
2.7. Ableitung der Fragestellung	42
3. MATERIALIEN UND METHODEN	45
3.1. Patienten	45
3.2. Rekrutierung	45

3.2.1.	Einschlusskriterien	45
3.2.2.	Ausschlusskriterien	46
3.2.3.	Durchführungsort	46
3.3.	Einverständniserklärung/Datenschutz	46
3.4.	Verwendete Geräte	47
3.4.1.	Auretim	47
3.4.2.	LED Kugeln	48
3.4.3.	Luxometer	49
3.4.4.	Polar-Uhr	49
3.4.5.	Aktigraphen	49
3.5.	Verwendete Materialien	50
3.5.1.	Salivetten	50
3.5.2.	Fragebögen	50
3.6.	Untersuchungsverlauf	53
3.6.1.	Durchführung der Untersuchung	53
3.7.	Ausschluss von Farbsehstörungen	56
3.8.	Aufbewahrung der Speichelproben	56
3.9.	Auswertung der Speichelproben	57
3.10.	Statistische Auswertung	57
4.	ERGEBNISSE	59
4.1.	Charakteristik der Stichprobe	59
4.2.	Einfluss der Lichtexposition auf die Schläfrigkeit anhand der Karolinska Sleepingness Scale (KSS)	60
4.3.	Einfluss der Lichtexposition auf die in Auretim erhobenen nicht gedrückten Werte	62
4.4.	Einfluss der Lichtexposition auf die im Auretim-Test erhobenen falsch positiv gedrückten Werte	63
4.5.	Einfluss der Lichtexposition auf die im Auretim-Test erhobenen Mittelwerte	64
4.6.	Einfluss der Lichtexposition auf die im Auretim-Test erhobenen kürzesten Reaktionszeiten	65

4.7.	Einfluss der Lichtexposition auf die im Aretim-Test erhobenen längsten Reaktionszeiten	67
5.	DISKUSSION	68
5.1.	Interpretation und Einordnung	68
5.1.1.	Lichteinfluss auf die objektive Aufmerksamkeit	68
5.1.2.	Lichteinfluss auf die subjektive Aufmerksamkeit	71
5.2.	Klinische Implikation	72
5.3.	Stärken und Schwächen der Studie	73
5.4.	Empfehlungen für weiterführende Studien	75
5.5.	Schlussfolgerung	76
6.	LITERATURVERZEICHNIS	77
7.	ANHANG	90
7.1.	Abbildungsverzeichnis	90
7.2.	Tabellenverzeichnis	91
7.3.	Probandenanschreiben und Aufklärung	92
7.3.1.	Probandenaufklärung	92
7.3.2.	Einverständniserklärung der Diagnostik	94
7.3.3.	Datenschutzerklärung	95
7.4.	Fragebögen	96
7.4.1.	Sozialdemografischer Fragebogen	96
7.4.2.	Karolinska-Schläfrigkeitsskala	98
7.5.	Ethiknachweis	99

Abkürzungsverzeichnis

ADHS	Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Syndrom
AP	Aktionspotential
ARAS	aufsteigende retikuläre Aktivierungssystem
EEG	Elektronenenzephalografie
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie
HRV	Herzfrequenzvariabilität
ipRGCs	intrinsische photosensitive Ganglienzellen
KSS	Karolinska Sleepingness Scale
LED	light emitting diode
NiViL	Gesamtstudie zu Nicht visuellen Lichtwirkungen
nm	Nanometer
NPV	Nucleus paraventricularis
PET	Positronen-Emissions-Tomografie
PVT	psychomotorische Wachsamkeitsaufgabe
SCN	Nucleus Suprachiasmaticus
UCSD	Universität von California San Diego
UVA	Ultraviolettstrahlung

1. Zusammenfassung

In der heutigen Zeit ist der Mensch dauerhaft verschiedenen Lichtquellen ausgesetzt wodurch der Körper in verschiedenen Bereichen beeinflusst wird. Mit der Entwicklung der LED wurde eine kostengünstige und vielseitig einsetzbare Lichtquelle erfunden, welche die aktuelle und vermutlich auch in der Zukunft vorherrschende Lichtquelle darstellt. Durch die Beschaffenheit der LED lässt sich das Farbspektrum genau definieren und dadurch auch in dessen Auswirkung individuell nutzbar machen.

In dieser Studie wurde als Teilaspekt der Einfluss von roten und blauen Farbspektren auf die subjektive und objektive Aufmerksamkeit untersucht. Die Studie fand im Rahmen der NIVIL (Gesamtstudie zu Nicht visuellen Lichtwirkungen) Studien statt. Es erfolgte ein Vergleich unter standardisierten Bedingungen mit zwei verschiedenen Lichtspektren (blau: 201 lux; Spitzenwellenlänge 470–480 nm); rot: 235 lux; Spitzenwellenlänge 635 nm). Es wurden 27 männliche Probanden im Alter von 20 bis 35 Jahren ($M=25.63$, $SD \pm 6.86$) für die subjektive Aufmerksamkeit und 13 Probanden im Alter von 21 bis 28 ($M=23.54$, $SD \pm 2.11$) für die objektive Aufmerksamkeit untersucht. Es erfolgte bei der Probandengenerierung eine Auswahl anhand von spezifischen Fragebögen zur Einhaltung der Auswahlkriterien (u.a. psychische und/oder chronische Erkrankungen, Psychopharmaka, Body Mass Index: $> 27\text{kg/ m}^2$) statt. Aufgrund des physiologischen Zyklus der Frau wurde zur besseren Beurteilbarkeit der anderen Teiluntersuchung (u.a. des Cortisolwertes) in der Studie auf weibliche Probandinnen verzichtet.

Es erfolgte eine randomisierte Aufteilung in zwei Gruppen, in der eine 60 minütige Lichtexposition um 7:30 Uhr stattfand. Die subjektive Aufmerksamkeit wurde anhand der Karolinska Schläfrigkeitsskala vor und nach der Lichtexposition gemessen. Die objektive Aufmerksamkeitsmessung fand anhand einer Aretim Messung nach dem Prinzip der psychomotorischen Wachsamkeitsaufgabe (engl. Psychomotor Vigilance Task) zu Beginn und am Ende der Lichtexposition statt.

Die Ergebnisse der untersuchten Stichprobe ($n=27$) zeigten für die subjektive Aufmerksamkeit einen signifikanten Haupteffekt der Zeit $F(1, 26) = 8.14$, $p = .008$, $\eta_{2p} = .238$, jedoch keine Signifikanz für die Art der Lichtexposition.

In Bezug auf die objektive Aufmerksamkeit ergaben die Ergebnisse eine Signifikanz der Interaktion zwischen den Einflussfaktoren der Lichtexposition (rot/blau) und der Zeit, welche in den Gruppen der kürzesten Reaktionszeit $F(1,12) = 6.36$ $p = .027$, $\eta_{2p} = .346$ und der Mittelwerte $F(1, 12) = 5.1$, $p = .043$, $\eta_{2p} = .298$ gemessen wurde. Hierbei fiel jedoch eine große Differenz der Reaktionswerte schon vor Beginn der Exposition auf.

Die Ergebnisse zeigten somit im Rahmen der subjektiven Aufmerksamkeit einen klaren Zusammenhang. Für die objektive Aufmerksamkeit scheinen noch andere Faktoren außer die Lichtexposition bezogen auf die Zeit eine Rolle zu spielen, die es in weiteren Studien zu erforschen gilt. Ziel sollte sein, ein vollständiges Verständnis der Einflussfaktoren zu erreichen, um eine optimale Nutzung von Licht insbesondere in Form durch LED in verschiedenen Bereichen des Lebens gewährleisten zu können.

2. Einleitung

2.1. Vorwort und Zielsetzung

Wie alle Lebewesen ist auch der Mensch ständig verschiedensten Lichtquellen ausgesetzt. Licht wirkt dabei erwiesenermaßen als Regulator verschiedener biologischer Prozesse und beeinflusst damit die Hormonregulation sowie weitere chemische Prozesse^{1,2}. Neben der engen Verknüpfung zwischen Licht mit der inneren Uhr und deren Synchronisation, welche im Fokus früher Studien zur Bedeutung des Lichts standen^{3,4}, wirkt sich Licht ebenso direkt auf die Aufmerksamkeit des Menschen aus^{4,5}. Als Ableitung und Weiterentwicklung der Stressforschung, die eng mit der Forschung der Synchronisation zirkadianer Rhythmik des Menschen verbunden ist, ist die biologische und psychologische Lichtforschung der wissenschaftliche Ausgangspunkt dieser Arbeit.

Aus dem technologischen Fortschritt der Menschheit und der damit verbundenen erhöhten Lichtexposition unterschiedlicher Lichtquellen, geht die Relevanz der Erforschung von den verschiedenen Auswirkungen des Lichts hervor. So sind in der heutigen Zeit ein erheblicher Teil der Bevölkerung Deutschlands und auch anderer Industriestaaten durch ihre Arbeit einem unnatürlichen Tag-Nacht Rhythmus ausgesetzt, was insbesondere für die Schichtarbeit gilt⁶. Eine intensive Forschung zu den neuronalen Verschaltungen im menschlichen Gehirn ermöglichte ein deutlich besseres Verständnis von der Verschaltung und Verarbeitung der Lichtreize im Gehirn. So konnten durch die Entdeckung der intrinsischen, photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGCs) Anfang des 21. Jahrhunderts auch die non-visuellen Funktionen und Wirkungen des Auges erklärt werden⁷. Ebenso konnten durch verschiedene Forschungen, insbesondere durch die Verfügung von bildgebenden Verfahren wie EEG, fMRT und PET, die basalen Strukturen und damit die höheren kognitiven Prozesse, die bei der Verarbeitung von Lichtreizen beteiligt sind, erklärt werden⁸⁻¹⁰.

Diese Zusammenhänge erlaubten erste Ansätze zu Fragen der klinischen Bedeutung von natürlichem und künstlichem Licht, sowohl in der Ätiopathogenese unterschiedlicher Erkrankungen, als auch der therapeutischen Implementation von Lichtquellen. Eine bekannte Anwendung von Licht in der Medizin ist die Behandlung von saisonalen affektiven Störungen mittels Lichttherapie^{11,12}. Darüber hinaus gibt es weitere Ansätze in Abhängigkeit der Art des Lichtes und deren Lichtspektren, die in Kapitel 2.3 erläutert werden.

Gerade für künstliche Lichtquellen wurden Fragestellungen zur Bedeutung in der Arbeitswelt, z.B. in der Schichtarbeit relevant, die auch die technologischen Revolutionen hin zur LED-Welt unserer Tage zu reflektieren hatten. Die LED Technik spielt im Alltag eine immer größere Rolle, da eine Vielzahl technischer Geräte sowie Innen- und Außenbeleuchtungen inzwischen auf

dieser Technik beruhen^{13,14}. Da auch in Zukunft die LED-Technik eine Schlüsseltechnik sein wird, stellt sie einen Forschungsbereich dar, der weiter intensiv erforscht werden sollte. In diesem Zusammenhang ist es von wissenschaftlicher Bedeutung, Daten aus standardisierten Studien zu gewinnen, um den Nutzen, aber auch die Risiken der Leuchtmittel abschätzen zu können. Dadurch kann Licht als therapeutisches Medium in neuen Behandlungsformen eingesetzt und negative Folgen von Lichteinflüssen abgemildert werden. Erste Erkenntnisse aus dieser Forschung wurden bereits in den Alltag implementiert¹⁵. So gibt es in vielen Smartphones durch den Blaufilter die Möglichkeit, am Abend die wachheitsfördernde Wirkung von blauen kurwelligem Licht zu mildern^{16,17}. Des Weiteren gibt es wissenschaftliche Lichtkonzepte für Innenbeleuchtungen, die unter anderem in Einrichtungen mit Schichtarbeit wie Krankenhäusern positive Wirkungen auf die Aufmerksamkeit und den zirkadianen Rhythmus haben können^{18,19}.

Die hier durchgeführte Studie ist Teil des übergeordneten Projektes zur „bundesweiten Steigerung von Gesundheit, Leistungsfähigkeit und Wohlbefinden durch geeignete spektrale, zeitliche und räumliche Lichtverteilungen (NiViL)“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Sie soll durch ein standardisiertes Setting den Einfluss verschiedener Lichtspektren auf die Aufmerksamkeit genauer untersuchen.

2.2. Anatomischer Aufbau des Auges

2.2.1. Das visuelle System

Das Sehen, als eines der fünf zentralen Sinne des Menschen, ist für die Wachheit und damit verbundene Aufmerksamkeit von großer Bedeutung. Denn Licht beeinflusst über verschiedene Verschaltungswege direkt den menschlichen zirkadianen Rhythmus und damit auch die Wachheit.

Die eintreffenden Lichtstrahlen werden dabei im menschlichen Auge durch die Netzhaut registriert, anschließend in elektrische Reize umgewandelt und über die Sehbahn an zentrale Regionen im Gehirn weitergeleitet. Dort werden die Informationen in spezifischen Bereichen weiterverarbeitet, wie dem primären visuellen Kortex und den sekundären visuellen Kortex Arealen.

Die Weiterleitung entlang der Sehbahn folgt festen anatomischen Strukturen (siehe Abbildung 1: Sehbahn). Die Weiterleitung der aktuellen Lichtverhältnisse verläuft abgehend von der Retina in Form des Nervus Opticus zum Chiasma Opticus. Dort kreuzen sich die Sehnerven der beiden Augen. Sie verlaufen anschließend als Traktus Opticus in das Corpus Geniculatum Laterale, welches einen Teilbereich des Thalamus im Zwischenhirn bildet. Hier enden die Fasern des Nervus Opticus und werden mit Neuronen verschaltet, die zur primären Sehrinde (Area striata) ziehen. Dieser Bereich wird dem genikulären System zugeschrieben. Dorthin verlaufende Nervenfasern sind verantwortlich für das bewusste Wahrnehmen des Sehens. Ein kleinerer Teil der Fasern endet nicht in der Area Striata, sondern wird in anderen anatomischen Regionen verschaltet. Die Fasern bilden den Teil des nicht-genikulären Systems und sind für andere Funktionen wichtig. So ziehen einige Nerven in die Area pretectalis und sind für den Akkommodationsreflex verantwortlich. Ein anderer kleiner Teil verläuft in den Nucleus suprachiasmaticus, welcher für die Schrittmacherfunktion der zirkadianen Rhythmik zuständig ist, der später noch genauer beleuchtet wird.

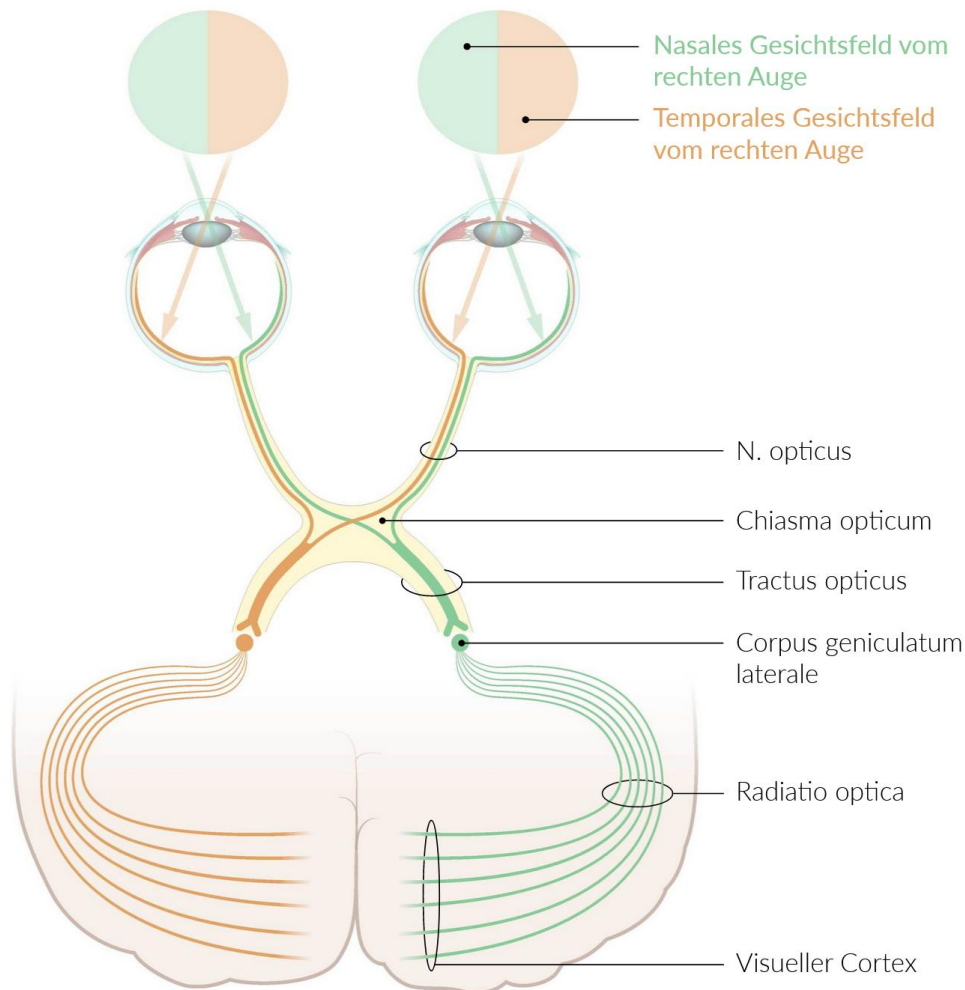


Abbildung 1: Sehbahn¹

2.2.2. Anatomie des Auges

Für die Sinnesfunktion des Sehens ist das Auge das zentrale Organ und dient der Lichtaufnahme und Weiterleitung an höhere Strukturen des Gehirns. Die Abbildung 2 verdeutlicht den Aufbau des menschlichen Auges und dient dem besseren Verständnis.

Der Augapfel (Bulbus oculi) die zentrale Struktur des Auges und ist von der knöchernen Orbita umgeben. Er besitzt eine annähernd runde Form und beinhaltet alle wichtigen Strukturen für die Funktionen des Auges.

Am vorderen Pol des Auges liegt die lichtdurchlässige Hornhaut (Cornea), die zentral für die Lichtbrechung der eintreffenden Lichtstrahlen ist. Die Hornhaut geht im Verlauf in den

¹Quelle: Amboss GmbH, <https://next.amboss.com/de/search?q=sehbahn&v=overview&m=DrY1jq>, entnommen am 02.12.2022

lichtundurchlässigen Teil, die Lederhaut (Sklera) über, die sich einmal um den Bulbus oculi als äußere Schicht legt.

Die Hornhaut ist die erste Struktur, auf die einfallenden Lichtstrahlen treffen. Sie fungiert dabei als stärkste lichtbrechende Sammellinse im Auge, indem sie das Licht bündelt und auf die Retina lenkt. Hinter der Hornhaut befindet sich die Uvea. Sie liegt unterhalb der Sklera und teilt sich am vorderen Pol in die Regenbogenhaut (Iris), den Ziliarkörper und im hinteren Teil in die Aderhaut (Choroidea) auf. Die Iris besitzt eine zentrale Öffnung in ihrer Mitte, welche Pupille genannt wird und ist für die Regulierung des Lichteinfalls zuständig. In der Iris verlaufen zwei Muskeln, die den Lichteinfall regulieren. Der um die Pupille innen liegende Muskel M. spincter pupillae verkleinert durch Kontraktion die Pupille und damit den Lichteinfall (Miosis). Der am äußeren Rand gelegene Muskel in der Iris, der M. dilatator pupillae, vergrößert hingegen bei Kontraktion die Pupille (Mydriasis) und fungiert damit als Gegenspieler zum M. spincter pupillae. Der Ziliarkörper ist für die Aufhängung und Stabilisation der Linse zuständig und reguliert mit dem M. ciliaris durch die Zonulafasern die Krümmung der Linse. Kontrahiert der Muskel, erschlaffen die Zonulafasern und die Linse krümmt sich aufgrund ihrer Eigenelastizität und ermöglicht so die Akkommodation. Die Choroidea befindet sich zwischen der Sklera und der Retina in den hinteren zwei Dritteln des Bulbus oculi. Sie ist stark vaskularisiert und versorgt als Hauptfunktion die äußeren Netzhautschichten und ist gleichzeitig für die Regulierung der Temperatur mit verantwortlich.

Die Linse befindet sich im zentralen Teil des Auges dorsal an die Pupille der Iris anliegend. Durch ihre bikonvexe Form ist sie auch als Sammellinse für die Lichtbrechung verantwortlich und über ihre Krümmung durch den M. ciliaris an der Akkommodation beteiligt.

Das Innere des Auges wird in drei funktionelle Bereiche unterteilt. Die vordere Augenkammer befindet sich hinter der Cornea und vor der Iris. In ihr fließt das Kammerwasser durch den Schlemm-Kanal ab. Gebildet wird das Kammerwasser durch den Ziliarkörper, welcher die hintere Augenkammer lateral begrenzt. Nach vorne wird die Augenkammer durch die Iris begrenzt und nach dorsal durch die lateralen Anteile der Linse und des Glaskörpers.

Der Glaskörper (Corpus vitreum) ist die größte Struktur im Auge. Er befindet sich dorsal der Linse und füllt mit seiner gallertartigen Konsistenz den größten Teil des Augapfels aus. Er übt durch seine Größe Druck auf die umliegenden Strukturen aus und wirkt dadurch stabilisierend.

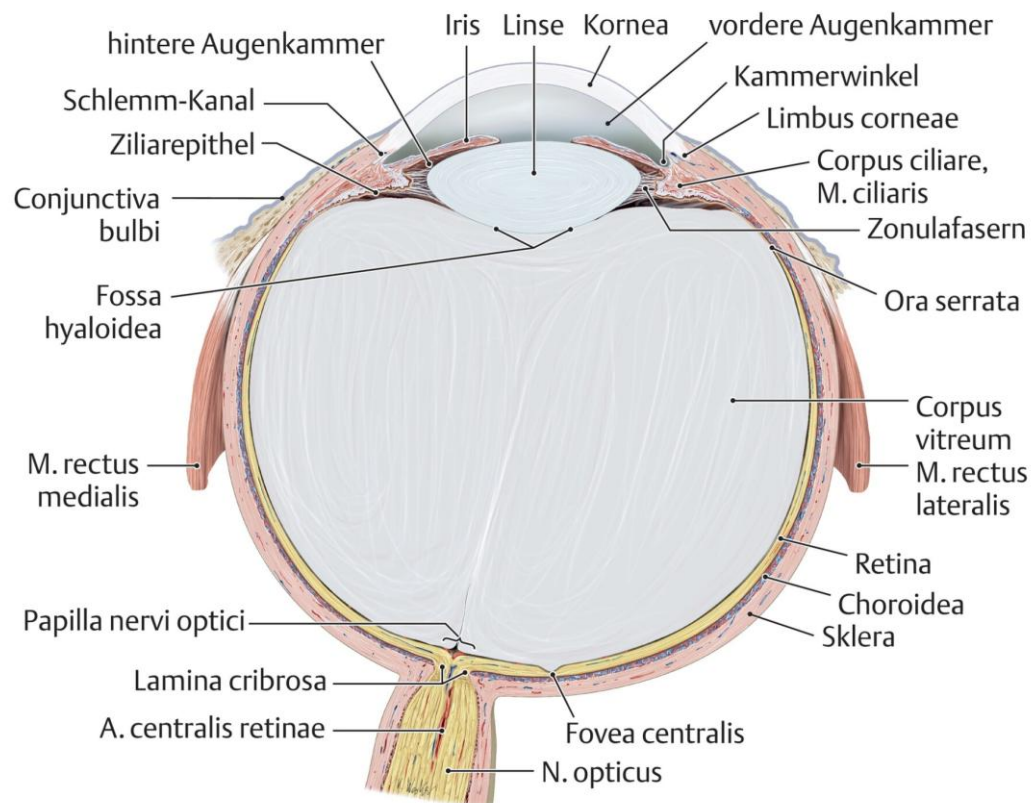


Abbildung 2: Das menschliche Auge²

2.3. Lichtverarbeitung am Auge

2.3.1. Signalverarbeitung in der Retina

Einfallendes Licht wird im Auge durch die Cornea und die Linse so gebrochen, dass es optimal auf die Retina fällt. Die Retina ist als Ausstülpung Teil des Zwischenhirns und enthält bis zu 60 verschiedene Zelltypen. Sie teilt sich auf in einen lichtempfindlichen Teil (Pars optica) und einen lichtunempfindlichen Teil (Pars caeca) auf. Der Aufbau der Pars optica der Retina ist dabei invers zum Lichteinfall, das heißt, die Lichtstrahlen müssen zuerst durch die Retina hindurch bis zur Epithelschicht, wo sie zunächst in elektrische und anschließend in chemische Reize umgewandelt werden. Die Abbildung 3: Retinale Signalwege (ON- OFF-Wege) veranschaulicht den differenzierten Schichtaufbau der Retina.

² Quelle: Georg Thieme Verlag KG, Duale Reihe Physiologie, Frings S, Müller F, Visuelles System, 2021 20. Frings S, Müller F. Visuelles System. In: Behrends J, Bischofberger J, Deutzmann R, et al., eds. Duale Reihe Physiologie. 4., unveränderte Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2021.

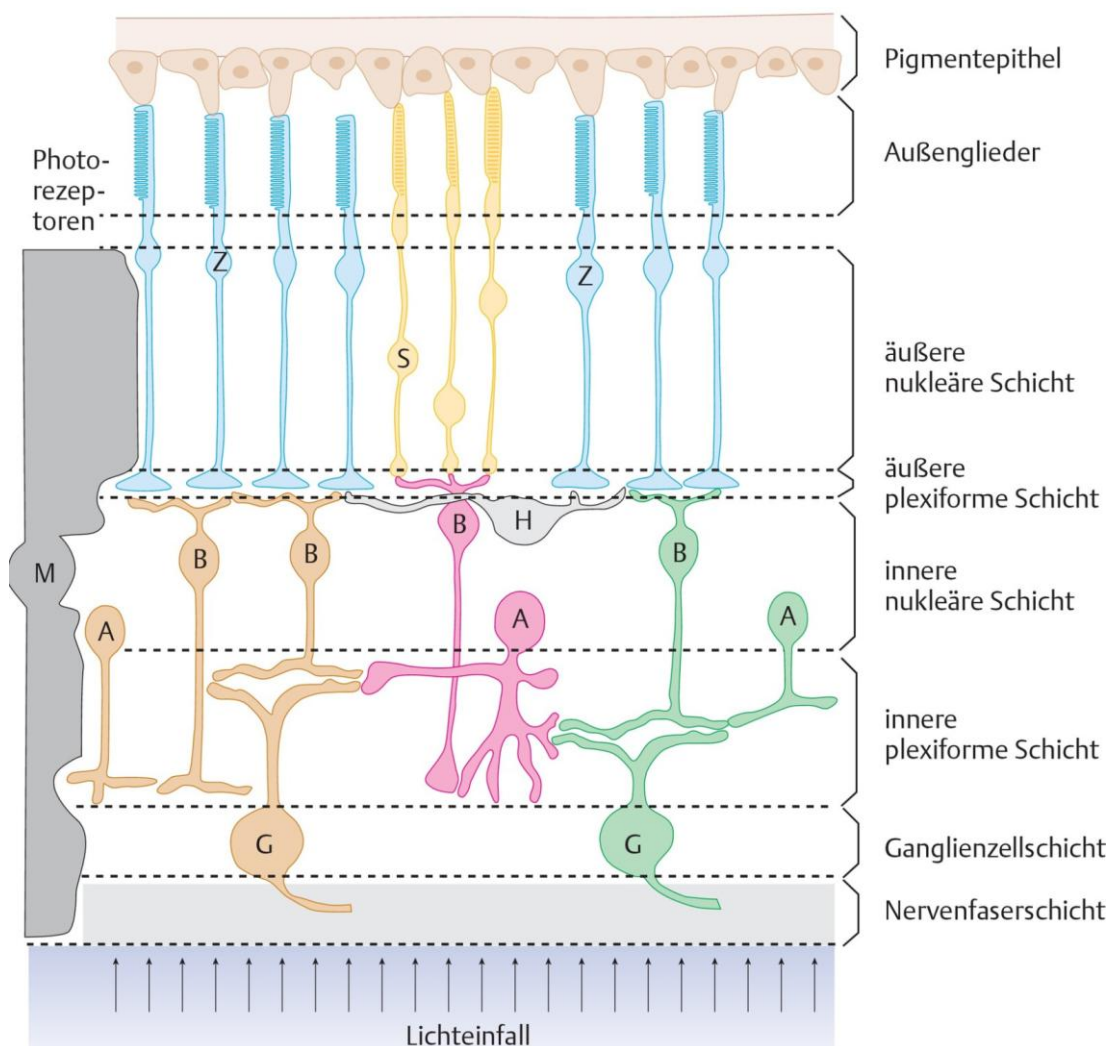


Abbildung 3: Retinale Signalwege (ON- OFF-Wege)³

A = Amakrinzelle, B = Bipolarzelle, G = Ganglienzelle, H = Horizontalzelle, M = Müllerzelle, S = Stäbchen, Z = Zapfen

Die Netzhaut beinhaltet die ersten drei Neuronen der Sehbahn. Das erste Neuron befindet sich in den Photorezeptoren, die dem Pigmentepithel angelagert sind. Von dort werden die Reize an die bipolaren Zellen weitergegeben, die als Zwischenneuronen fungieren. Diese geben die Impulse an die dritten Neuronen der Ganglienzellen weiter, die die Information aus der Netzhaut gebündelt als N. opticus an das vierte Neuron weiterleiten, welches sich im Corpum geniculatum laterale befindet (siehe 2.3.2). Die Neurone zur Weiterleitung der Signale verlaufen dabei stets vertikal in der Netzhaut. Daneben gibt es aber auch horizontal verlaufende Zellen. Diese verschalten die vertikalen Zellen (Photorezeptoren und

³ Quelle: Georg Thieme Verlag KG, Duale Reihe Physiologie, Frings S, Müller F, Visuelles System, 2021 20. Ibid.

Ganglienzellen) miteinander. Ein Beispiel hierfür sind die Amakrinzellen. So werden die Informationen bei der Signalverarbeitung moduliert und zusammengefasst²¹.

Die Photorezeptoren bestehen aus zwei Hauptgruppen, den Stäbchen und den Zapfen. Die Zapfen sind mit einer Anzahl von ca. 6-7 Millionen deutlich weniger vertreten als die Stäbchen. Sie sind für das photopische Sehen wichtig, da sie differenziert farbsensibel sind bei gleichzeitiger nicht sehr hoher Lichtempfindlichkeit. Die Zapfen weisen die drei Farbtypen rot, grün und blau auf mit einer differenzierten Empfindlichkeit im Spektralbereich für Blauzapfen bei 420nm, für Grünzapfen bei ca. 535nm und für Rotzapfen bei ca. 565nm. Diese Spezifität der Zapfen auf bestimmte Wellenlängen beruht auf der Sensibilität des Sehfärbstoffes der Zapfen-Opsinen, auch Iodopsine genannt, die sich je nach Farbe (blau, grün, rot) leicht unterscheiden^{20,22}.

Die Zapfen befinden sich auf der Retina besonders in der Fovea Centralis, dem Punkt des schärfsten Sehens im Auge. Er liegt in der Macula Lutea, dem gelben Fleck, zentriert in der Sehachse des Augapfels. Die Verschaltung der Zapfen auf die Ganglien- und Bipolarzellen liegt hier im 1:1 Verhältnis. So findet keine Des Weiteren sind alle nicht benötigten Schichten der Retina an den Rand der Fovea Centralis lateralisiert, sodass es an den Zapfen zu keiner Signalabschwächung durch Streuung und damit zu einer Signalkonvergenz kommt.

Die Stäbchen stellen mit einer Anzahl von ca. 110-120 Millionen den größten Anteil der Photorezeptoren dar. Sie sind besonders lichtintensiv und für das skotopische Sehen, dem Dämmerungs- und Nachtsehen, von Bedeutung. Gleichzeitig besitzen sie aber ein geringeres Auflösungsvermögen. Sie haben ihre höchste Dichte in der parafovealen Zone und kommen nicht in der Fovea centralis vor. Der Farbsehstoff der Stäbchen ist dabei Rhodopsin, welcher ein Absorptionsmaximum bei ca. 500 nm, welches sich im Farbspektrum zwischen den Farben Blau und Grün befindet²⁰.

Außerhalb der Fovea Centralis gibt es für die ca. 110-120 Millionen Stäbchen nur ca. eine Millionen Ganglienzellen für die weitere neuronale Verschaltung. Aus diesem Grund werden die Informationen von mehreren Zapfen Photorezeptorzellen über wenige Bipolarzellen auf eine einzelne Ganglienzelle verschaltet. Dadurch erhält eine Ganglienzelle Informationen für ein bestimmtes Netzhautareal, was als Signalkonvergenz bezeichnet wird²².

2.3.2. Verarbeitung und Weiterleitung des Lichtreizes

Sowohl die Zapfen als auch die Stäbchen sind im Ruhezustand bereits stark depolarisiert. Trifft nun Licht auf die Photorezeptoren, werden beim Rodopsin (Stäbchen) bzw. bei den Iodopsinen (Zapfen) das 11-cis-Retinal in all-trans-Retinal umgewandelt und so die Sehpigmente aktiviert. Dies bewirkt über eine Reaktionskaskade einen Verschluss der

spannungsabhängigen Kanäle, was zu einer Hyperpolarisation der Zelle führt. Daraus folgt am Ende ein Aktionspotenzial der Zelle, die das Membranpotenzial der Bipolarzelle verändert und eine Depolarisation bewirkt. Dadurch wird die Information weitergegeben.

Die Ganglienzellen erhalten von vielen Photorezeptorzellen über die Zwischenschaltung der Bipolarzellen elektrische Signale. Diese Überleitung von Informationen von ca. 110-120 Millionen Zellen auf ca. eine Millionen Zellen wird Konvergenz genannt. Sie dient einerseits der Reduktion der Menge an Informationen, andererseits der Sehschärfe, der höheren Empfindlichkeit und der Spezifität. Ermöglicht wird dies durch die Strukturierung der Photorezeptorzellen mittels rezeptiven Feldern. Dabei ist einer Ganglienzelle ein bestimmtes Feld mit dazugehörigen Photorezeptorzellen zugeordnet. Sowohl Ganglienzellen als auch die Bipolarzellen werden dabei in ON- oder OFF-Zentrum-Zellen eingeteilt. Eine OFF-Ganglienzelle besitzt in ihrem Zentrum Photorezeptorzellen, die bei zentralem Lichteinfall mit einer Hypopolarisation und damit verbundener verminderter AP-Frequenz reagiert (sog. OFF-Modus). Trifft Licht nur auf die Peripherie des rezeptiven Feldes kommt es zu einer Depolarisation und die AP Frequenz wird erhöht (sog. ON-Modus). Bei ON-Zentrum Zellen ist der Mechanismus entsprechend umgekehrt^{23,24}.

Die Ganglienzellen lassen sich in der Retina entsprechend ihrer Aufgaben verschiedenen Typen bzw. Systemen zuordnen. Den größten Teil der Zellen bildet mit ca. 80% das sog. parvozelluläres System (P-System). Diese Zellen besitzen kleine rezeptive Felder, sind mit unterschiedlichen Zapfentypen verschaltet und dienen vor allem dem Farb- und Formsehen (v.a. rot/grün). Mit ca 10% der Ganglienzellen bilden die magnozellulären Zellen ein deutlich kleineres System. Sie bekommen Informationen sowohl von Stäbchenzellen als auch von allen Zapfentypen und sind vor allem für die Form- und Entfernungserkennung zuständig²⁰. Neben dem P- und M-System gibt es noch das K-System. Es beinhaltet die koniozellulären Ganglienzellen. Sie sind sensibel für die Farben Gelb und Blau und damit für das Farbsehen mitverantwortlich²⁴. Eine besondere Gruppe der Ganglienzellen bilden die intrinsischen photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC), die im folgenden Kapitel genauer erläutert werden (siehe 2.3.4).

Nach der Umschaltung der Bipolarzellen auf die Ganglienzellen verlassen die erstmals generierten Aktionspotentiale (AP) über die efferenten Axone gebündelt zusammen als N. opticus an der Papilla nervi optici das Auge und ziehen als Sehbahn zu den optisch verarbeitenden Strukturen im Gehirn. Von beiden Augen zieht der N. Opticus zum Chiasma Opticum, welches sich direkt unter der Hypophyse befindet. Dort kreuzen die nasalen Anteile der Retinabereiche, während die temporalen Retinabereiche ohne Kreuzung weiterlaufen. Sie verlaufen weiter als Tractus opticus für die weitere Verarbeitung zu weiteren nachgeschalteten Strukturen im Gehirn (siehe 2.3.3) ²⁰.

2.3.3. Verarbeitung in den neuronalen Zentren

Ausgehend von Chiasma Opticum verlaufen im Tractus Opticus alle Axone der verschiedenen Ganglienzellen vom Auge kommend. Diese ziehen jedoch anschließend zu unterschiedlichen Kernen und Zielgebieten im Gehirn. Es lassen sich dabei zwei Verschaltungswege differenzieren, der visuelle (genikuläre) Weg und der nichtvisuelle (nichtgenikuläre) Weg.

Der visuelle Verschaltungsweg dient der bewussten Verschaltung (siehe Abbildung 1: Sehbahn). Zentral ist hier im Unterschied zum nichtvisuellen System die Verschaltung im linken und rechten Thalamus, genauer im Corpus geniculatum laterale des Thalamus. Der Großteil der Nerven aus dem Tractus opticus (ca. 90%) zieht zu diesen Kernen. Diese Struktur wird im Zusammenhang des visuellen Systems auch als primäres Sehzentrum bezeichnet und bildet das 4. Neuron. Nach deren Umschaltung verläuft ein kleiner Teil der Axone (ca. 10% der Nervenfasern) zu Kernen (Nuclei pretectalis und Colliculi superiores), die für die Fokussierung und Bewegung der Augen zuständig sind und die die lichtinduzierten Körperbewegungen in den Basalganglien kontrollieren. Der überwiegende Teil (ca. 90%) verläuft weiter in Form der Sehstrahlung (Radiatio Optica) breit aufgefächert zur primären Sehrinde in der Area striata am Okzipitalpol. Die Informationen sind dabei retinotrop dargestellt. Nach deren Verschaltung in der primären Sehrinde verlaufen deren Axone weiter zu den sekundären Kortexarealen, die sich in mehreren Bereichen wie dem Temporal-, Okzipital- und dem Parietallappen befinden^{25,26}.

Den zweiten Verschaltungsweg bildet der nicht genikuläre bzw. nichtvisuelle Weg. Er läuft unbewusst ab. Diese Axone des Tractus opticus stellen den deutlich kleineren Teil (ca. 10%) dar und ziehen zu verschiedenen Kernen, die mit Vorgängen in Verbindung stehen, die unbewusst ablaufen. Diese Wege werden im Folgenden beschrieben und sind in Abbildung 4: nicht genikulärer Teil der Sehbahn“ zur besseren Übersicht grafisch dargestellt²⁵.

Einige Nervenfasern ziehen zu der Area pretectalis. Dort sind sie - zusammengefasst im retinopretectalem System - für die Akkommodations- und Pupillenreflexe verantwortlich. Weitere Axone tragen Bewegungsinformationen zum retinotektalen System bei, welches für die Fixierung des Bildes bei bewegten Objekten durch unbewusste Kopf- und Augenbewegungen wichtig ist. Diese Axone ziehen zum Culliculus superior und werden dort umgeschaltet.

Des Weiteren ziehen Axone zu den Nuclei terminales und den Nuclei vestibularis. Sie sind für den optokinetischen Nystagmus zuständig und gehören zum optischen akzessorischen System.

Weitere Axone ziehen zum Nucleus suprachiasmaticus (SCN) im Hypothalamus und dienen der Beeinflussung der zirkadianen Rhythmik^{27,28}.

Ebenso wird das Pulvinar thalamie für die Okulomotorik als visueller Assoziationsreflex angesteuert sowie der Nucleus parvocellularis in der Formatio reticularis für die Weckfunktion.

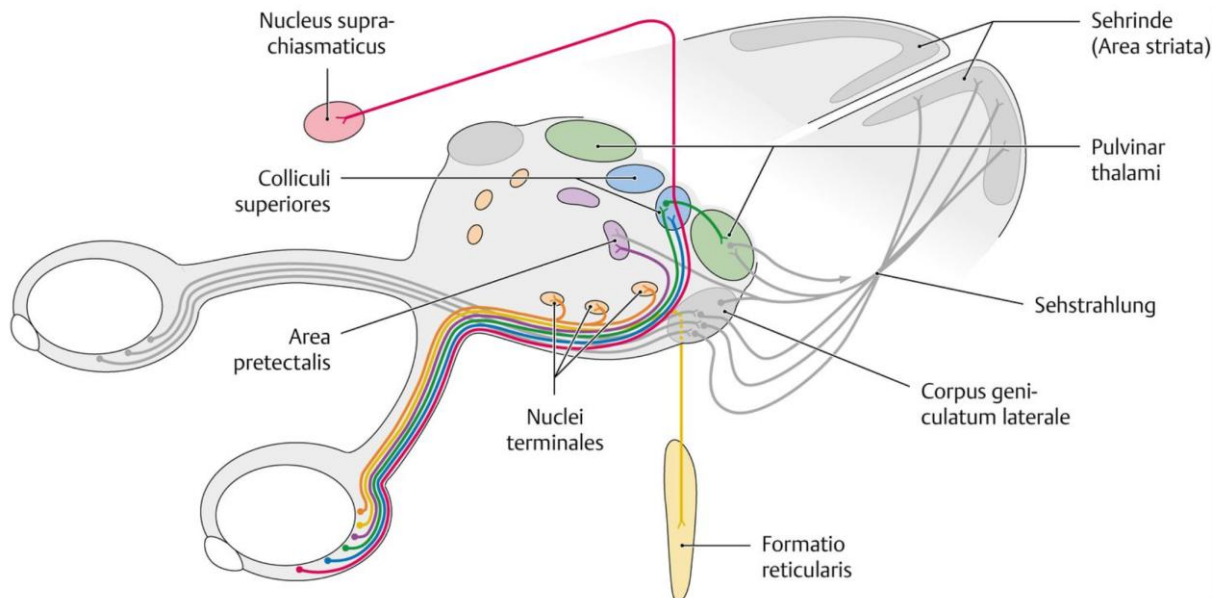


Abbildung 4: nicht genikulärer Teil der Sehbahn⁴

2.3.4. Fotosensitive retinale Ganglienzellen

Eine neu erforschte Gruppe der Ganglienzellen stellen die intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC) dar^{7,29}, von denen es mindestens fünf Subtypen gibt^{30,31}. Diese Zellen besitzen das Photopigment Melanopsin und steuern mit ihren Axonen über den Tractus retinohypothalamicus sowohl den SCN im Hypothalamus, als auch die prätektale Region an^{32,33}. Nach der Entdeckung der ipRGC wurde intensiv über deren Eigenschaften geforscht. Es konnte gezeigt werden, dass ihre Aufgabe, anders als das Farbsehen der Stäbchen und Zäpfchen, die Wahrnehmung der Helligkeit in der Umgebung ist³⁴.

Die ipRGC sind dabei mit den Stäbchen und Zäpfchen indirekt über amakrine Zellen verbunden. Dabei lässt sich vor allem beim Zusammenspiel vom indirekten Input der Stäbchen

⁴ Entnommen aus: 25. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH. 13. Funktionelle Systeme und klinische Bezüge. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH, eds. Prometheus LernAtlas - Kopf, Hals und Neuroanatomie. 4. Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2015.

und Zäpfchen und dem direkten Input der ipGRC mittels Melanopsin eine vollständige Polarisation beobachten ³⁵⁻³⁷.

Wenn Licht auf die Retina trifft, bewirkt es bei den ipRGC Zellen (On-Zellen) eine Ausschüttung von Melanopsin. Bei Dunkelheit ist die Ausschüttung demnach gehemmt ²⁶. Zusätzlich zu der Besonderheit des unterschiedlichen Sehpigments gegenüber den anderen Photorezeptoren ist die Antwort der Retina zudem zeitlich deutlich verzögert (10 bis 100fach verlängert) gegenüber der Antwortgeschwindigkeit von Stäbchen und Zäpfchen. Der SCN, wohin ein Großteil der Reize weitergeleitet wird, wird als zentraler Ort bei der Steuerung und dem Entrainments (Synchronisation) des zirkadianen Rhythmus angesehen und ist mit anderen Kernen wie dem Nucleus paraventricularis (NPV) und dem Nucleus dorsomedialis des Hypothalamus verschaltet ³⁸. Die ipRGC stellen somit einen Teil des non-visuellen Weges bei der Verschaltung der Lichtreize dar.

Vanderwall et al. konnten nachweisen, dass Licht die kortikale Aktivität in den Netzwerken beeinflusst, die an den fortlaufenden nicht-visuellen kognitiven Prozessen beteiligt sind. Sie untersuchten dafür die Aktivität der beteiligten subkortikalen Strukturen, die für die Wachsamkeit zuständig sind, wenn sie durch Lichtreize stimuliert wurden, und fanden heraus, dass diese dynamisch moduliert werden können ³⁹.

Neben den fünf entdeckten Subtypen der ipRGC ³¹ und mindestens drei funktionellen Untergruppen ⁴⁰ konnte die höchste Sensitivität der Zellen für eintreffende Lichtwellen mit ca. 455-485 nm bestimmt werden ⁴¹⁻⁴⁴. Damit reagieren die Zellen auf blaues Licht sehr empfindlich, was sein Spektrum bei etwa 420 bis 490 nm hat ⁴⁵.

Daraufhin wurde der Einfluss von blauem Licht auf diese Ganglienzellen genauer untersucht. In verschiedenen Studien mit unterschiedlicher Lichtexpositionsdauer von blauem kurzwelligem Licht, im Vergleich zu weißem polychromatischem Licht, konnte belegt werden, dass bei blauem Licht die Effekte am größten sind ⁴⁶. Blaues Licht hatte dabei, bedingt durch die Verschaltung der ipRGC (s.o.), Auswirkung auf den zirkadianen Rhythmus, Melatonin, Körpertemperatur und die Wachsamkeit ^{4,44,47,48}.

2.4. Kognitionspsychologische Grundlagen

Der Begriff der Kognition wird in der Psychologie auf sehr unterschiedliche Weise definiert. Einerseits wird der Begriff der Kognition operationalisiert und enger gefasst, zum anderen werden darunter all jene komplexen Prozesse verstanden, die das Denken und die Problemlösung steuern. Zudem unterscheidet die Kognitionspsychologie zwischen „höheren Prozessen“ und „niederen Prozessen“, wobei letztere bei der Steuerung von Bewegungsabläufen oder der Sensorik mit beteiligt sind ⁴⁹.

Höhere kognitive Prozesse werden in der Regel bewusst erlebt, hingegen bleiben niedere Prozesse häufig im Unbewussten ⁵⁰. Die modernen Neurowissenschaftler*innen haben diese Sichtweise jedoch erschüttert: So konnte in einigen Studien bewiesen werden, dass auch höhere kognitive Prozesse unbewusst ablaufen können und niedere und vermeintlich einfache psychische Prozesse wie die Steuerung der Bewegungsabläufe komplexe Verarbeitungsleistungen benötigen ^{51,52}.

Unter einer anderen Perspektive fungiert Kognition als Vermittler zwischen einem Reiz als Input und einer Reaktion als Output. Bei dieser Betrachtungsweise imponiert Kognition als das Ergebnis jener Prozesse, die den Reiz Interpretieren, mit eigenen Erfahrungen abgleichen und daraufhin die Auswahl der Reaktion dementsprechend eingrenzen ⁵³.

Aus dieser kognitionspsychologischen Sichtweise, ist es folgerichtig, dass zwei Individuen bei einem objektiv gleichen äußeren Reiz unterschiedliche Reaktionen zeigen, allein weil sie die identische Information unterschiedlich kognitiv verarbeiten. Diese Zwischenschaltung von kognitiven Prozessen erweitert das klassische Modell des Behaviorismus in entscheidender Weise und verlässt mechanistische Anschauungen einer schematischen Reiz-Reaktion Abfolge.

Aus der Sicht der Kognitionswissenschaft wird Kognition reduziert auf spezifische Prozesse der Informationsverarbeitung dargestellt, womit sich ein Anschluss an die Informatik und das Forschungsfeld zur künstlichen Intelligenz ergab ⁵⁴.

Heutzutage ist die Kognitionsforschung ein großes interdisziplinäres Feld aus den Bereichen der Neurowissenschaft, der Linguistik, der kognitiven Psychologie, der Informatik bzw. der künstlichen Intelligenz und der Philosophie ⁵³. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden die wichtigsten Funktionsbereiche kognitiver Prozesse entsprechend ihrer zunehmenden Komplexität vorgestellt und erläutert.

2.4.1. Vigilanz

Die Vigilanz beschreibt die ungerichtete Aufmerksamkeit. Anders als die gerichtete Aufmerksamkeit fokussiert sie nicht auf bestimmte Reize. Vigilanz beschreibt vielmehr einen Zustand der passiven Wachheit, aus der heraus man jederzeit in einen Zustand der aktiven Aufmerksamkeit bei eintreffenden Reizen wechseln kann ^{55,56}. Dieser passive Wachheitszustand kann dadurch, anders als bei der gerichteten Aufmerksamkeit, deutlich länger aufrecht gehalten werden. Im Zustand der Vigilanz werden die eintreffenden Reize nicht nach ihrer Relevanz priorisiert.

2.4.2. Bewusstsein

In der modernen Neurowissenschaft geht man heute von einem zweigeteilten Bewusstsein bzw. einer Parallelverarbeitung aus. Diese unterteilt sich in den bewussten und in den unbewussten Teil. Der Teil, den wir bei der dauerhaften Aufnahme und Verarbeitung von Informationen wahrnehmen und somit als bewusst erleben, ist nur ein kleiner Teil. Wie klinische Studien vermuten lassen findet parallel zur bewussten Informationsverarbeitung unterhalb ihrer Oberfläche die unbewusste Informationsverarbeitung in mehreren Ebenen statt⁵⁷⁻⁵⁹. Dabei scheint die Informationsverarbeitung automatisch unterhalb der Oberfläche des Bewusstseins abzulaufen.

In Versuchen konnte ebenfalls gezeigt werden, dass bei der Entscheidung, den Arm zu bewegen, vor der willentlichen Entscheidung die Aktivität des Gehirns sprunghaft zunimmt, was die These bestärkt^{60,61}. Dieses Bereitschaftspotential spiegelt die unbewusste Informationsverarbeitung wider und ist ein Beleg dafür, dass Entscheidungen bereits vor der bewussten Handlung gefällt werden. Aus diesem Grund konnten Forscher mit einer Wahrscheinlichkeit von 60 Prozent vorhersagen ob ein Proband einen Knopf mit der rechten oder der linken Hand drücken wird ⁶².

2.4.3. Gerichtete Aufmerksamkeit

Bewusste und unbewusste Prozesse sind gleichermaßen notwendig und laufen parallel ab. Die Informationen können dabei auf verschiedene Arten vom Unbewussten in unser Bewusstsein treten.

Hierbei spielt die gerichtete Aufmerksamkeit eine zentrale Rolle. Entweder gelangt die Information durch einen direkten hervortretenden Reiz, der die Aufmerksamkeit auf sich lenkt,

in unser Bewusstsein (salient) oder aber durch die Selektion der Informationen der gerichteten Aufmerksamkeit.

Um Dinge bewusst wahrzunehmen, bedarf es eines bestimmten Grades an Wachheit. Damit dieser Zustand erreicht wird, sind im Gehirn verschiedenste Hirnsysteme, Module genannt, zusammengeschaltet und vernetzt, die im ganzen Gehirn verteilt sind ⁶³. Erst wenn diese Systeme synchronisiert als Einheit aktiv sind, erleben wir Bewusstsein. Dabei spielt eine großflächige Aktivierung des Neokortex eine zentrale Rolle. Sind die kortikalen Erregungsverbände der einzelnen Module nur lokal aktiviert und unterhalb eines bestimmten Aktivierungspotentials, reicht dies nicht aus, um die anderen Module zu aktivieren und sich zu synchronisieren, um damit Ereignisse bewusst hervorzubringen. Erst wenn die Erregungsverbände oberhalb des Aktivierungspotentials oder über einen längeren Zeitraum feuern, entsteht eine kreisende Erregung (Re-Entry) zwischen den einzelnen Modulen und damit Bewusstsein.

Bewusstsein und Aufmerksamkeit sind dabei eng miteinander verbunden und für beide spielt das aufsteigende retikuläre Aktivierungssystem (ARAS) eine bedeutende Rolle²⁶. Dieses Nervenkerne-System befindet sich im Hirnstamm, welches vom Mesenzephalon und der Brücke bis zum Nucleus Reticularis des Thalamus zieht. Damit verbindet es den Hirnstamm mit dem Kortex über bestimmte Kerne des Thalamus ⁶⁴.

Im Wachheitszustand ist das ARAS-System permanent aktiviert. Dabei generieren die Hirnstammneuronen Aktionspotentiale, die über verschiedene Neurotransmitter die Thalamusneurone depolarisieren, wodurch diese ebenfalls Aktionspotentiale generieren ⁶⁵. Ermöglicht wird das durch eine Übertragung der ankommenden afferenten Sinnessignale aus der Peripherie an den zerebralen Kortex. Im Mittelpunkt steht dabei die *Formatio reticularis*, ein netzartiges Nervengeflecht, dass durch das Hinterstammsegmentum zieht ⁶⁶. Dies geschieht in proportional geänderten Aktionspotentialfrequenzen. Sichtbar wird dies durch das typische EEG Muster mit Wellen hoher Frequenz und niedriger Amplitude⁶⁷. Durch die aufsteigenden Äste der *Formatio reticularis* innerviert sie insbesondere den Nucleus reticularis im Thalamus. Dieser Kern steuert zentral das Ruhepotenzial der aufsteigenden Fasern, welche den Thalamus mit dem Kortex verbinden, als Thalamo-kortikales Netzwerk ⁶⁸. Ist der Mensch bei Bewusstsein, werden die inhibitorischen Neuronen des Nucleus reticularis gehemmt und so die Aktivierung der thalamo-kortikalen Achse ermöglicht ²⁶. Neben dieser Funktion der Herstellung von tonischer Aufmerksamkeit, wird dem Nucleus reticularis auch noch eine Funktion bei der selektiven Aktivierung thalamo-kortikaler Bahnen zugerechnet. Somit ist er auch bei der gerichteten Aufmerksamkeit von zentraler Bedeutung ⁶⁶. Hinzu kommen die Verschaltungen im Nucleus pedunculopontinus von afferenten sensibel-sensorischen Reizen aus den Hirnnervenkernen und des Rückenmarks, die ebenfalls Einfluss auf die selektive Aufmerksamkeit haben ⁶⁶. Hinsichtlich der selektiven, respektive gerichteten

Aufmerksamkeit gibt es unterschiedliche wissenschaftliche Ansichten. Die gängige Ansicht teilt die Aufmerksamkeit in zwei Komponenten ⁶⁹. Demnach gliedert sie sich in die zielgesteuerte und reizinduzierte Aufmerksamkeit. Die zielgesteuerte Aufmerksamkeit beschreibt die bewusste Ausrichtung auf Objekte, die auf Grund der eigenen Ziele interessant sind. Sie ist also eine willentliche Handlung. Die reizinduzierte Aufmerksamkeit hingegen läuft unwillentlich ab. So erlangen Objekte durch bestimmte Merkmale die Aufmerksamkeit, die unabhängig von den eigenen Zielen sind.

Des Weiteren wird die selektive als auch die unbewusste automatisierte Aufmerksamkeit durch das limitierte Kapazitätskontrollsystem (LCCS) gesteuert. Dieses Kontrollsystem ist ebenfalls ein Geflecht aus Nervenknoten, welche sich vorwiegend im präfrontalen Kortex, dem parietalen Kortex und speziell im Striatum befinden, welches in den Basalganglien liegt ²⁶. Darüber hinaus besitzt auch dieses System Verbindungen zum Nucleus reticularis des Thalamus, wodurch eine gezielte Selektion von motorischen und sensorischen ankommenden Informationen möglich wird.

2.4.4. Selektive Aufmerksamkeit

Unser menschliches Gehirn schafft es nicht, permanent alle eintreffenden Informationen aller Sinnessysteme zu erfassen und zu verarbeiten. Wie im Unterkapitel zum Kurzzeitgedächtnis genauer beschrieben (s.u.), treffen pro Sekunde durch unsere Sinnessysteme etwa 11.000.000 Bits an Informationen ein, wovon wir bewusst nur ca. 40 Bits verarbeiten können ⁷⁰. Das allein erklärt, warum ein System vonnöten ist, das selektiert, welchen Informationen wir uns bewusst zuwenden. Dies stellt die selektive Aufmerksamkeit dar. Sie lenkt unser Bewusstsein ständig neu auf einen kleinen Teilaspekt der Informationen, die eintreffen. Der große Teil an Informationen, der nicht bewusst verarbeitet wird, bleibt jedoch nicht unbeachtet. Unbewusst werden viele der Informationen registriert und kurzfristig gespeichert.

Der Fokus der selektiven Aufmerksamkeit wird bewusst und unbewusst gelenkt. Ein klassisches Beispiel für die unbewusste Fokussierung der selektiven Aufmerksamkeit ist der sogenannte Cocktail-Effekt ⁷¹. Ist man in einem Raum in ein Gespräch vertieft und hört man einer Person bewusst zu, so ist die eigene Aufmerksamkeit auf das Gespräch fokussiert. Spricht jedoch jemand den eigenen Namen in diesem Raum laut aus, so wird automatisch die selektive Aufmerksamkeit in die Richtung der Person gelenkt, die den Namen ausgesprochen hat, da sie unbewusst auch Teile der anderen Gespräche registriert und abgeglichen hat.

Die selektive Aufmerksamkeit hat selbst jedoch nur eine begrenzte Kapazität. Aus diesem Grund sind wir Menschen nur bedingt Multitasking fähig. So konnte anhand von MRT-Bildern gezeigt werden, dass bei LKW-Fahrern, die in ein Gespräch verwickelt sind, die Gehirnaktivität in den Bereichen, die für das Fahren wichtig sind um 37% abnimmt ⁷². Die selektive

Aufmerksamkeit muss dadurch immer wieder neu auf eintreffende Informationen ausgerichtet und verändert werden. Einerseits wird sie durch direkte, hervorstechende (saliente) Reize gelenkt, die automatisch die Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Dieser Mechanismus wird auch als bottom-up Aufmerksamkeit bezeichnet. Andererseits kann die Aufmerksamkeit auch durch die Selektion des Inhaltes der Informationen gelenkt werden, was als kontrollierte top-down Aufmerksamkeit bezeichnet wird ⁷³.

Neue Studien zeigen aber auch mögliche Ansätze für andere Modelle der Aufmerksamkeit. So konnten Prime et al. 2008 ⁷⁴ anhand von visuellen Reizen (Cues) und auditiven Targets zeigen, dass die beiden Sinnes-Systeme miteinander in Verbindung stehen. Dies stützt die These für ein crossmodales System der Aufmerksamkeit. Müller et al. ⁷⁵ vermuten, dass es einen Mechanismus gibt, der die crossmodale Aufmerksamkeitsverschiebung in eine multisensorische Repräsentation des Raumes lenkt. Dies bekräftigen neurowissenschaftliche Studien, die die gemeinsame Verschaltung von mindestens drei Sinnessystemen in bestimmten Gehirnarealen ⁷⁶, insbesondere in Kernen des Thalamus und in sensorischen kortikalen Arealen ⁷⁷, in Bezug auf die Aufmerksamkeit untersuchten (u.a. ⁷⁸⁻⁸⁰). Wie dieses System jedoch im Einzelnen genau funktioniert, ist noch nicht abschließend geklärt und bedarf weiterer Forschung.

2.4.5. Gedächtnis

Das Gedächtnis ist die Fähigkeit des Gehirns, individuell erlebte Informationen so abzuspeichern, dass sie jederzeit wieder abrufbar sind. Diese Eigenschaft ist stark mit dem Prozess des Lernens verbunden, denn die gespeicherten Informationen sind das Produkt von Lernprozessen, die sowohl bewusst als auch unbewusst ablaufen ⁸¹. Bei diesem Gesamtprozess sind eine Reihe verschiedener Prozessschritte nötig: Die Informationsaufnahme aus der Umgebung durch die Sinnesorgane, die Filterung und Selektierung der Informationen, die Speicherung (Enkodierung) der Informationen, die Verknüpfung der neuen Informationen mit anderen und das Wiederabrufen (Exphorie) der Informationen ^{81,82}. Der gesamte Prozess, wie sich Gedächtnisinhalte bilden, erfordert ein komplexes neuronales System, da bis heute intensiv untersucht und erforscht wird. Gerade im Bereich der Neurowissenschaft werden mit neuen Untersuchungsmethoden neue Erkenntnisse gewonnen.

Die beiden Psychologen Richard C. Atkinson und Richard M. Shiffrin stellten im Jahr 1968 ihr bis heute bekanntes und (in weiterentwickelter Form) gängiges Dreistufenmodell bzw. drei-Speicher-Modell vor ⁸³. Dieses Modell beinhaltet drei Teilsysteme, die miteinander in Reihenfolge verbunden sind; Das sensomotorische Gedächtnis, das Kurzzeitgedächtnis und das Langzeitgedächtnis. Es stellt damit den Weg der Erinnerungsbildung im menschlichen

Gehirn dar und ist zur besseren Darstellung in Abbildung 5: „Arbeitsgedächtnis nach Baddeley“ dargestellt. Die genaue Arbeitsweise des Gedächtnisses ist sehr komplex und wird aufgrund der abweichenden Thematik dieser Arbeit an dieser Stelle nicht genauer beschrieben.

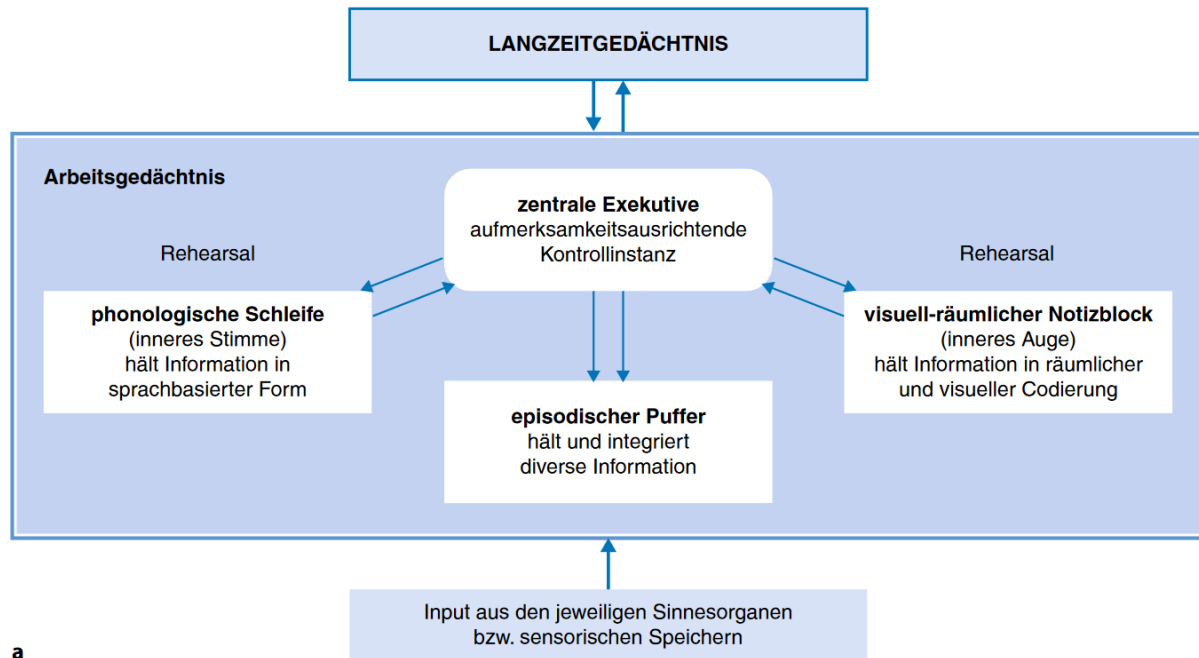


Abbildung 5: Arbeitsgedächtnis nach Baddeley⁵

2.5. Physiologische und hormonelle Effekte der Lichteinwirkung

Wie bei vielen Lebewesen unterliegt der menschliche Organismus zirkadianer Rhythmik. Diese regelt verschiedenste physiologische Systeme im Körper, wie u.a. den Schlaf-Wach-Rhythmus, die Hormonproduktion, die kardialen und respiratorischen Funktionen, die wiederum miteinander interagieren. Der Schlaf-Wach-Rhythmus stellt dabei einen zentralen Mechanismus dar. Er hat eine Grund Periodizität von etwa 24,2 Stunden, die unabhängig von externen Einflussfaktoren verläuft^{85,86}. Die regulatorischen Kerne für diesen Rhythmus befinden sich vor allem im SCN in der Hypothalamus Region. Diese Kerne werden von den ipRGC direkt angesteuert als Teil des non-visuellen Systems (siehe Kapitel 2.3.4 Fotosensitive retinale Ganglienzellen). Externe Einflüsse dienen der Synchronisation und Anpassung der eigenen Periodizität. Der größte externe Einfluss auf den zirkadianen Rhythmus ist dabei

⁵ Quelle: 84. Becker-Carus C, Wendt M. Gedächtnis. Allgemeine Psychologie: Eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2017: 353-420.

einfallendes Licht, welches als Hell-Dunkel-Muster von den ipRGC registriert und weitergeleitet wird. Tägliche, von der Jahreszeit abhängige Hell-Dunkel-Muster, die auf die Netzhaut fallen, synchronisieren die biologische Uhr und ihr Timing so, dass es mit dem lokalen 24-Stunden-Hell-Dunkel-Muster übereinstimmt. Licht stellt somit den Haupt-Synchronisator für den zirkadianen Rhythmus dar⁸⁷.

Bei dieser zirkadianen Rhythmik sind die Hormone Melatonin und Cortisol von zentraler Bedeutung. Melatonin wird als schlafförderndes Hormon zur Nacht aus der Glandula pinealis sezerniert und hat seine maximale Konzentration um ca. drei Uhr nachts. Dem Melatonin steht das Hormon Cortisol als Gegenspieler gegenüber. Es ist als Stresshormon an vielen Stoffwechselprozessen beteiligt. Es stellt dem Körper Energie zur Verfügung und wird in der Nebenniere produziert. Cortisol hat dabei sein Konzentrationsmaximum am Morgen kurz nach dem Erwachen^{88,89}.

Da die zirkadiane Rhythmik Einfluss auf fast alle physiologischen, metabolischen und Verhaltenssysteme hat, stellt dieses Phänomen eine breite Palette biologischer Prozesse unter die indirekte Kontrolle der Netzhaut. Der SCN als zentrale Synchronisationseinheit ist dabei mit vielen Organen und endokrinen Drüsen verschaltet und schafft damit ein großes Netzwerk an Verbindungen zur zirkadianen Rhythmik im gesamten menschlichen Organismus. Dieses Netzwerk ist sehr komplex und das Verständnis der einzelnen Verbindungen zum Teil noch immer Gegenstand aktueller Forschungen.

Gut erforscht ist der periodische Verlauf der Körpertemperatur des Menschen in Bezug auf den zirkadianen Rhythmus. Die Körpertemperatur steigt im Tagesverlauf (bei normaler Schlafdauer und normalen Lichteinfall) von ca. 37,2 Grad am Morgen auf ca. 37,4 Grad am Abend, bevor sie dann in der Nacht ihren Tiefstwert mit ca. 36,5 Grad erreicht⁹⁰. Die Melatonin-Konzentration verläuft dabei invers zur Temperatur und steht damit in direktem Zusammenhang mit der Körpertemperatur und damit auch in Verbindung mit dem SCN^{91,92}.

Verschiedene Studien konnten zeigen, dass künstliches Licht auch hier in verschiedenen Formen Auswirkungen auf die Körpertemperatur hat. Von Bedeutung ist dabei vor allem der Zeitpunkt (innerhalb der Zeit der Melatonin-Sekretion), die Intensität und die Länge der Lichtexposition, wodurch die Körpertemperatur angehoben werden kann^{4,91,93-96}.

Auch die Herzfrequenzvariabilität (engl. heart rate variability, HRV) wird durch den zirkadianen Rhythmus beeinflusst und beschreibt die Zeit zwischen zwei regulär aufeinanderfolgenden Herzschlägen. Sie wird, genauso wie die Körpertemperatur, durch die Melatonin-Konzentration beeinflusst. Gemessen wurde die Erhöhung der Körpertemperatur vor allem bei monochromatischer Lichtexposition im kurzwelligen Bereich (ca. 460nm), welcher gleichzeitig mit einer niedrigen Melatonin-Konzentration einhergeht^{4,97}.

Über das Netzwerk der Efferenzen des SCN hat Licht auch Auswirkungen auf die metabolischen Prozesse im Körper und ist dadurch mit den Organen verbunden, welche die

Energiehomöostase im Körper beeinflussen⁹⁸. Es wurden verschiedene, spezifische Gene gefunden, die im Zuge der zirkadianen Rhythmik viele metabolische Prozesse steuern und koordinieren^{99,100}. So findet unter anderem eine zirkadiane Expression von Glukosetransportern, Glucagonrezeptoren und Enzymen statt, die am Zuckerstoffwechsel beteiligt sind^{101,102}. Ebenso oszillieren Hormone wie Insulin, Glucagon, Ghrelin und Leptin rhythmisch.¹⁰³⁻¹⁰⁵ Diese Ergebnisse sind nur ein kleiner Teil der Forschung zum Einfluss der zirkadianen Rhythmik auf metabolische Prozesse im Körper und sollen an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden. Durch Licht als stärkste Einflussgröße auf den zirkadianen Rhythmus nimmt es damit auch indirekt Einfluss auf die metabolischen Prozesse im Körper. Findet die Lichtexposition zu unnatürlichen Zeiten (nachts) statt, wird dadurch auch der Metabolismus beeinträchtigt. Besonders intensiv wurde hier die Gruppe von Schichtarbeitenden untersucht. So konnte man in einem Literaturreview die Lichtexposition in der Nacht mit metabolischen Beeinträchtigungen in Verbindung bringen¹⁰⁶. Auch wurde in einer groß angelegten Studie mit älteren männlichen Probanden eine Verbindung von erhöhter Lichtexposition in der Nacht mit Fettleibigkeit und anderen metabolischen Folgen festgestellt. So hatten die Probanden bei nächtlichen Lichtwerten von >3 Lux ein signifikanter höheres Körpergewicht, ein erhöhten BMI und erhöhte Triglycerid und LDL Werte¹⁰⁷. Zudem steht langjährige Schichtarbeit und die damit verbundene Lichtexposition in der Nacht in Verbindung mit der Begünstigung von verschiedenen Arten von Krebserkrankungen^{108,109}. Die Beeinflussung von Licht über den zirkadianen Rhythmus auf die Aufmerksamkeit und weitere kognitive Prozesse wird im Einzelnen im nächsten Kapitel genauer beleuchtet.

2.6. Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit und auf kognitive Prozesse

Die Aufmerksamkeit ist ein komplexer Zustand im menschlichen Gehirn, der sich aus dem Zustand der Wachheit entwickelt (siehe Kapitel 2.4). Licht als bestimmbare Quelle kann für den Menschen im Sinne der gerichteten Aufmerksamkeit wahrgenommen werden. In diesem Kapitel soll es aber um den Einfluss von Licht auf das nicht-visuelle System gehen. Wie auch bei den physiologischen Wirkungen von Licht ist die erste Wegstrecke der Reizweiterleitung in Bezug zur Aufmerksamkeit identisch (siehe Kapitel 2.3.2 Verarbeitung und Weiterleitung des Lichtreizes). Im Folgenden wird die Wirkung von Licht anhand der Messmethoden der Aufmerksamkeit beschrieben.

2.6.1. Subjektive, objektive und physiologische Messung von Aufmerksamkeit

Die Aufmerksamkeit ist das Ergebnis des Zusammenspiels vieler kognitiver Prozesse. In der Forschung zur Aufmerksamkeit können entweder objektive oder subjektive Selbsteinschätzungen erhoben sowie physiologische Parameter ermittelt werden.

Subjektive Selbsteinschätzung

Die subjektive Aufmerksamkeit erfolgt mittels selbsteinschätzender Fragebögen. Die am häufigsten verwendete Likert-Skala ist die Karolinska Sleepiness Scale, die eine gute Validation objektiver Messgrößen hat und durch Schläfrigkeitsstufen den Grad der Aufmerksamkeit angibt¹¹⁰. Weitere, weniger häufig eingesetzte Fragebögen in Form von Likert-Skalen sind die Eworth Sleepiness Scale¹¹¹, die Stanford Sleepiness Scale¹¹² „, die Visual Analogue Scale (VAS) oder die Samn-Perelli fatigue Checkliste¹¹³.

Die Selbsteinschätzung mittels Fragebögen bildet dabei eine einfache und schnelle Möglichkeit, die individuellen Sichtweisen der Proband*innen zu erfassen. Gleichzeitig sind sie anfällig für mögliche Verzerrungen (im engl. Bias). So tendieren untersuchte Personen unter Umständen dazu, nach Aspekten der sozialen Erwünschtheit (Was wäre die bestmöglich Antwort im Sinne der Studie) oder der Tendenz zur Mitte (keine extreme Angaben machen) zu antworten¹¹⁴. Hinzu kommt, dass die Einschätzung der eigenen Leistung nicht immer der tatsächlichen Leistung entspricht. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, subjektive Selbsteinschätzung mit mindestens einem weiteren objektiven Test oder aber physiologischen Parametern zu ergänzen¹¹⁵.

Objektive Aufmerksamkeitsmessung

Bei der Ergebniskontrolle der zu untersuchenden Personen kommen kognitive Tests zum Einsatz. Diese können in unterschiedlicher Form die Ergebnisse überprüfen. Ein häufig verwendeter Test ist der psychomotor vigilance task (PVT)¹¹⁶⁻¹¹⁸. Bei diesem Test wird geprüft, in welcher Geschwindigkeit eine Testperson auf einen Reiz reagiert. In Abhängigkeit von der Dauer und der Häufigkeit der Reize wird die Daueraufmerksamkeit und damit die Vigilanz getestet. Um die selektive Aufmerksamkeit zu testen werden sogenannte Go/No-Go-Tests verwendet¹¹⁹⁻¹²¹. Bei diesen Tests werden Bedingungen für die Reaktion auf einen Reiz gestellt (z.B. nur bei tiefen Tönen einen Knopf drücken). So wird zusätzlich zur Messung der Daueraufmerksamkeit wie beim PVT auch die selektive Aufmerksamkeit gemessen. Die Go/No-Go-Tests gibt es sowohl in visueller als auch in auditiver Form. Speziell für das Testen der Auswirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit wird in der Regel die auditive Form gewählt,

um denselben Verarbeitungsweg für Auswirkung und Reaktion zu nehmen. Gleichzeitig stellt der visuelle Test über einen Bildschirm eine weitere Lichtquelle dar, die eine zusätzliche Verzerrung darstellen würde. Ein weiterer Test ist der D2 bzw. die überarbeitete Version, der D2R Test nach Brickenkamp^{122,123}. Hierbei werden die Proband*innen aufgefordert, innerhalb 20 Sekunden pro Zeile alle „d“ mit Strichen zu erkennen und durchzustreichen. Zwischen den gesuchten Buchstaben gibt es andere Buchstaben als Distraktoren. Dieser Test basiert in seiner Ursprungsform auf einer Papier-gebundenen Version und ist dadurch einfach, schnell und in großen Gruppen durchzuführen. Als weiterer häufig verwendeter kognitiver Test gilt der n-Back-Test¹²⁴. Dieser Test ist ein computergestütztes Analyseverfahren, das den Proband*innen die Aufgabe stellt, sich wiederkehrende Reize zu merken, die in Abhängigkeit vom Schwierigkeitsgrad in zeitlichem Abstand voneinander gesetzt werden.

Die kognitiven Tests zur Bestimmung der objektiven Aufmerksamkeit haben den Vorteil, das Ergebnis der tatsächlich erbrachten Leistung direkt zu messen. Doch auch diese Ergebnisse können durch verschiedene Faktoren wie Alter, aktuelle Verfassung, Testumgebung, Leistungsniveau etc. beeinflusst und damit verzerrt werden. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, kognitive Tests und Tests zur subjektiven Aufmerksamkeitsmessung zu kombinieren.

Physiologische Parameter

Eine andere Möglichkeit die Auswirkungen von Licht auf die Aufmerksamkeit zu messen ist, sich die physiologischen Eigenschaften des Körpers zu Nutze zu machen. Ein klassischen und häufig genutztes Phänomen ist die Veränderung des Musters von Theta-,Alpha- und Beta-Wellen abhängig von Level der Aufmerksamkeit und des Wachheitszustandes^{125,126}.

Zusätzlich können auch die Pupillen-, sowie Augenliedbewegungen^{127,128} gemessen werden, die sich bei Müdigkeit spezifisch verändern, oder aber die Herzratenvariabilität^{129,130} und die Körpertemperatur¹³¹ gemessen werden, die beim Zustand erhöhter Wachheit zunehmen.

Durchgeführte Messungen

In dieser Studie wurden für die objektive Aufmerksamkeitsmessung mittels einem auditiven Go/No-Go Test gemessen. Dies wurde mit dem Auretim Gerät durchgeführt, welches eigens für diese Studienreihe gebaut wurde (siehe Kapitel 3.4.1: Auretim). Zusätzlich wurde zur subjektiven Aufmerksamkeitsmessung die KSS verwendet, welche vor und nach der Lichtexposition abgefragt wurde.

2.6.2. Übersicht: Auswirkungen von Licht auf die Aufmerksamkeit und kognitive Prozesse

Zuerst soll an dieser Stelle eine Übersicht des Forschungsstandes zur Auswirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit geben werden. Anschließend werden die einzelnen Einflussfaktoren genauer beleuchtet und der aktuelle Forschungsstand dargelegt.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurde intensiv über die Auswirkungen von Licht auf den menschlichen Körper geforscht, auch bedingt durch die Entdeckung der ipRGC und des Verständnisses ihrer Verschaltung. Licht hat dabei viele verschiedene Einflussfaktoren wie die spektrale Verteilung, die Beleuchtungsstärke, die Beleuchtungsdauer, den Tageszeitpunkt, die Lichthistorie und die räumliche Verteilung, die unterschiedlich auf die Aufmerksamkeit wirken. Die in den letzten Jahren erschienenen Reviews zu diesem Thema versuchen die vielen Studien zu kategorisieren, signifikante Auswirkungen aufzuzeigen und sie zusammen zu bringen. Das Literaturreview von Souman et al.¹³² umfasst 68 Studien zum Thema „acute alerting affects of light“. Die Studien wurden dabei in verschiedene Kategorien unterteilt. Zum einen wurden die Studien nach der Veränderung der spektralen Verteilung untersucht und in Gruppen zu polychromatisches Licht (n=15) und monochromatisches Licht (n=15) eingeteilt. Darüber hinaus wurden die Studien zur Veränderung der Beleuchtungsstärke (n=38) als Gruppe zusammengefasst. Zur weiteren Unterteilung wurden die Gruppen objektive und subjektive Aufmerksamkeitsmessung generiert.

Bei der Studie von Souman et al. zeigte sich eine mehrheitlich positive (steigernde) Beeinflussung durch die Erhöhung von weißem polychromatischem Licht auf die subjektiv empfundene Aufmerksamkeit (28 von 45 Studien). Dies verdeutlicht aber auch (27 von 45 Studien), das in einigen Studien keine steigernde Beeinflussung gefunden wurde. Betrachtet man die spektrale Verteilung, so zeigte sich bei zunehmendem hohen Blauanteil eine geringere Anzahl von Studien (5), die einen positiven Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit aufwiesen. Demgegenüber stehen 10 Studien, die einen negativen oder keinen Effekt aufwiesen. Zudem wurde Reaktionszeiten nicht in allen Studien gemessen (n=24). Nur in 3 der 24 Studien konnte ein Effekt der Reaktionszeiten bei Veränderung von Beleuchtungsstärke und spektraler Verteilung gemessen werden.

Ein Merkmal der meisten eingeschlossenen Studien war der Untersuchungszeitpunkt mit der Lichtexposition in der Nacht. Diese Studien lassen sich somit nicht ohne Weiteres mit Studien vergleichen, deren Lichtexposition am Tag gemessen wurden und die zahlenmäßig deutlich geringer sind.

In Abhängigkeit des Zeitpunktes steht dem Review von Souman et al. die Studie von Lok et al.¹³³ entgegen. In diesem Literaturreview wurden nur Studien erfasst, in denen die

Lichtexposition am Tag stattgefunden hat (n=19). Als weiteres Einschlusskriterium wurde die ausschließliche Verwendung von polychromatischem weißem Licht genommen. Die Argumentation beruht auf der Annahme, dass die wachmachenden Effekte von hellem chromatischem Licht auf die Melatonin-Suppression in der Nacht zurück zu führen sind. Da die Melatonin Konzentration am Tag jedoch nicht sehr gering ist, kann dieser Mechanismus durch das Licht nicht der Grund für die Beeinflussung von Licht auf die Aufmerksamkeit am Tag sein. Aus dem resultierenden Grund der schlechten Vergleichbarkeit wurden nur Studien ausgewählt, die am Tag durchgeführt wurden. Vergleichbar wie in der Studie von Souman et al. wurden auch hier die Gruppen weiter unterteilt: entsprechend der Aufmerksamkeitsmessung in Kategorien der subjektiven und objektive Messungen, sowie der kognitiven Parameter. Auch hier zeigte sich in der Analyse eine aufmerksamkeitssteigernde Wirkung von polychromatischem Licht auf die subjektive Beurteilung der zu untersuchenden Personen. Hingegen konnte die objektive Messung nur wenige positive Effekte darstellen und es zeigte sich in einigen Studien eine neutrale und sogar negative Entwicklung.

In einer aktuellen Metaanalyse von Mu et al.¹³⁴ werden die Einschlusskriterien noch enger gefasst. Es wurden einerseits für die Beurteilung der Studien statistische Methoden eingesetzt, um die Ergebnisse mehrerer Studien quantitativ zusammen zu fassen. Andererseits wurden nur Studien mit gesunden Populationen mit einem gesunden Schlaf-Wach-Rhythmus eingeschlossen. Das beruht auf die Annahme, dass Personen mit gestörten Schlafzyklen im Vergleich zu gesunden Personen empfindlicher auf die Alarmierungseffekte von Licht reagieren und der Mechanismus, der dem aufmerksamkeitsfördernden Effekten zugrunde liegt, auch zwischen gesunden Personen und Personen mit gestörtem Schlafrhythmus unterschiedlich sein kann. Auch die Metastudie von Mu et al. unterteilten die Studien nach objektiver und subjektiver Aufmerksamkeitsmessung. Dabei konnten Sie belegen, dass die Lichtexposition mit einer signifikanten Verbesserung der subjektiven Wachsamkeit verbunden ist. Dies konnte sowohl anhand standardisierter Skalen als auch anhand von Leistungsaufgaben bewerteter objektiver Wachsamkeit gemessen werden. Die Ergebnisse der generierten Subgruppenanalysen deuten darauf hin, dass eine Lichtexposition mit einer höheren CCT (korrelierte Farbtemperatur) die Aufmerksamkeit effektiver verbessert als eine Lichtexposition mit einer niedrigeren CCT. In Bezug auf den Zeitpunkt der Lichtexposition verbesserte sich die subjektive Aufmerksamkeit sowohl am Tage als auch in der Nacht.

Aufgrund der hohen Relevanz von Lichtexposition auf den menschlichen Körper sowohl am Arbeitsplatz als auch im Lern- und Studium Umfeld gibt es in diesen Bereichen viele Feldstudien zu dem Thema. Sowohl ein Cochrane Review¹³⁵ als auch das KAN Review¹³⁶ fassen als Meta-Analysen die Auswirkungen von Lichtexposition auf die Aufmerksamkeit im Büro- bzw. Arbeitsalltag zusammen. Beide Studien betonen, dass es weitere Studien, v.a. Feldstudien braucht, um die überwiegend in kontrollierten Laborstudien gemessenen

Ergebnisse zu überprüfen, da eine Übertragung der Ergebnisse nicht ohne weiteres möglich ist. Gleichzeitig verweisen sie auf die Notwendigkeit von Studien mit hoher Qualität, was eine ausreichende Anzahl an Teilnehmenden sowie kontrollierte Studienabläufe beinhaltet.

Jedoch zeigen Studien auch negative Effekte für den menschlichen Körper in Bezug auf eine längere Lichtexposition während der Schichtarbeit auf. In den Studien erhöhte sich auch hier die Aufmerksamkeit nach der Lichtexposition, gleichzeitig konnten aber langfristig eine Erhöhung von onkologischen, metabolischen und psychischen Erkrankungen festgestellt und damit in Verbindung gebracht werden^{2,3,137}.

Die beiden anderen Literaturreviews von Souman et al. und Lok et al. kommen zu dem Ergebnis, dass in einigen Studien polychromatisches weißes Licht Auswirkungen auf die subjektive und vereinzelt auch auf die objektive Aufmerksamkeit hat, dass aber die Studienlage nicht einheitlich ist. Sie führen das auf verschiedene Faktoren zurück. So bemängeln beide Gruppen die eingeschränkte Vergleichbarkeit der verschiedenen Studien untereinander, da die Durchführungsweise und technische Umsetzung der Lichtexposition (Licht-Boxen, Ulbrichtkugeln, Lichtbrillen etc.) sehr heterogen war. Auch wurde in den Reviews ein möglicher Publikation Bias, also die Nichtveröffentlichung von negativen Ergebnissen vermutet, was zu einer Fehleinschätzung führen kann. Ein Grundproblem stellt die geringe Stichprobengröße dar, welche in verschiedensten Literaturstudien benannt wird^{114,132,133,138}.

Die Studienlage zum Thema der Wirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit kann also einen Zusammenhang zwischen Lichtexposition und Aufmerksamkeit feststellen. Es zeigt sich jedoch ein heterogenes Bild, was die einzelnen Einflussfaktoren des Lichts und die verschiedenen Untersuchungsaufbauten angeht. Die Einflussfaktoren werden im Folgenden genauer beleuchtet und die Studienlage dargelegt.

2.6.3. Einflussfaktoren von Licht auf die Aufmerksamkeit

Spektrale Verteilung

Das Spektrum der Lichtwellen wird in Wellenlängen bzw. Nanometern (nm) angegeben und wird dabei in unterschiedlichen Farbempfindung wahrgenommen. Mit der Erkenntnis der hohen Sensitivität der ipRGCs für blaues, kurzwelliges Licht im Bereich von 455-485nm rückte die Betrachtung der Auswirkung von blauem Licht in den Fokus. Als mögliche Ursache für Veränderungen der Aufmerksamkeit gilt dabei vor allem die Unterdrückung bzw. das zeitliche

Verschieben der Melatonin Ausschüttung, weswegen die meisten Studien am Abend oder in der Nacht durchgeführt wurden.

Betrachtet man die Ergebnisse von Souman et al.¹³², dann zeigen die sechs verwendeten Studien, die die Auswirkung der Filterung des blauen Lichts untersucht haben, zwar eine Supprimierung von Melatonin, aber keinen Effekt bei der Aufmerksamkeit. Einzige Ausnahme ist hier die Studie von Rahman et al.¹³⁹, welche sogar bei Abwesenheit des blauen Lichtanteils eine erhöhte Aufmerksamkeit gemessen hat und die damit konträr der Annahme von aufmerksamkeitsförderndem blauen Licht steht. Bei der Betrachtung der Gruppen, die die Lichtexposition am Abend bzw. in der Nacht mit hohen Farbtemperaturen im Bereich von 4667 K bis 17.000 K im Vergleich mit einer niedrigen Farbtemperatur im Bereich von 2000 K bis 4775 K konnte überwiegend ein signifikanter Unterschied auf die subjektive Aufmerksamkeit gefunden werden. Eine Veränderung bei der objektiven Aufmerksamkeit konnte jedoch nicht gemessen werden¹³².

In einer weiteren Studie von Lockley et al.⁴⁴ konnte in einer aufwendigen Studie die direkte Auswirkung von kurzwelligem Licht auf die Aufmerksamkeit im Vergleich zu langwelligem Licht nachgewiesen werden. Die Studie ging über neun Tage und beinhaltete drei Tage lang die Generierung einer Baseline. Nach der Exposition von kurz-(455nm) und langwelligem (555nm) Licht wurde sowohl die subjektive Aufmerksamkeit mittels KSS und die objektive Aufmerksamkeit mittels PVT gemessen als auch die EEG Aktivität. In der Studie konnte sowohl eine signifikante Reduktion der subjektiven als auch der objektiven Aufmerksamkeit festgestellt werden. Zudem zeigte sich im EEG nach der Lichtexposition eine Erhöhung des hohen Alpha Wellenbereichs bei gleichzeitiger Erniedrigung des Delta-Wellenbereichs.

Cajochen et al. (2011)¹⁴⁰ konnten in ihrer Studie zeigen, dass weißes LED Licht mittels Bildschirmen mit einer Farbtemperatur von 6953 K bei einer Lichtexposition von fünf Stunden sowohl die objektive (Go/No-GoTest; PVT) als auch die subjektive (KSS) Aufmerksamkeit erhöht. Die Studie von Chellappa et al.¹⁴¹ verglich drei verschiedene Farbtemperaturen (6500 K, 2500 K und 3000 K) für zwei Stunden bei gleichbleibenden 40lx. Dabei konnte bei 6500 K eine erhöhte subjektive Aufmerksamkeit mittels KSS und VAS gemessen werden sowie eine verbesserte Reaktionszeit im Go/No-Go Test und PVT. Dies galt aber interessanterweise nicht für schwierig zu bewältigende Aufgaben in dem Test, welche exekutive Elemente mit einschlossen.

Eine neuere Studie von Hanifin et al. fand ebenfalls eine subjektive Aufmerksamkeitserhöhung mittels KSS, aber keine signifikante Veränderung in der objektiven Aufmerksamkeit. Zum gegenteiligen Ergebnis kamen Rahman et al.¹⁴² zwei Jahre zuvor. Hier konnte keine subjektive Veränderung in der Aufmerksamkeit gefunden werden bei kurzwelligem LED. Die gemessenen Reaktionszeiten im PVT war dabei verlängert im Vergleich zu gebräuchlichen Leuchtstofflampen, die 4100 K aufwiesen bei 50lx.

Die Studienlage von Testungen am tagsüber ist hingegen weniger ausgeprägt als die Testungen zur Nacht. Das Literaturreview von Lok et al.¹³³ bezog nur Studien ein, die die Auswirkungen von polychromatischem Licht am Tage untersucht haben. Hierbei konnte ein Effekt für die subjektive Aufmerksamkeit gefunden werden (14 von 18 Studien). Hingegen wurden bei der Messung der objektiven Aufmerksamkeit nur bei fünf von zehn Studien positive Effekte gefunden.

In der Studie von Hartstein et al.¹⁴³ konnte ein Gender-spezifischer Unterschied in der Aufmerksamkeitsveränderung gezeigt werden. Getestet wurde der Unterschied zwischen LEDs mit 500 K im Vergleich zu Leuchtstofflampen mit 3500 K. Dabei konnte in zwei von drei kognitiven Tests (u.a. Go/No-Go Test) eine signifikante Steigerung der Aufmerksamkeit bei erhöhter Farbtemperatur nachgewiesen werden.

Abseits der Forschung zur Schichtarbeit wurden Studien am Arbeitsplatz vor allem tagsüber durchgeführt. So konnte Figueiro et al.¹⁴⁴ in ihrer Studie zeigen, dass durch die Beleuchtung des Arbeitsplatzes von 94 Büromitarbeitenden mit blau angereichertem Licht die subjektive Aufmerksamkeit (KSS) erhöht wird. Genauso konnten sowohl Viola et al.¹⁴⁵ als auch Mills et al.¹⁴⁶ mit ähnlichem Versuchsaufbau einen positiven Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit feststellen. Dafür wurde bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke eine hohe Farbtemperatur von ca. 17000K mit einer niedrigen Farbtemperatur von 4000 K bzw. 2900 K verglichen.

Einige Studien kamen jedoch auch zu keinen oder zu einem negativen Ergebnis zum Thema Einfluss von Licht auf die Aufmerksamkeit. So zeigten die Ergebnisse von Sahin et al.¹⁴⁷, bei dem Vergleich von monochromen, rotem LED Licht (631 lx) im Vergleich zu polychromatischem weißen Licht (2568 K), dass bei beiden Lichtexpositionen die objektive Aufmerksamkeit (Go/No-Go Test) erhöht wird. Da die ipRGC nicht lichtsensibel auf langwellige Lichtspektren sind, war ein gegenteiliger Effekt vermutet worden und zeigte damit erstmalig den positiven Einfluss von rotem langwelligem Licht am Tag auf die objektive Aufmerksamkeit auf.

In einer neueren Studie von Burattini et al.¹⁴⁸ fanden sich bei 6800 K im Vergleich zu 3500 K nur Effekte im visuellen objektiven Vigilanz Test. Im auditiven Vigilanz Test konnten interessanterweise keine Effekte gemessen werden. Smolders und de Kort¹⁴⁹ konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der Beeinflussung der Aufmerksamkeit in ihrer Studie feststellen. Sie verglichen den Unterschied einer Lichtexposition von 2700 K mit einer Exposition von 6000 K, bei jeweils 500lx am Vormittag im Vergleich zum Nachmittag.

Im Bereich der Feldstudien konnte Keis et al.¹⁵⁰ positive Effekte von unterschiedlicher korrelierter Farbtemperatur auf die Aufmerksamkeit und Konzentration mittels d2R Test messen. Dabei verglichen sie Lichtexpositionen mit blau angereichertem Licht (4000K direkt gemessen und 14000K indirekt, resultierte Farbtemperatur war 5500K bei 300lx) im Vergleich

zu einer definierten Standardbeleuchtung (3000K bzw. 4000K bei 300lx). Die Standardbeleuchtung wurde hingegen als angenehmer empfunden.

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke ist eine der zentralen Einflussfaktoren des Lichts, deren Auswirkungen auf die Aufmerksamkeit intensiv untersucht wurde. Betrachtet man die Reviews, dann bestätigt sich dieses Bild. Bei Souman et al.¹³² wurden 45 Studien zusammengefasst, die die Auswirkung der Beleuchtungsstärke von polychromatischem Licht auf die subjektive Aufmerksamkeit untersuchten. Die Beleuchtungsstärke lag dabei für die helle Lichtexposition zwischen 100 bis 10000lux (vertikal zum Auge) und für die niedrige Beleuchtungseinstellung im Bereich von <1 bis 1441lx (am Auge). Ein positiver Effekt wurde dabei bei 28 Studien gefunden (ca. 38%). Jedoch konnte bei 17 von 45 Studien kein Effekt gefunden werden. Bei Lok et al.¹³³ zeigten insgesamt 14 von insgesamt 19 Studien einen positiven Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit. Die Beleuchtungsstärke lag dabei für die helle Lichtexposition zwischen 360-7000lx und für die niedrigen Beleuchtungsstärken bei <0,01lx bis 400lx.

Die Meta-Analyse von Mu et al.¹³⁴ untersuchte, zusammengefasst in der Subgruppe Beleuchtungsstärke, acht Studien zur Auswirkung der unterschiedlichen Beleuchtungsstärken von Licht auf die Aufmerksamkeit. In dieser Subgruppe konnte weder für subjektive noch für die objektive Aufmerksamkeit eine signifikante Veränderung festgestellt werden. Die Gruppengröße war dabei jedoch auch gering.

Die Studie von Cajochen et al.⁹⁶ untersuchte systematisch die verschiedenen Lichtintensitäten zwischen 3lx und 9100 lx mit dem Ziel, eine Dosis-Wirkungskurve für die Auswirkung auf die subjektive Aufmerksamkeit (KSS) zu erstellen. Sie ist eine der wenigen Studien, die die Dosis-Wirkung genauer untersuchte. Jedoch enthielt auch diese Studie zu wenig Messwerte, insbesondere in der Überganszone schläfrig zu wach (70-200lx), um verlässlich den Anstieg als kontinuierlich oder in Stufen ansteigend zu definieren. So zeigte sich lediglich ein signifikanter Unterschied zwischen geringer Beleuchtungsstärke (50lx) und hoher Beleuchtungsstärke (>500lx), aber nicht zwischen den einzelnen Schritten der Beleuchtungsstärken untereinander. Dies konnten auch andere Studien mit mehreren Beleuchtungsstärken bis jetzt nicht bestätigen¹⁵¹⁻¹⁵³. Da die Testungen der Studie ⁹⁶ in der Nacht stattgefunden haben, ist die Kurve nicht geeignet, sie auf die Bedingungen am Tage zu übertragen. Studien von Lok et al.¹⁵⁴ und Smolders et al.¹⁵⁵ scheiterten an dem Versuch, eine Dosis Wirkungskurve am Tage zu definieren, da nicht genügend signifikante Effekte in ihren Studien (Lichtexposition von 1h bei verschiedenen Beleuchtungsstärken von 20lx bis 2000lx) gemessen werden konnten. Sie schlussfolgerten daraus, dass bei keiner zusätzlichen

Voraussetzung wie z.B. Schlafentzug, die Lichtexposition von bis zu 2000lx am Tag keine Auswirkung auf die Aufmerksamkeit hat.

Bei der objektiven Betrachtung der Aufmerksamkeit mittels kognitiven Tests ist die Studienlage, die einen positiven Einfluss der Beleuchtungsstärke gemessen hat, diverser. Einige Studien konnten einen positiven Einfluss im Reaktionsschnelligkeitstest am Morgen finden¹⁵⁶⁻¹⁵⁸, als auch positive Effekte am Nachmittag¹⁵⁹. Hingegen gab es auch einige Studien, die zu widersprüchlichen Ergebnissen kamen. So konnte Leichtfried et al.¹⁶⁰ zwar positive Effekte von Beleuchtungsstärken bei 5000lx bei 6500K im Vergleich zu 400lx bei 4000 K auf die subjektive Aufmerksamkeit (VAS) messen, jedoch gleichzeitig negative Effekte bei der objektiven Aufmerksamkeit (sustained attention test) feststellen. Smolders und de Kort¹⁶¹ stellten bei einer hohen Beleuchtungsstärke eine Verlangsamung in der objektiven Aufmerksamkeitsmessung im Go/No-Go Test und 2-Back Test, jedoch positive Effekte im PVT und auf die subjektive Aufmerksamkeit mittels KSS fest. Eine kürzlich veröffentlichte Studie von Lok et al.¹⁶² konnte eine signifikante Erhöhung der objektiven Aufmerksamkeit sowohl im PVT als auch im Go/No-Go Test messen, bei hellem polychromatischem Licht (1300lx) im Vergleich zu gedimmtem Licht (<6lx). Eine Erhöhung der subjektiven Aufmerksamkeit wurde dabei mittels KSS erst sechs bis neun Stunden später nach dem Aufstehen gemessen. Es gibt jedoch auch Studien, die gar keinen Effekt nach der Lichtexposition feststellen konnten^{152,163}.

In einigen Feldstudien konnten ebenfalls positive Effekte der Beleuchtungsstärke auf die Aufmerksamkeit gemessen werden. Sleegers et al.¹⁶⁴ verglichen in drei zusammengefassten Studien den Einfluss von unterschiedlichen Beleuchtungsstärken (zwischen 350lx und 1000lx), sowie verschiedene Farbtemperaturen (zwischen 3000K und 12000K). Gemessen wurde dabei die Konzentration und Aufmerksamkeit anhand des d2 Testes. Die Ergebnisse zeigten einen positiven Einfluss der Klassenraumbeleuchtung auf die Konzentration. Dabei verbesserten sich die Leistungen der Schüler:innen in den Versuchsgruppen deutlicher, als die ihrer Mitschüler:innen in den Kontrollgruppen. Jedoch verbesserten sich insgesamt alle Schüler:innen im Konzentrationstest.

Die in den Hamburger Schulstudien zusammengefassten Ergebnisse von Barkmann et al.¹⁶⁵ und Wessolowski et al.¹⁶⁶ konnten ebenfalls positive Einflüsse auf die Konzentration und Aufmerksamkeit messen. Dabei konnten die Lehrkräfte aus sieben unterschiedlichen Settings von Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur für die Klassenräume wählen (275lx bis 1000lx und 3500K bis zu 11000K). Zudem gab es jeweils in beiden Studien eine Klasse, die eine Standardbeleuchtung (300lx und 4000K) hatte. Zur besseren Vergleichbarkeit waren die Klassenzimmer in Bezug auf externe Lichteinflüsse räumlich möglichst ähnlich gehalten. Nach standardisiertem Ablauf zeigte sich im d2R Test nach sieben Wochen eine signifikant

erniedrigte Auslassfehlerquote bei den verschiedenen Lichtsettings im Vergleich zur Kontrollgruppe. Zudem stieg die Lesegeschwindigkeit signifikant an.

Tageszeitpunkt

Die Gesamtheit der Studien kann man in zwei große Gruppen unterteilen: Studien, die tagsüber und Studien die nachts durchgeführt werden. Insgesamt überwiegen die Studien, die nachts durchgeführt werden. Dies liegt vermutlich daran, dass die Auswirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit häufig im Rahmen der Effekte auf den zirkadianen Rhythmus getestet werden, welcher insbesondere von der nächtlichen Melatonin Konzentration abhängt. Durch den erhöhten Melatonin Spiegel und damit verbundene erhöhte Müdigkeit kann vermutet werden, dass sich der Lichteinfluss in der Nacht stärker auswirkt. Da diese Konstellation am Tag nicht vorherrscht, kann man die Ergebnisse aus Studien in der Nacht nicht ohne Einschränkungen mit Studien am Tag vergleichen (für weitere Ausführungen siehe Cajochen et al.⁵).

Die ungleiche Verteilung von Studien am Tage im Vergleich zur Nacht spiegelt sich auch in den Literaturreviews wider. Betrachtet man nur die Ergebnisse von Souman et al.¹³² die tagsüber durchgeführt wurden (keine Berücksichtigung von Studien in der Nacht und am späten Abend), so finden sich weniger positiv bewertete Studien zum Effekt von Licht auf die Aufmerksamkeit als in der Nacht und am Abend. Dabei konnte in dem Review aber kein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen und dem Tageszeitpunkt gefunden werden. In der Studie von Lok et al. war der Tageszeitpunkt am Tag ein Einschlusskriterium. Aus diesem Grund ergibt sich u.a. der Unterschied der jeweils eingeschlossenen Studien (Souman et al. n=38, Lok et al. n=19).

Nur wenige Studien haben den Tageszeitpunkt als Haupteffekt von Licht innerhalb einer Studie untersucht. Rüger et al.¹⁶⁷ untersuchte die Lichtexposition zu vier verschiedenen Tageszeitpunkten (0 Uhr, 4 Uhr, 12 Uhr, 16 Uhr) mit hellem Licht (500lx). Dabei konnte jedoch kein Einfluss der Tageszeit auf die subjektive Aufmerksamkeit (KSS) gemessen werden, da sich die Schläfrigkeit zu allen Zeiten nach der Lichtexposition verbesserte.

Eine aktuelle Studie von Lok et al.¹⁶² zeigt eine Latenz (6-9 Stunden) der subjektiven Aufmerksamkeit (KSS) bei Lichtexposition von hellem Licht (1300lx vs.6lx) innerhalb eines forcierten Desynchronisation Designs. Die objektive Aufmerksamkeit (PVT, Go/No-Go Test) erhöhte sich dabei signifikant im Go/No-Go Test, jedoch zeitunabhängig.

Beleuchtungsdauer

Die Beleuchtungsdauer der Lichtexposition ist ein wichtiger Parameter in der Beeinflussung der Aufmerksamkeit. Dabei werden in den Studien zu diesem Thema viele unterschiedliche Zeitfenster für die Lichtexposition benutzt. Betrachtet man auch hier die Literaturreviews (^{132,133}), dann werden unterschiedliche Beleuchtungszeiten von 5 Minuten bis 24 Stunden je nach Versuchsaufbau und Setting verwendet. Souman et al. untersuchten einen möglichen Effekt der Beleuchtungsdauer der ausgewählten Studien in Bezug auf die Auswirkung auf die Aufmerksamkeit, jedoch konnten sie keinen Zusammenhang erkennen. Es gab sowohl signifikante Effekte bei kurzer als auch bei langer Beleuchtungsdauer.

Für den Effekt unterschiedlicher Beleuchtungszeiten gibt es Studien, die Anhaltspunkte liefern. Dewan et al.¹⁶⁸ konnten bei 56 jungen Menschen feststellen, dass Licht mit einer moderaten Beleuchtungsstärke von 2000lx bei längerer Beleuchtungsdauer eine bessere Auswirkung auf den zirkadianen Rhythmus im Sinne einer Phasenverschiebung hat, als eine hohe Beleuchtungsstärke von 8000lx bei einer kurzen Beleuchtungsdauer. Ein direkter Einfluss auf die Aufmerksamkeit wurde jedoch nicht gemessen.

Dem stehen die Ergebnisse von Chang et al.¹⁶⁹ entgegen. In ihrer Studie untersuchten sie verschiedene Beleuchtungsdauern (0,2h, 1h, 2,5h, 4h, 6,5h) bei jeweils 10000lx Beleuchtungsstärke in der Nacht. Untersucht wurde dabei auch hier die Phasenverschiebung, zusätzlich aber noch die subjektive Aufmerksamkeit mittels KSS und die Melatoninsuppression. Dabei konnte ein positiver Effekt von kurzen Beleuchtungszeiten festgestellt werden, der sein maximum bei 0,2 Stunden hatte. Der Effekt war dabei jedoch nicht linear. Studien in den letzten Jahren konnten ebenfalls feststellen, dass kurze Beleuchtungszeiten von 0,2 sec^{170,171} und 0,75 sec¹⁷² einen Einfluss auf die Verschiebung des zirkadianen Rhythmus haben kann.

Rahman et al.¹⁷³ fanden in ihrer Studie heraus, dass eine kontinuierliche Lichtexposition von kurzwelligem monochromatischem Licht (460nm) in der Nacht die größte absolute Phasenverschiebung des zirkadianen Rhythmus hervorruft, jedoch eine intermittierende Lichtexposition (2 Minuten) von monochromatischem Licht mit einer Wellenlänge von 555nm die größte Phasenverschiebung pro Minute hat.

Lichthistorie

Den Einfluss von Licht auf den menschlichen Körper vor Beginn einer Studie zu quantifizieren oder gar zu vermeiden ist nicht immer vollumfänglich möglich. Dabei hat die Lichthistorie Auswirkung auf die Ergebnisse der durchgeführten Studie. So kann u.a. die Lichthistorie die Effektstärke je nach Lichtexposition verändern. Die Lichthistorie ist allein durch die Jahreszeit und die damit verbundene Sonneneinstrahlung von unterschiedlicher Natur. So kann man

davon ausgehen, dass untersuchte Personen, die im Winter morgens getestet werden, eine andere Lichthistorie aufweisen, als Personen, die am Nachmittag im Sommer getestet werden. Studien, die die Lichthistorie berücksichtigen, konnten diese Annahmen bestätigen. Hébert et al.¹⁷⁴ konnten in ihrer Studie feststellen, dass nach einer Zeitdauer von einer Woche Personen, die lichtabsorbierende Brillen während der Testung trugen, nach einer Lichtexposition eine erhöhte Melatoninsuppression in der Nacht aufwiesen als Personen ohne gedimmten Lichteinfluss. Jedoch zeigte sich bei den getesteten Personen eine hohe individuelle Differenz innerhalb der gemessenen Werte. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Smith et al.¹⁷⁵. Auch hier war die Melatoninsuppression nach einer Lichthistorie (Dauer zwei Tage) von 0,5lx im Vergleich zur Testgruppe von 200lx erhöht. Als weitere Studie mit übereinstimmendem Ergebnis kann auch die Studie von Chang et al.¹⁷⁶ angeführt werden. In einer Studie von Chang et al. wurden zwei Gruppen verglichen, die drei Tage lang einer Lichtexpositionen von entweder 1lx oder 90lx ausgesetzt waren. Es zeigte sich anschließend eine Erhöhung der subjektiven (VAS) sowie objektiven Aufmerksamkeit (PVT, EEG). Allen dargelegten Studien liegt jedoch zu Grunde, dass die Auswirkung der Lichthistorie immer in der Nacht gemessen wurde.

In der Studie von Huiberts et al.¹⁵⁸ zum Einfluss jahreszeitlicher Lichtunterschiede und deren Auswirkungen auf den menschlichen Körper wird der Einflussfaktor Lichthistorie als mögliche Erklärung für die Abhängigkeit der Ergebnisse von Jahreszeit zu Tageszeit herangezogen. Die getesteten Personen fühlten sich nach einer Lichtexposition (1700lx vs. 165lx) im Winter weniger müde und schnitten besser im PVT ab als im Frühling.

2.7. Ableitung der Fragestellung

Der Überblick zum Stand der Forschung über die Auswirkung von Licht auf die Aufmerksamkeit zeigt, dass eine große Bandbreite an Studien vorhanden ist. Jedoch wird auch deutlich, dass dabei kein einheitliches und genaues Bild existiert. Durch die vielen Einflussfaktoren des Lichts sind bis heute nicht eindeutig geklärt, unter welchen genauen Bedingungen sowie insbesondere konkreten Zahlenwerten bestimmte Wirkungen zu erwarten sind.

Dabei wird deutlich, dass beim Betrachten der Auswirkungen von Licht auf die Aufmerksamkeit Effekte auf die subjektive Aufmerksamkeit eher nachgewiesen werden können als bei der objektiven Aufmerksamkeit^{132,133}. So gibt es viele Studien, die einen Effekt von (blau angereichertem) kurzweiligem Licht auf die subjektive Aufmerksamkeit mittels Fragebögen nachweisen. In den anschließenden kognitiven Tests zur Messung der objektiven Aufmerksamkeit konnte hingegen nicht immer ein signifikanter Effekt gemessen werden.

Allerdings wurden unterschiedliche Tests zur Messung der objektiven Aufmerksamkeit verwendet (KSS, Go/No-GoTest, PVT). Aus diesem Grund ist die vergleichbare Datenlage geringer.

Gleichzeitig fällt bei der Betrachtung der Datenlage die Ungleichheit durchgeführter Studien bezüglich der Tageszeit auf. Der überwiegende Teil der Studien wurde am Abend oder in der Nacht durchgeführt. Dies ist verständlich, in Anbetracht der Tatsache, dass die Aufmerksamkeit in einem starken Abhängigkeitsverhältnis zum zirkadianen Rhythmus steht und Licht über die Supprimierung von Melatonin insbesondere am Abend und nachts modulierend wirkt.

Betrachtet man aber die Relevanz der Lichtauswirkungen auf die Aufmerksamkeit im Arbeitsmedizinischen Kontext, so wird ersichtlich, dass sie für den direkten klinischen Nutzen von großer Wichtigkeit ist. Denn sowohl das Personal im medizinischen Bereich als auch die Patient:innen sind u.U. mehrere Stunden zu jeder Tageszeit künstlichem Licht ausgesetzt.

In der Betrachtung zum aktuellen Stand der Forschung zeigte sich eine besondere Schwierigkeit. Aufgrund der unterschiedlichen Studiensettings ist die Vergleichbarkeit der Studien nicht immer oder nur eingeschränkt möglich. Dies wird insbesondere in den vorhandenen Literaturreviews als aktuelles Problem benannt¹³²⁻¹³⁴. Ein Einflussfaktor ist dabei die Lichthistorie der zu testenden Personen.

Aus den dargelegten Gründen ergibt sich aus wissenschaftlicher Sicht der Bedarf an weiterer Forschung zu diesem Thema. Die Fragestellung, die sich daraus für die Studie ableiten lässt, lautet:

- **Wie wirkt sich monochromatisches LED Licht (rot/blau) unter festen Parametern (Tageszeitpunkt, Lichthistorie, Beleuchtungsdauer) auf die Aufmerksamkeit aus?**
 - **Welchen Einfluss haben unterschiedliche Lichtspektren auf die objektive Aufmerksamkeit?**
 - **Welchen Einfluss haben unterschiedliche Lichtspektren auf die subjektive Aufmerksamkeit?**

Unsere Testungen fanden bewusst am Morgen statt und damit im Gegensatz zur Mehrheit der zu diesem Thema durchgeführten Studien nicht am Abend oder nachts. Im Vergleich zum Abend/Nacht statt. In unserem kontrollierten Versuchsaufbau wurde ein standardisierter Versuchsablauf geschaffen. Zudem schliefen die Probanden eine Nacht vorher in den Untersuchungsräumen, um eine vergleichbare Ausgangslage zu schaffen und um eine gleichzeitige Lichtexposition vor dem Versuch zu vermeiden. Zur untersuchten Auswirkung der

Lichtexposition auf die objektive Aufmerksamkeit mittels Aureson wurde zum Vergleich auch die subjektive Aufmerksamkeit mittels KSS untersucht.

Dabei war dieser Untersuchungsaspekt eingebettet in eine Versuchsreihe mit weiteren Fragestellungen, in denen der Einfluss von Licht auf den Cortisol Spiegel, die Schlafqualität und die Herzrate zum Inhalt hatte.

3. Materialien und Methoden

3.1. Patienten

Um physiologische, zirkadiane Einflüsse auf die Studie zu verringern, wurden ausschließlich männliche Probanden ausgewählt, da der hormonelle Zyklus der Frau das Cortisol-Level beeinflusst und somit die Testergebnisse verändern kann. Dies dient somit ausschließlich der Vergleichbarkeit der Daten.

3.2. Rekrutierung

Untersucht wurden männliche Probanden im Alter von 18 bis 35 Jahren. Diese wurden mittels eines Aushangs an der Sporthochschule Köln sowie als Mail-Aufruf über die verschiedenen Kohortengruppen der medizinischen Fakultät der Hochschule zu Köln generiert. Wenn sich die möglichen Probanden gemeldet haben, wurden sie vor der Studie gebeten, online über die Internetseite <https://app.surveygizmo.eu/login/v1> einen Fragebogen mit Ausschlusskriterien (s.u.) auszufüllen. Erfüllten die Probanden die vorausgesetzten Kriterien und nahmen sie an beiden Studientagen teil, bekamen sie dafür eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 100€. Das Geld wurde den Probanden über die Vergabestelle der Sporthochschule Köln überwiesen.

3.2.1. Einschlusskriterien

Die folgenden Einschlusskriterien dienten der Rekrutierung von Probanden der Studie:

Männlich

Alter zwischen 18 und 35 Jahren

Bereitschaft zur Abgabe von Speichelproben

Bereitschaft zur Messung der Herzrate durch eine Puls-Uhr

3.2.2. Ausschlusskriterien

Für die Studie wurden klare Ausschlusskriterien festgelegt, um Verzerrungen der Ergebnisse zu vermeiden und um die Homogenität der Stichprobe zu gewährleisten. Deshalb musste jeder Proband vor der Testung online einen standardisierten Fragebogen zu definierten Ausschlusskriterien ausfüllen. Nur wenn keines der Ausschlusskriterien gegeben war, durften die Probanden an der Studie teilnehmen. Diese Ausschlusskriterien waren:

- psychische Erkrankungen
- akute oder chronische Erkrankungen (Stoffwechselerkrankungen, Autoimmunerkrankungen, Bluterkrankungen, Herz-, Kreislauferkrankungen, chronisch-entzündliche Erkrankungen)
- Einnahme von Psychopharmaka
- kürzlich zurückliegende Impfungen (innerhalb der letzten zwei Wochen)
- Nikotinkonsum: > 10 Zigaretten/ Tag
- Body Mass Index: > 27kg/ m²

3.2.3. Durchführungsort

Getestet wurden die Probanden immer in den Räumen der Sporthochschule an der Eupener Straße 70, 50933 Köln. Die Probanden schliefen jeweils zu zweit in einem abgedunkelten Raum. Die Lichtexposition fand in einem gegenüberliegenden, ebenfalls lichtabgedunkelten Raum statt.

3.3. Einverständniserklärung/Datenschutz

Die Studie wurde durch die Ethikkommission der medizinischen Fakultät der Universität zu Dresden genehmigt (Nummer EK353092014) und die Probanden ausreichend vor jeder Testung informiert und aufgeklärt. Alle Probanden haben sich sowohl schriftlich als auch mündlich zur Teilnahme und Durchführung der Studie bereit erklärt.

Die Daten wurden durch ein Nummernsystem anonymisiert. Dies betraf alle erhobenen Daten der Speichelproben, der Aretim-Daten und der HRV-Daten. Die Listen für die Zuordnung der

Nummern zu den Probanden waren nur den Versuchsleitern zugänglich und wurden zu keinem Zeitpunkt an Dritte Weitergegeben.

3.4. Verwendete Geräte

3.4.1. Auretim

Die Auretim-Testung ist ein Test nach dem Prinzip der psychomotorischen Wachsamkeitsaufgabe (engl. Psychomotor Vigilance Task – PVT). Dieser Test ist etabliert und weit verbreitet in Studien zum Testen der Wachheit bzw. der Aufmerksamkeit von Probanden.^{116,117,177,178} In dieser Studie wurde eine 5-minütige Version benutzt, die der objektiven Erfassung der Aufmerksamkeit diente¹¹⁸. Es wurde bewusst ein auditiver Test bevorzugt, um visuelle Effekte neben der Lichtexposition auszuschließen¹¹⁷.

Bei dem verwendeten Auretim Gerät handelt es sich um einen auditiven Schnelligkeitsreaktionstest. Das Gerät wurde speziell von der TH Dresden für diese Studie entwickelt. Dabei werden in einem fünfminütigem Zeitintervall hohe und tiefe Töne in randomisierter Reihenfolge erzeugt und der Testperson über Kopfhörer zugespielt. Der Proband muss per Klickvorrichtung, die er mit einer Hand bedient, nur bei einer der Tonarten drücken. Das Gerät erfasst dabei sowohl die Fehlerrate falsch gedrückter Werte als auch die nichtgedrückten Werte und die Reaktionsgeschwindigkeit in Form von schnellsten und langsamsten gedrückten Werten. Darüber hinaus werden die Mittelwerte der Reaktionszeiten gemessen. Bei jedem Probanden wurde aus hygienischen Gründen die Kopfhörerstöpsel ausgetauscht und neue verwendet.



Abbildung 6: verwendetes Auretim-Gerät⁶

3.4.2. LED Kugeln

Für die Belichtung wurden zwei halbe Ulbricht-Kugeln verwendet. Diese wurden indirekt durch LEDs beleuchtet, die gleichmäßig verteilt auf der Innenseite um die Öffnung herum angeordnet waren. Die Öffnungsmaße für den Kopf waren ca. 28,5 cm in der Breite, 34 cm in der Höhe und 25 cm in der Tiefe. Die LEDs wurden mit einem spektralselektiven Diffusor abgedeckt, um eine homogene Ausleuchtung auf der Netzhaut der Teilnehmer zu gewährleisten. Die LEDs wurden computergesteuert (über USB zu DMX Controller) und über elektrische DC-Dimmer versorgt. Die Belichtung bestand aus folgenden Lichtverhältnissen: Schmalband-LEDs, blau (201 lx; Spitzenwellenlänge 470–480 nm); rot (235 lx; Spitzenwellenlänge 635 nm); grün (806 lx); helles weißes Licht (1240 lx; Mischung aus Blau, Grün und Rot); gedämpftes weißes Licht (<2 lx). Es wurde also immer annähernd die gleiche Beleuchtungsstärke (blau: 201lx vs. rot 235lx) verwendet und in der Studie vor allem die spektrale Verteilung geändert.

⁶ Quelle: eigene Darstellung

3.4.3. Luxometer

Mit dem Beleuchtungsmessgerät Pocket Lux 2 der Firma Lichtmesstechnik GmbH Berlin wurde die Beleuchtungsstärke der Lichtkugeln jeweils vor und nach der Testung im Abstand von 40 Zentimetern oberhalb der Höhe des Tisches und damit auf Augenhöhe gemessen um eine gleichbleibende Beleuchtungsstärke zu gewährleisten.

3.4.4. Polar-Uhr

Zur Generierung der HRV Daten (heart rate variability) wurde die Pulsuhr S810 der Firma Polar® Uhrensystem (Polar, Finnland) verwendet. Die RR-Intervalle wurden automatisch mittels eines Brustgurtes aufgezeichnet und unter Verwendung einer Handgelenksensoreinheit gespeichert. Die so erhobenen Daten wurden anschließend mittels einer Schnittstelle an einen Computer übertragen. Der S810 zeichnete mit einer Abtastfrequenz von 1.000 Hz auf, was eine zeitliche Auflösung von 1 ms pro RR-Periode ergab. Die Polar S-Software korrigiert Artefakte mithilfe eines Fehlerfilters und einer Beat Protection-Funktion. Für die HRV-Analyse wurde die Polar S-Software verwendet.

3.4.5. Aktigraphen

Als Aktigraphen haben wir die Motionlogger Watch und die Motionlogger WatchWare von der Firma Ambulatory Monitoring Inc. (Motionlogger® Watch von Ambulatory Monitoring Inc., Ardsley, USA) verwendet. Dabei wurde das Erwachen als der Übergang vom Schlaf zum Aufwachen nach Anwendung des UCSD-Schlafalgorithmus definiert. Die gesammelten PIM-Daten sind die in der AW2.7-Software implementiert. Der Algorithmus wendet eine gewichtete Summe der Aktivität in einem Sieben-Minuten-Intervall an, d.h. die vorhergehenden vier und die folgenden zwei Minuten der zu bewertenden Minute. Wenn der Wert unter 1 liegt, wird die jeweilige Minute als Schlaf gewertet, und wenn er über 1 liegt, als wach gewertet.

3.5. Verwendete Materialien

3.5.1. Salivetten

Zur Speichelgewinnung für die Bestimmung des Cortisols der Probanden wurden elf Stück pro Person benutzt. Dabei verwendeten wir ausschließlich die Salivetten der Firma Sarstedt aus Nümbrecht in Deutschland.

3.5.2. Fragebögen

Im Folgenden werden die einzelnen verwendeten Fragebögen aufgelistet und erläutert.

Sozialdemographischer Fragebogen

Der Fragebogen dient der Erhebung von Angaben zur eigenen Person, zur Nationalität, zum Familienstand und zu Bildung und Beruf.

Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI)

Der Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) ist ein selbstbewerteter Fragebogen, der die Schlafqualität und Störungen über einen Zeitraum von einem Monat bewertet. Neunzehn einzelne Elemente generieren sieben "Komponenten" -Werte: subjektive Schlafqualität, Schlaflatenz, Schlafdauer, gewohnte Schlafeffizienz, Schlafstörungen, Verwendung von Schlafmedikamenten und tagsüber auftretende Funktionsstörungen. Dadurch lässt sich speziell die Schlafqualität in klinischen Populationen erheben ¹⁷⁹.

Perceived Stress Scale (PSS)

Die Perceived Stress Scale (PSS) ist ein Maß dafür, inwieweit Situationen im eigenen Leben als stressig eingestuft werden. Sie erfasst, wie unvorhersehbar, unkontrollierbar und überlastet die Befragten ihr Leben empfinden. Die Skala enthält auch eine Reihe von direkten Abfragen zum aktuellen Niveau des erlebten Stresses. Bei den Fragen in der PSS geht es um Gefühle und Gedanken im Zeitraum des letzten Monats ¹⁸⁰⁻¹⁸².

Trier Inventar zum chronischen Stress (TICS)

Der Trierer Inventar zum chronischen Stress (TICS) eruiert chronische Stressoren durch ein Selbstbeurteilungsverfahren. Dabei werden verschiedene Bereiche im Zeitraum der letzten drei Monate abgefragt. Die Bereiche lassen sich in Folgende 9 Skalen zusammenfassen: Arbeitsüberlastung, Soziale Überlastung, Erfolgsdruck, Unzufriedenheit mit der Arbeit, Überforderung bei der Arbeit, Mangel an sozialer Anerkennung, Soziale Spannungen, Soziale Isolation und Chronische Besorgnis ^{183,184}.

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

Der Patient Health Questionnaire (PHQ) ist eine selbstverwaltete Version des PRIME-MD-Diagnoseinstruments und ein neues Instrument zur Erstellung Kriterien basierter Diagnosen für depressive und andere psychische Störungen, die in der Grundversorgung häufig auftreten. Der PHQ-9 ist das Depressionsmodul, das jedes der 9 DSM-IV-Kriterien mit „0“ (überhaupt nicht) bis „3“ (fast täglich) bewertet. Der PHQ bewertet 8 Diagnosen, unterteilt in Schwellenstörungen (Störungen, die bestimmten DSM-IV-Diagnosen entsprechen: Major Depression, Panikstörung, sonstige Angststörung und Bulimia Nervosa) und Störungen unterhalb der Schwelle (Störungen, deren Kriterien weniger Symptome umfassen als erforderlich sind) für spezifische DSM-IV-Diagnosen ¹⁸⁵.

„Short Form 12“, Kurzform vom „Short Form-36“

Der FS 12 erfasst mit seinen Fragen die gesundheitsbezogene Lebensqualität als Maß für physische und psychische gesundheitliche Verfassung. Die Bundesgesundheitsumfrage 1998 enthielt den Kurzbogen 36 als Instrument zur Messung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität. Als Ergebnis der subjektiven Bewertung durch 6964 Befragungsteilnehmer im Alter zwischen 18 und 80 Jahren wird eine Beschreibung einer neuen deutschen normativen Bevölkerungsstichprobe gegeben ¹⁸⁶⁻¹⁸⁸.

Fragebogen zum Cronotyp D-MEQ

Die deutsche Version des MEQ (Morningness-Eveningness-Questionnaires), kurz D-MEQ, erfasst die Identifizierung der subjektiven zirkadianen Phasenlage der Probanden. Er enthält 19 Fragen und verwendet dabei hauptsächlich 4 Auswahlmöglichkeiten, die einem bestimmten Morgentyp, einem moderaten Morgentyp, einem moderaten Abendtyp und einem bestimmten Abendtyp entsprechen ^{189,190}.

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

Das NEO-Fünf-Faktoren-Inventar (NEO-FFI-25) mit 25 Fragen ist eine deutsche Version des englischsprachigen NEO-FFI mit 60 Fragen von Costa und McCrae¹⁹¹. Er gibt ein präzises Maß für die fünf grundlegenden Persönlichkeitsfaktoren (Neurotizismus, Extraversion, Offenheit für Erfahrungen, Verträglichkeit und Gewissenhaftigkeit) ¹⁹².

Emotion Regulation Questionnaire (ERQ)

Der ERQ misst die individuellen Unterschiede im gewohnheitsmäßigen Gebrauch von zwei grundsätzlichen Emotionsregulationsstrategien: die kognitive Aufarbeitung und die expressive Unterdrückung. Er erfasst dabei Präferenzen der Unterdrückung und der Neubewertung als zwei Formen der Emotionsregulation. Dabei lassen sich die Strategien in zwei Bereiche einteilen; In die einen, die vor dem Aufkommen von Emotionen eintreten und in die, die nach dem Aufkommen der Emotion auftreten und somit als gerichtete Antwort darauf dienen ¹⁹³.

Fragebogen zur Gesundheits- Anamnese am Abend

In diesem Fragebogen werden am Abend Fragen zum Alkoholkonsum, zum Koffeinkonsum, zum allgemeinen Wohlbefinden und zur körperlichen Belastung gestellt.

Schlafberichtbogen an Morgen

Dieser Bogen fragt die subjektive Empfindung der Probanden der Schlafqualität ab. Dabei wird gezielt nach Schlafunterbrechungen und frühzeitigem Erwachen nachgefragt.

Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)

Der MDBF erfasst die aktuelle psychische Befindlichkeit sowohl von Jugendlichen als auch Erwachsenen. Dabei sollen verschiedene Adjektive zum aktuellen Wohlbefinden mit einer Skala von 1 „überhaupt nicht“ bis 5 „sehr“ bewertet werden ^{194,195}.

Karolinska Sleepiness Scale (KSS)

Die KSS dient zur Erfassung des objektiven Schläfrigkeitsgrades der Probanden und hat eine verbal verankerte 10-Punkte-Skala, die von 1 („äußerst wach“) bis 10 („äußerst schläfrig, kann nicht wach bleiben“) reicht. Sie stellt damit ein eindimensionales Testverfahren dar. Dieser wird jeweils vor und nach dem Schlafen durchgeführt, bzw. in dem Untersuchungssetting vor

und nach der Lichtexposition. Die KSS eine etablierte Skala zum Erfassen der Schläfrigkeit und wird in vielen verschiedenen Settings genutzt. Sie wurde erstmals von Åkerstedt und Gillberg 1990 erstellt und mit Hilfe von EEG-Aktivität validiert, sowie im weiteren Verlauf bestätigt^{110,196}.

3.6. Untersuchungsverlauf

3.6.1. Durchführung der Untersuchung

Die Probanden wurden an zwei verschiedenen Tagen mit mindestens 48-stündigem zeitlichen Abstand getestet um den Einfluss der zirkadianen Rhythmik kontrollieren zu können. Der Ablauf war an beiden Tagen identisch und unterschied sich nur im Farbspektrum der Lichtexposition. In randomisierter Reihenfolge verlief die Testung für die Probanden einmal die Lichtexposition mit blauem Licht mit einer Wellenlänge von 470–480 nm durch und einmal mit rotem Licht mit einer Wellenlänge von 635 nm.

Die Probanden wurden gebeten sich am Abend um 22 Uhr in den Räumlichkeiten der Kölner Sporthochschule auf der Eupener Straße in Köln einzufinden. Anschließend klärten wir sie nochmals über die Studie und deren Abläufe auf und ließen sie die Einverständniserklärung und Datenschutzerklärung unterschreiben. Es folgte ein Farbsehtest zum Ausschluss von Farbsehstörungen. Es wurden den Probanden der Untersuchungsraum gezeigt und die Stühle, sowie die Kinnstütze passend für sie voreingestellt. Im Anschluss füllten die Probanden folgende Fragebögen aus (Erläuterungen s.o.):

Sozialdemographischen Fragebogen

PSQI Schlafqualitätsbogen

Perceived Strass Scale

Trier Inventar zum chronischen Stress

Gesundheitsfragebogen PHQ-9

SF 12 – zur Erfassung der Lebensqualität

Fragebogen zum Chronotyp D-MEQ

NEO-FFI-25

Emotion Regulation Questionnaire

Gesundheitsanamnese am Abend

Bevor die Probanden um 23 Uhr angehalten waren zu schlafen, wurde ihnen für die Nacht ein Bewegungsmesser in Form einer Aktigraphen-Uhr angezogen um jegliche Bewegung in der Nacht aufzuzeichnen, was Rückschlüsse auf die Schlafqualität gibt. Die Probanden schliefen in einem abgedunkelten Raum um jegliche Lichtexposition vor der Testung zu vermeiden. Sollten die Probanden nachts auf Toilette müssen, konnten sie dies mit einer Verdunklungsbrille tun.

Morgens wurden die Probanden durch den/die Versuchsleiter*in um 6:30 Uhr geweckt und die Aktigraphen-Uhr gestoppt. Direkt im Anschluss wurde die erste der acht Speichelproben abgenommen. Des Weiteren wurde der erste der beiden KSS Bögen ausgefüllt. Es folgten die Speichelproben zwei und drei im 15 minütigen Takt.

Bevor um 7:30 Uhr die Lichtexposition startete, wurde den Probanden eine Puls Uhr zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität angelegt und der Start markiert. Mit dem Start der Lichtexposition wurden wieder im 15 minütigen Takt Speichelproben entnommen. Fünf Minuten nach dem Start der Lichtexposition fand die erste Aretim Testung statt. Diese wurde um 8:25 Uhr kurz vor Ende der Lichtexposition wiederholt. Nach dem Ende der Lichtexposition um 8:30 Uhr wurde die Polar Uhr eine Markierung gesetzt und die Probanden füllten nochmals den KSS aus. Im Anschluss Es wurden drei weitere Speichelproben um 8:45, 9:00 und 9:15 Uhr entnommen, wo auch eine Taktatmung für die verbesserte Aussagekräftigkeit der Daten der Polar Uhr um 8:50 erfolgte.

Um 9:15 Uhr war die Testung beendet und die Probanden konnten Räumlichkeiten verlassen.

CAR Messung

Nachdem die Probanden geweckt wurden, mussten sie drei Speichelproben mittels Salivetten zur CAR Wert Bestimmung abgeben. Dabei wurde stets darauf geachtet, dass die Probanden die Salivetten gut einspeichelten, um genug Probenmaterial zu gewinnen. Die Zeitintervalle waren dabei im 15-minütigen Takt um 6.30 Uhr direkt nach dem Wecken, um 6.45 Uhr und um 7:00 Uhr. Die CAR Werte (Cortisol awakening response) wurden separat von den anderen Cortisol Werten während der Lichtexposition erfasst, um den physiologischen Anstieg des Morgencortisols bestimmen zu können.

Lichtexposition

Nach der letzten CAR Wert Messung gab es eine 30-minütigen Pause, in der die Probanden ihre morgendlichen Verrichtungen nachgehen konnten. Dabei wurde darauf geachtet, dass sie keine Zähne putzten, um die Zeit mit störender Lichtexposition so kurz wie möglich zu halten.

Um 7:30 Uhr begann dann die eigentliche Lichtexposition. Die Lichtexposition dauerte insgesamt 60 Minuten. Auch hier wurden Speichelproben mittels Salivetten in 15-minütigen Zeitintervallen um 7:30 Uhr, um 7:45 Uhr, um 8:30 Uhr, um 8:15 Uhr und um 8:30 Uhr gesammelt. Für die Lichtexposition setzten sich die Probanden vor jeweils identische Tische mit den LED Lichtkugeln. Diese waren auf einem festen Stativ aufgebaut sodass die Kugel auf Kopfhöhe des sitzenden Patienten war. Mittels einer Kinnstütze konnten die Probanden ihren Kopf so absetzen, dass ihr Kopf soweit in der LED Halbkugel sich befindet, sodass das Gesichtsfeld vollständig von LEDs umgeben ist. Während der Lichtexposition durften die Probanden nicht die Augen für eine längere Zeit schließen, sondern sollten mit geöffneten Augen geradeaus gucken. Dies wurde vom Prüfungsleiter kontrolliert.

Die genauen Lichtspektren wurden von dem Versuchsleiter im Vorfeld auf die definierten Werte eingestellt (s.o.) und kurz vor dem Beginn mittels des Luxometers an einem definierten Punkt vor der Lichtkugel gemessen und überprüft und gegebenenfalls nochmals korrigiert.

Kurz vor und kurz nach der Lichtexposition wurde die Probanden gebeten den KSS Fragebogen auszufüllen (Erläuterung s.o.).

Nach der Lichtexposition wurde weiter in 15-minütigen Intervallen drei weitere Speichelproben mit Salivetten entnommen zu den Zeitpunkten 8:45 Uhr, 9:00 Uhr und 9:15 Uhr.

Auretim

Während der Lichtexposition wurde sowohl fünf Minuten nach dessen Anfang als auch fünf Minuten vor dessen Ende ein auditiver Aufmerksamkeitstest mittels dem Auretim Gerät durchgeführt (Kapitel 3.4.1). Dabei wurden den Probanden Kopfhörer mit jeweils neuen Ohrstöpseln ausgehändigt sowie ein Druckknopf in die Hand gegeben. Dieser sollte betätigt werden, wenn ein tiefer Ton ertönt. Bei dem hohen Ton sollten die Probanden nicht drücken. Der Test insgesamt dauerte etwa eine Minute. Dadurch ergaben sich je zwei Datensätze pro Proband mit Daten zu verfehlten Werten, falsch positiven Werten, Maximum und Minimum der Reaktionsgeschwindigkeit, sowie die Mittelwerte. Der Datensatz wurde anschließend nach jeder Testung mittels USB Stick auf einen eigens für die Studie eingerichteten Laptop überspielt.

HRV Daten

Mit Beginn der Lichtexposition wurde auch die Herzfrequenzvariabilität bestimmt (aus dem englischen HRV – heart rate variability). Dafür wurde den Probanden kurz vor der Lichtexposition eine Polar Uhr mit Herzfrequenz-Sensor Brustgurt angelegt. Nach Beendigung der Lichtexposition wird ein Marker gesetzt, die Messung läuft weiter bis zum Ende der Testung um 9:15 Uhr. Um eine Baseline zur Frequenzkontrolle unter Ruhepuls zu generieren,

wurde 8:45 Uhr eine Taktatmung durchgeführt, wobei die Probanden drei Minuten lang jeweils drei Sekunden ein und drei Sekunden ausgeatmet haben.

Die HRV Daten wurden wie auch bei den Daten von Auretim nach jeder Testung von der Uhr mittels Infrarot Schnittstelle auf einen eigens für die Studie eingerichteten Laptop überspielt.

3.7. Ausschluss von Farbsehstörungen

Da durch eine Farbsehstörung die erhobenen Werte vermindern bzw. verändern können, wurde vor der ersten Lichtexposition ein Farbsehtest durchgeführt. Die Farbsehstörung kann dabei erworben oder angeboren sein. Erworbene Farbsehstörungen können u.a. als Folge von Medikamenteneinnahme oder durch Entzündungen entstanden sein, die an unterschiedlichen Stellen im Auge auftreten können.

Die Mehrheit der angeborenen Farbsehstörungen beruht auf dem Fehlen eines bestimmten Opsins. So ist die häufigste Farbsehstörung die Rot/Grün-Sehschwäche, welche aufgrund ihrer X-chromosomalen rezessiven Vererbung mehr Männer als Frauen betrifft¹⁹⁷.

Um eine Farbsehstörung bei unseren Probanden auszuschließen, wurde ein Farbtafel-Test durchgeführt. In unserer Studie wurde ein Farbtafel-Test verwendet, welcher Tafeln zur Diagnose von angeborenen sowie erworbenen Farbsinnesstörungen beinhaltetete.

3.8. Aufbewahrung der Speichelproben

Die Speichelproben wurden durch Sarstedt Cortisol Salivetten von dem Versuchsleiter nach der Testung umgehend in einen Kühlschrank zur Lagerung gebracht. Dort wurden sie gesammelt und nach einigen Tagen in speziellen Kühlpaketen nach Dresden in das Labor Kirschbaum der psychologischen Fakultät der technischen Universität Dresden geschickt.

Jede Salivette wurde mit einer Nummer versehen und somit anonymisiert. Nur die Versuchsleiter hatten Zugriff auf die Listen mit der Zuteilung der Salivetten Nummern zu den Probanden.

3.9. Auswertung der Speichelproben

Alle verwendeten Salivetten wurden im Labor Kirschbaum in Dresden ausgewertet. (s.o.). Als Verfahren wurde hierzu ein kompetitives Luminescence Immunassay der Firma IBL verwendet. Hierbei werden mit Fluoreszein markierte Antikörper der Probe zugeführt, um die Menge des Kortisols quantitativ zu bestimmen.

3.10. Statistische Auswertung

Die gesamte statistische Auswertung wurde mit dem Programm SPSS Version 27 von der Firma IBM durchgeführt.

Neben der Erhebung der soziodemografischen Daten mittels deskriptiver Statistik, wurden weitere Berechnungen durchgeführt:

1. Es wurde eine Multivarianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung berechnet. Dabei wurde der Einfluss der Lichtexpositionen (rot/blau) und der Zeit (vorher/nachher) auf die *falsch positiven* Werte im Aretim-Test untersucht.
2. Es wurde eine Multivarianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung berechnet. Dabei wurde der Einfluss der Lichtexpositionen (rot/blau) und der Zeit (vorher/nachher) auf die *nicht gedrückten* Werte im Aretim-Test untersucht.
3. Es wurde eine Multivarianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung berechnet. Dabei wurde der Einfluss der Lichtexpositionen (rot/blau) und der Zeit (vorher/nachher) auf die *Mittelwerte* im Aretim-Test untersucht.
4. Es wurde eine Multivarianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung berechnet. Dabei wurde der Einfluss der Lichtexpositionen (rot/blau) und der Zeit (vorher/nachher) auf die *Ergebnisse der Karolinska Sleepingness Scale* untersucht.

5. Es wurde eine Multivarianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung berechnet. Dabei wurde der Einfluss der Lichtexpositionen (rot/blau) und der Zeit (vorher/nachher) auf die *schnellsten Werte* im Auretim-Test untersucht.
6. Es wurde eine Multivarianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung berechnet. Dabei wurde der Einfluss der Lichtexpositionen (rot/blau) und der Zeit (vorher/nachher) auf die *langsamsten Werte* im Auretim-Test untersucht.

Eine Prüfung auf Sphärizität mittels eines Testes (z.B. des Mauchly-Testes) wurde nicht durchgeführt, da bei den gemessenen ANOVAs mit Messwiederholung der Innersubjektfaktor jeweils nur zwei Stufen hatte und somit die Sphärizität gegeben war.

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchung sollen die Frage beantworten, wie sich die Lichtexposition von rotem und blauem Licht auf die Aufmerksamkeit auswirkt. Dabei wurden sowohl Daten des Aretim-Testes untersucht als auch die subjektiven Ergebnisse des Fragebogens der Karolinska Sleepingness Scale ausgewertet.

4.1. Charakteristik der Stichprobe

Die untersuchte Stichprobe $N=13$ besteht ausschließlich aus männlichen Probanden im Alter von 21 bis 28 Jahren mit einem durchschnittlichen Alter von 24 Jahren ($M=23,54$, $SD \pm 2,11$). Sie ist Teil einer größeren Gruppe von $N=27$ männlichen Personen im Alter von 20 bis 35 Jahren mit einem durchschnittlichen Alter von 26 Jahren ($M=25.63$, $SD \pm 6,86$). Anhand dieser sind die Ergebnisse der Karolinska Sleepingness Scale (KSS) untersucht worden. Die Untergruppe ($N=13$) der untersuchten Probanden ergab sich aus den vorhandenen Datensätzen für rot und blau bei denselben Personen und bildet den Datensatz für die objektiv gemessene Aufmerksamkeit durch die Aretim Messung.

Als weitere statistische Mittel wurden neben dem Alter der Familienstand, der Schulabschluss und der Berufsabschluss erhoben. In der Stichprobe waren bezüglich des Familienstandes alle Probanden ledig. Des Weiteren besaßen alle Probanden überwiegend einen hohen Schulabschluss (13 Jahre). Der Berufsabschluss zeigte sich dahingehend diverser.

Die soziodemografischen Daten sind tabellarisch in der Tabelle 1 auf der nächsten Seite dargestellt.

Tabelle 1: Soziodemografische Daten, Quelle: eigene Darstellung

Anzahl (n)		27	13
Alter		25.63(6.86)	23,54(2.11)
Geschlecht			
	Männlich	27	13
	Weiblich	0	0
Familienstand			
	ledig	25	13
	verheiratet	2	0
	getrennt lebend	0	0
	geschieden	0	0
	verwitwet	0	0
	wieder verheiratet	0	0
Schulabschluss			
	≤9 Jahre	0	0
	10 Jahre	2	0
	≥12 Jahre	25	13
Berufsabschluss			
	noch in Ausbildung	5	4
	Lehre/Fachschule	3	2
	Meister	0	0
	Fachhochschule/Universität	14	5
	ohne Berufsabschluss	3	2
	Sonstiges	2	0

4.2. Einfluss der Lichtexposition auf die Schläfrigkeit anhand der Karolinska Sleepingness Scale (KSS)

Um den Einfluss der Lichtexposition auf die Schläfrigkeit zu analysieren, wurde eine 2 x 2 messwiederholte Varianzanalyse mit Lichtexposition (rot vs. blau) und Zeit (vor- vs. nach-Lichtexposition) als unabhängigen Variablen und der Schläfrigkeit gemessen mit der KSS-Skala durchgeführt. Hierbei zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt für die Zeit, $F(1, 26) = 8.14$, $p = .008$, $\eta^2_p = .238$. Dies bedeutet, dass die Teilnehmer nach der Lichtexposition signifikant niedrigere Werte in Bezug auf die Schläfrigkeit Angaben als vor der Lichtexposition (siehe Graphik 1). Hierbei zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt für die Art der Lichtexposition, $F(1, 26) = 0.36$, $p = .551$, $\eta^2_p = .014$. Dies bedeutet, dass sich die angegebene Schläfrigkeit nicht signifikant in Bezug auf die Art der Lichtexposition unterschied.

Weiteren zeigte sich kein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Zeit und der Art der Lichtexposition, $F(1, 26) = 0.75$, $p = .786$, $\eta^2_p = .003$. Dies bedeutet, dass der Effekt der Zeit sich nicht zwischen der Art der Lichtexposition signifikant unterschied.

Tabelle 2: Varianzanalyse mit Messwiederholung anhand der KSS, Quelle: eigene Darstellung

	Quadrat- summe	F	df	p	η^2_p
Lichtexposition	1,33	,364	1	,551	,014
Zeit	21,33	8,137	1	,008	,238
Lichtexposition x Zeit	,148	,075	1	,786	,003

Hinweis: F = F-Wert; df =Freiheitsgrade; p =Signifikanzniveau

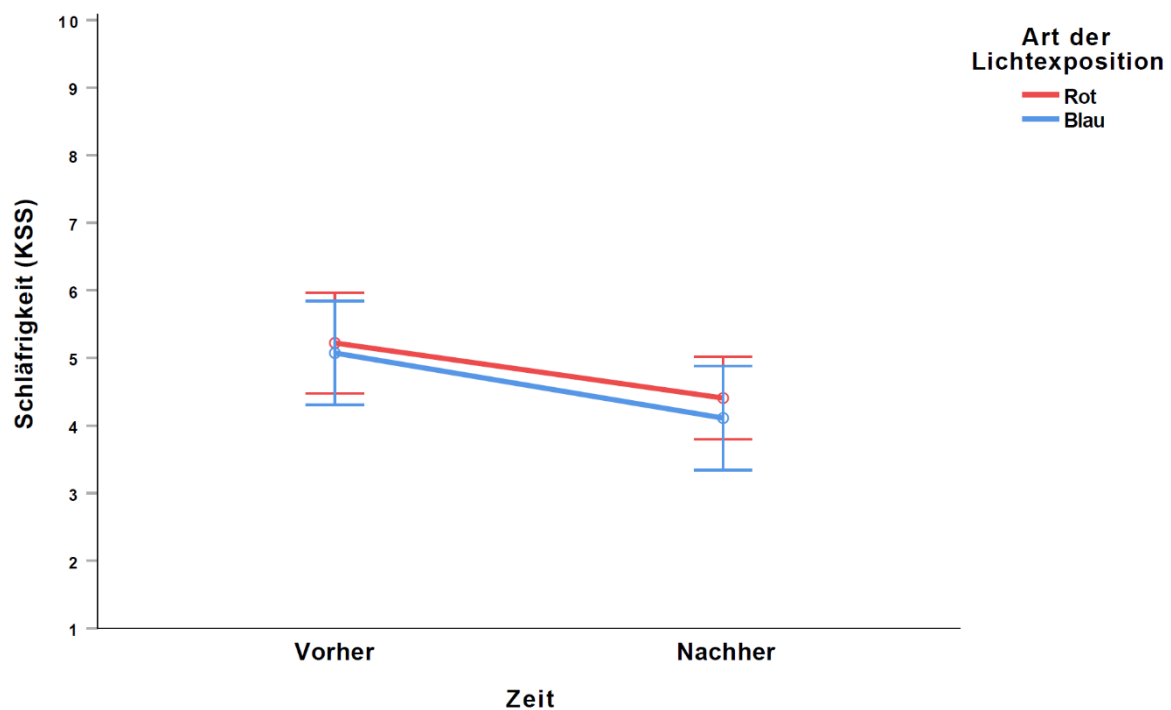


Abbildung 7: Einfluss der Lichtexposition auf die Zeit in Bezug auf die KSS

4.3. Einfluss der Lichtexposition auf die in Aretim erhobenen nicht gedrückten Werte

Um den Einfluss der Lichtexposition auf die Aufmerksamkeit zu analysieren, wurde eine 2 x 2 messwiederholte Varianzanalyse mit Lichtexposition (rot vs. blau) und Zeit (vor- vs. nach-Lichtexposition) als unabhängigen Variablen und der Aufmerksamkeit gemessen mit den nicht gedrückten Reaktionseinheiten im Aretim-Test durchgeführt. Hierbei zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt für die Lichtexposition, $F(1,12) = .438$, $p = .521$, $\eta^2_p = .035$. Dies bedeutet, dass sich die Anzahl verpasster Reaktionseinheiten nicht signifikant in Bezug auf die Art der Lichtexposition unterschied.

Ebenfalls zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt für die Zeit, $F(1,12) = .165$, $p = .692$, $\eta^2_p = .014$. Dies bedeutet, dass die Teilnehmer nach der Lichtexposition nicht signifikant weniger nicht gedrückte Reaktionseinheiten in Bezug auf die Aufmerksamkeit aufwiesen, als vor der Lichtexposition. Des Weiteren zeigte sich kein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Art der Lichtexposition und der Zeit, $F(1,12) = .819$, $p = .383$, $\eta^2_p = .064$. Dies bedeutet, dass der Effekt der Zeit sich nicht zwischen der Art der Lichtexposition signifikant unterschied.

Im Folgenden sind die Daten tabellarisch dargestellt.

Tabelle 3: Varianzanalyse mit Messwiederholung der nicht gedrückten Werte im Aretim-Test, Quelle: eigene Darstellung

	Quadrat- summe	F	df	p	η^2_p
Lichtexposition	.942	.438	1	.521	.035
Zeit	.173	.165	1	.692	.014
Lichtexposition x Zeit	.942	.819	1	.383	.064

Hinweis: F = F-Wert; df =Freiheitsgrade; p =Signifikanzniveau; η^2_p =Effektstärke

4.4. Einfluss der Lichtexposition auf die im Aurretim-Test erhobenen falsch positiv gedrückten Werte

Um den Einfluss der Lichtexposition auf die Aufmerksamkeit zu analysieren, wurde eine 2 x 2 messwiederholte Varianzanalyse mit Lichtexposition (rot vs. blau) und Zeit (vor- vs. nach-Lichtexposition) als unabhängigen Variablen und der Aufmerksamkeit gemessen mit den falsch positiven Reaktionseinheiten im Aurretim-Test durchgeführt. Hierbei zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt für die Lichtexposition, $F(1,12) = .2,083$, $p = .175$, $\eta^2_p = .148$. Dies bedeutet, dass sich die Anzahl falsch gedrückter Reaktionseinheiten nicht signifikant in Bezug auf die Art der Lichtexposition unterschied.

Ebenfalls zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt für die Zeit, $F(1,12) = 0$, $p = 1,00$, $\eta^2_p = 0$. Dies bedeutet, dass die Teilnehmer nach der Lichtexposition nicht signifikant weniger falsch positiv gedrückte Reaktionseinheiten in Bezug auf die Aufmerksamkeit aufwiesen, als vor der Lichtexposition. Des Weiteren zeigte sich kein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Art der Lichtexposition und der Zeit, $F(1,12) = .2,97$, $p = .11$, $\eta^2_p = .198$. Dies bedeutet, dass der Effekt der Zeit sich nicht zwischen der Art der Lichtexposition signifikant unterschied.

Im Folgenden sind die Daten tabellarisch dargestellt.

Tabelle 4: Varianzanalyse mit Messwiederholung der falsch positiv gedrückten Werte im Aurretim-Test, Quelle: eigene Darstellung

	Quadrat-summe	F	df	p	η^2_p
Lichtexposition	1.923	2.083	1	.175	.148
Zeit	0	0	1	1	0
Lichtexposition x Zeit	3.769	2.97	1	.11	.198
Hinweis: F = F-Wert; df =Freiheitsgrade; p =Signifikanzniveau					

4.5. Einfluss der Lichtexposition auf die im Aretim-Test erhobenen Mittelwerte

Um den Einfluss der Lichtexposition auf die Aufmerksamkeit zu analysieren, wurde eine 2 x 2 messwiederholte Varianzanalyse mit Lichtexposition (rot vs. blau) und Zeit (vor- vs. nach-Lichtexposition) als unabhängigen Variablen und der Aufmerksamkeit gemessen anhand der Mittelwerte im Aretim-Test durchgeführt. Hierbei zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt für die Art der Lichtexposition, $F(1,12) = 0.475$, $p = .504$, $\eta^2_p = .038$. Dies bedeutet, dass sich die angegebene Aufmerksamkeit anhand der Mittelwerte nicht signifikant in Bezug auf die Art der Lichtexposition unterschied. Es zeigte sich zudem kein signifikanter Haupteffekt für die Zeit, $F(1,12) = 2.51$, $p = .139$, $\eta^2_p = .173$. Dies bedeutet, dass die Teilnehmer nach der Lichtexposition keine signifikant niedrigere Mittelwerte im Aretim-Test Bezug auf die Aufmerksamkeit angaben, als vor der Lichtexposition. Des Weiteren zeigte sich jedoch ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Zeit und der Art der Lichtexposition, $F(1, 12) = 5.1$, $p = .043$, $\eta^2_p = .298$. Dies bedeutet, dass der Effekt der Zeit sich zwischen der Art der Lichtexposition signifikant unterschied.

Tabelle 5: Varianzanalyse mit Messwiederholung der Mittelwerte der gedruckten Werte im Aretim-Test, Quelle: eigene Darstellung

	Quadrat-summe	F	df	p	η^2_p
Lichtexposition	806,203	.475	1	.504	.038
Zeit	3958,358	2.505	1	.139	.173
Lichtexposition x Zeit	5026,472	5.101	1	.043	.298
Hinweis: F= F-Wert; df=Freiheitsgrade: p=Signifikanzniveau					

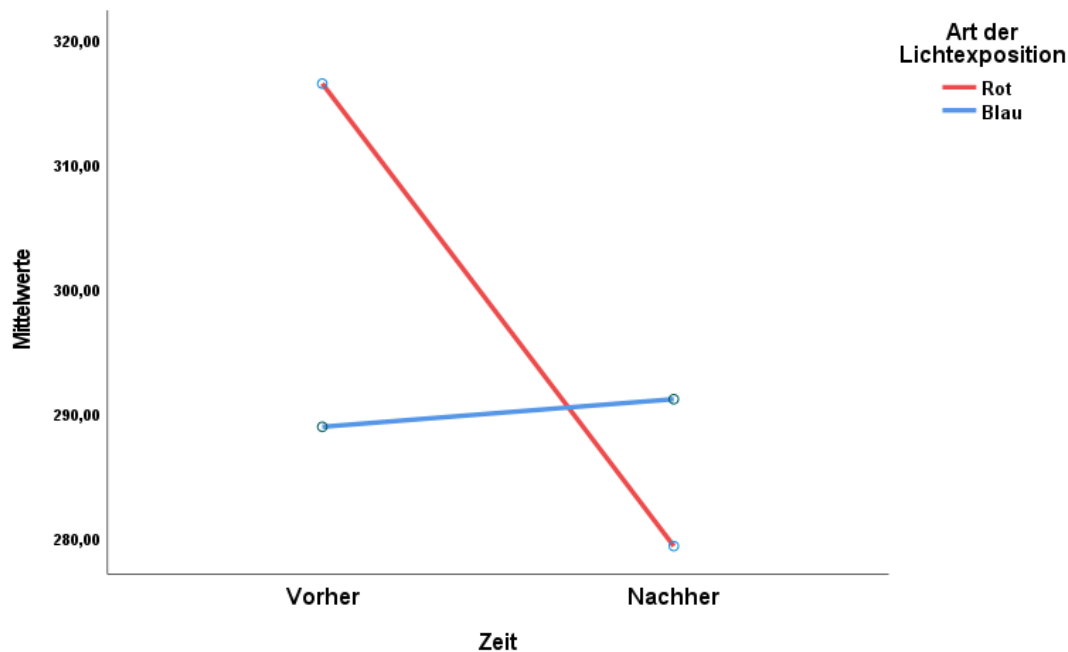


Abbildung 8: Einfluss der Lichtexposition auf die Zeit in Bezug auf die Mittelwerte⁷

4.6. Einfluss der Lichtexposition auf die im Aurretim-Test erhobenen kürzesten Reaktionszeiten

Um den Einfluss der Lichtexposition auf die Aufmerksamkeit zu analysieren, wurde eine 2 x 2 messwiederholte Varianzanalyse mit Lichtexposition (rot vs. blau) und Zeit (vor- vs. nach-Lichtexposition) als unabhängigen Variablen und der Aufmerksamkeit gemessen anhand der kürzesten Reaktionszeiten im Aurretim-Test durchgeführt. Hierbei zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt für die Art der Lichtexposition, $F(1,12) = 224$, $p = .644$, $\eta^2_p = .018$. Dies bedeutet, dass sich die Aufmerksamkeit anhand kürzesten Reaktionszeiten nicht signifikant in Bezug auf die Art der Lichtexposition unterschied. Es zeigte sich zudem kein signifikanter Haupteffekt für die Zeit, $F(1,12) = .004$, $p = .952$, $\eta^2_p = 0$. Dies bedeutet, dass die Teilnehmer nach der Lichtexposition keine signifikant kürzeren Reaktionszeiten im Aurretim-Test Bezug erreichten, als vor der Lichtexposition. Des Weiteren zeigte sich jedoch ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Zeit und der Art der Lichtexposition, $F(1,12) = 6.36$, $p = .027$, $\eta^2_p = .346$. Dies bedeutet, dass der Effekt der Zeit sich zwischen der Art der Lichtexposition signifikant in Bezug auf die kürzesten Reaktionszeiten unterschied.

⁷ Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 6: Multivarianzanalyse mit Messwiederholung mit den Werten der kürzesten Reaktionszeiten im Aretim-Test, Quelle: eigene Darstellung

	Quadrat- summe	F	df	p	η^2_p
Lichtexposition	897,231	.224	1	.644	.018
Zeit	4.923	.004	1	.952	0
Lichtexposition x Zeit	11541.269	6.36	1	.027	.346

Hinweis: F = F-Wert; df =Freiheitsgrade: p =Signifikanzniveau

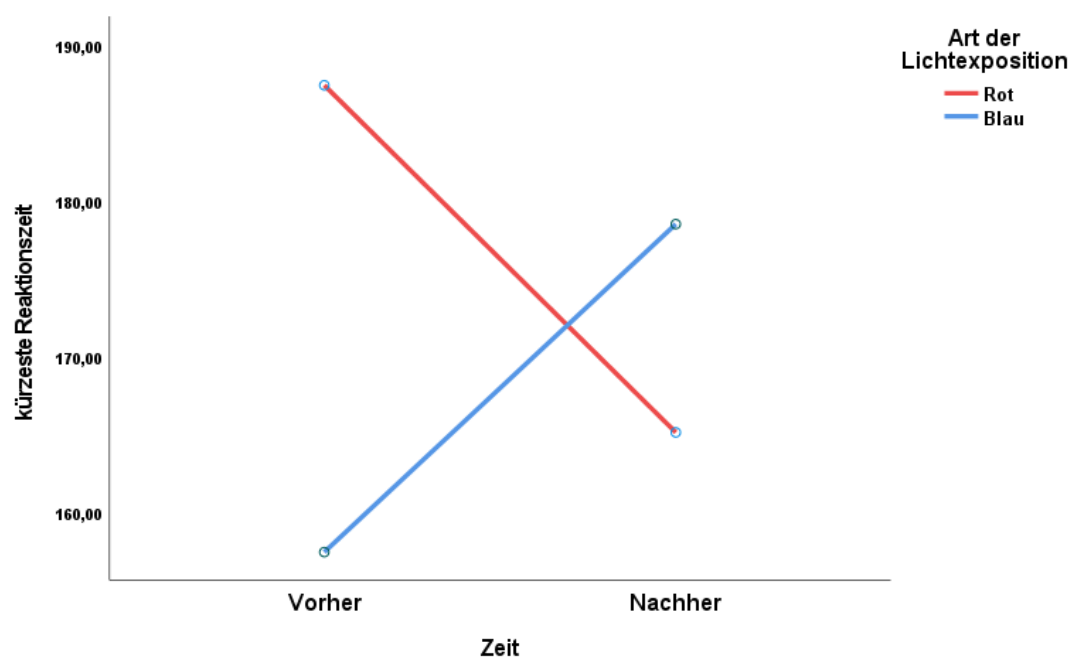


Abbildung 9: Einfluss der Lichtexposition auf die Zeit im Bezug auf die kürzeste Reaktionszeit⁸

⁸ Quelle: Eigene Darstellung

4.7. Einfluss der Lichtexposition auf die im Aurretim-Test erhobenen längsten Reaktionszeiten

Um den Einfluss der Lichtexposition auf die Aufmerksamkeit zu analysieren, wurde eine 2 x 2 messwiederholte Varianzanalyse mit Lichtexposition (rot vs. blau) und Zeit (vor- vs. nach-Lichtexposition) als unabhängigen Variablen und der Aufmerksamkeit gemessen anhand der längsten Reaktionszeiten im Aurretim-Test durchgeführt. Hierbei zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt für die Art der Lichtexposition, $F(1,12) = 3.225$, $p = .504$, $\eta^2_p = .212$. Dies bedeutet, dass sich die angegebene Aufmerksamkeit anhand der längsten Reaktionszeiten nicht signifikant in Bezug auf die Art der Lichtexposition unterschied. Es zeigte sich zudem kein signifikanter Haupteffekt für die Zeit, $F(1,12) = .022$, $p = .883$, $\eta^2_p = .002$. Dies bedeutet, dass die Teilnehmer nach der Lichtexposition keine signifikant längeren Reaktionszeiten im Aurretim-Test Bezug auf die Aufmerksamkeit angaben, als vor der Lichtexposition. Des Weiteren zeigte sich ebenfalls kein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Zeit und der Art der Lichtexposition, $F(1,12) = 2.317$, $p = .157$, $\eta^2_p = .162$. Dies bedeutet, dass der Effekt der Zeit sich zwischen der Art der Lichtexposition in Bezug auf die längsten Reaktionszeiten nicht signifikant unterschied.

Tabelle 7: Multivarianzanalyse mit Messwiederholung den Werten der am langsamsten gedrückten Reaktionszeiten im Aurretim-Test, Quelle: eigene Darstellung

	Quadrat- summe	F	df	p	η^2_p
Lichtexposition	43500.308	3.225	1	.504	.212
Zeit	848.077	.022	1	.883	.002
Lichtexposition x Zeit	345377.077	2.317	1	.154	.162

Hinweis: F = F-Wert; df =Freiheitsgrade; p =Signifikanzniveau

5. Diskussion

Die durchgeführte Studie betrachtete, als eine der wenigen, die Auswirkungen der Lichtexposition auf die Aufmerksamkeit unter kontrollierten und vergleichbaren Laborbedingungen. Die Ergebnisse der Studie konnten jedoch die aufgestellten Hypothesen aus Kapitel 2.7 nicht in vollem Umfang bestätigen. Der Einfluss von blauem und rotem LED Licht auf die objektive Aufmerksamkeit konnte nicht bestätigt werden. Der Einfluss von rotem und blauem LED auf die subjektive Aufmerksamkeit konnte jedoch zum Teil in der Studie belegt werden.

5.1. Interpretation und Einordnung

5.1.1. Lichteinfluss auf die objektive Aufmerksamkeit

Die objektive Aufmerksamkeit wurde in der erhobenen Studie anhand von Reaktionsschnelligkeitstests gemessen^{116,117}. Als einer von mehreren Tests wurde in dieser Studie ein auditiver Go/NoGo-Test verwendet, welcher insbesondere bei Studien zur Lichtexposition benutzt wird. Untersucht wurden in dem Test die Mittelwerte, falsch gedrückte Werte, kürzeste und längste Reaktionszeit und nicht gedrückte Werte. Dabei konnte eine Signifikanz in der Interaktion zwischen den Einflussfaktoren der Lichtexposition (rot/blau) und der Zeit in den Gruppen der kürzesten Reaktionszeit ($p=.027$) und der Mittelwerte ($p=.043$) gemessen werden. Dies bedeutet, dass der Effekt der Zeit sich zwischen der Art der Lichtexposition signifikant in Bezug auf die kürzesten Reaktionszeiten und der Mittelwerte unterschied. Zur genauen Einordnung muss man die Ergebnisse jedoch im Detail betrachten. Betrachtet man die Ausgangswerte der Gruppen rot und blau, besteht eine große Differenz in den Reaktionswerten schon zu Beginn der Lichtexposition (kürzeste Reaktionszeit: rot $M=187,38\text{ms}$, blau $M=157,38\text{ms}$; Mittelwerte: rot $M=316,39\text{ms}$, blau $M=288,85\text{ms}$). Durch das Studiendesign, welches ein kontrolliertes Aufwachen am Morgen unter Vermeidung von Lichteinfluss gewährleistete, stellten wir die Vermutung auf, dass durch diese Vermeidung die Ausgangswerte annähernd gleich sein würden. Vergleicht man dahingehend die Studienlage, so ergibt sich auch hier ein uneinheitliches Bild. Während die Werte in der Studie von Figueiro et. al.¹⁹⁸ annähernd gleich waren, sind sie in einigen Studien abweichend^{44,199,200}. Daraus lässt sich ableiten, dass es noch weitere Faktoren gegeben haben muss, die Einfluss auf die Reaktionsfähigkeit genommen haben. Diese Einflussfaktoren konnten wir in unserer Studie

jedoch nicht messbar nachweisen. Dahingehend ergibt sich die Möglichkeit und der Bedarf für weitere Studien, insbesondere mit der besonderen Betrachtung der Lichthistorie der getesteten Personen.

Gleichzeitig wird deutlich, dass unter der Lichtexposition von blauem Licht der Mittelwert im Go/NoGo-Test in unserer Studie zunimmt ebenso wie der Wert der kürzesten Reaktionszeit. Unter roter Lichtexposition verhält es sich umgekehrt. So nimmt der Mittelwert ab und der Wert der kürzesten Reaktionszeit verringert sich. Aus den oben genannten Gründen erscheinen diese Werte damit jedoch als fraglich aussagekräftig.

Auch wenn die gemessenen Werte auf Grundlage von annähernd gleichen Anfangswerten erhoben worden wären, könnte dies nicht mit dem bekannten Mechanismus der Melatoninsuppression durch kurzwelliges blaues Licht erklärt werden.

Über die viel erforschte Verarbeitung und Weiterleitung von speziell sensiblen kurzwelligen Lichtwellen über die ipRGC, wäre der gegenteilige Effekt zu erwarten gewesen. Hier hätte sich eine Zunahme der Aufmerksamkeit in den gemessenen Werten vermutlich wiedergespiegelt^{44,198,200}. Zudem ist der Zeitpunkt am Morgen so gewählt, dass von einem stark sinkenden Melatoninspiegel ausgegangen werden kann, als Folge der natürlichen zirkadianen Rhythmik. Dennoch gibt es Studien die einen positiven Einfluss von rotem langwelligem Licht auf die Aufmerksamkeit belegen²⁰¹. Plitnick und sein Team schließen aus ihren Ergebnissen auf einen weiteren, bisher unbekannten, Mechanismus der Beeinflussung der Aufmerksamkeit, welcher u.U. auch in unseren gemessenen Werten eine Rolle gespielt haben könnte²⁰¹. Dies ist in weiteren Studien genauer zu erforschen. Durch die oben erwähnte Diskrepanz der Ausgangswerte lässt sich aus den gemessenen Ergebnissen keine klare Aussage zur Einwirkung von Licht auf die objektive Aufmerksamkeit formulieren.

Betrachtet man die Studienlage der letzten Jahre so ergibt sich auch dort kein homogenes Bild bezogen auf die Aufmerksamkeit. Zu diesem Ergebnis kamen auch Souman et al.¹³² in ihrem Literaturreview. Aus dem Zeitraum von 1990 bis 2016 untersuchten nur 16 Studien die objektive Aufmerksamkeit anhand eines Reaktionsschnelligkeitstest. Aus dieser Gruppe konnten nur zwei Studien signifikante Unterschiede am Tage feststellen. Der Rest fand keine Signifikanzen. Diese Studien bezogen sich auf polychromatisches weißes Licht und nicht auf monochromatisches Licht, wie das in unserer Studie der Fall war. Aufgrund dieser unterschiedlichen Merkmale in den verschiedenen Studien unterteilten Souman et al. die Studien in zwei Gruppen. In Abhängigkeit der Variable, welche untersucht wurde, wurde einmal nach der spektralen Verteilung unterteilt und einmal nach der Beleuchtungsstärke. Die meisten Studien untersuchten den Einfluss von weißem polychromatischem Licht auf die Aufmerksamkeit mittels Reaktionsschnelligkeitstest, wo ein mehrheitlicher signifikanter Einfluss bezogen auf die objektive Aufmerksamkeit gefunden werden konnte. Betrachtet man die Studienlage auf Basis von monochromatischem Licht, ist diese nochmals geringer, was die

Einordnung unserer Studienergebnisse erschwert. Hier haben lediglich acht Studien die Auswirkung von monochromatischem Licht auf die Aufmerksamkeit mittels Reaktionsschnelligkeitstest gemessen. Im Gegensatz zur subjektiven Aufmerksamkeit konnte hier die Auswirkung auf die objektive Aufmerksamkeit in fünf Studien belegt werden (wovon vier Studien den Effekt bei blauem Licht nachweisen konnten und eine Studie bei grünem Licht). Hier zeichnet sich ein direkter Einfluss von monochromatischem Licht auf die Aufmerksamkeit ab. In unserer Studie konnten diese Ergebnisse jedoch nicht reproduziert werden. Die geringe Studienlage, insbesondere von monochromatischen Lichtspektren und deren Auswirkungen auf die Aufmerksamkeit, verdeutlicht gleichzeitig den Bedarf weiterer Forschung in diesem Bereich. Die Ergebnisse der anderen erhobenen Werte im Go/NoGo-Test (längste Reaktionszeit, falsch positive Werte und verpasste Reaktionen) ergaben keine weiteren signifikanten Ergebnisse. Auch hier konnte man jedoch die Ungleiche Anfangsverteilung beobachten.

Eine mögliche Erklärung für die ausbleibende Bestätigung der Hypothese, könnte die geringe Stichprobengröße darstellen. Mit einer Größe von $n=13$ ist diese niedrig angesetzt und bildet u.U. nicht die nötige Streubreite ab. In vergleichbaren Studien mit ähnlicher oder höherer Personenanzahl ergibt sich jedoch ein gemischtes Bild, sowohl bei den Effekten von Licht auf die subjektive als auch auf die objektive Aufmerksamkeit^{44,132}.

In der Studie von Lockley et al. wurde der Fokus auf die Beeinflussung von Licht als zentraler Faktor auf die Aufmerksamkeit gelegt. Darüber hinaus können jedoch auch weitere Faktoren neben der Lichtexposition die Aufmerksamkeit beeinflusst haben. Da durch unser Studiendesign konsequent verhindert wurde, dass die Probanden vor der Lichtexposition anderen Lichtquellen ausgesetzt waren, liegt der Verdacht nahe, dass weitere Faktoren die Aufmerksamkeit der Probanden in unserer Studie beeinflusst haben. Eine mögliche Rolle könnten die unterschiedlichen Chronotypen (morning und evening Typ) sein, die Einfluss auf die Aufmerksamkeit haben können²⁰². Des Weiteren könnte sozialer Stress und/oder Schlafmangel der vorausgegangenen Tage ein Grund gewesen sein, dass die Aufmerksamkeit bei den Probanden zu Beginn der Testung unterschiedlich war und damit die Ausgangswerte sich unterschieden. Diese Einflüsse auf die Aufmerksamkeit sollten in weiterführenden Studien noch genauer betrachtet und gemessen werden, um eine bessere Erklärung für die Divergenz der Ausgangswerte zu liefern.

5.1.2. Lichteinfluss auf die subjektive Aufmerksamkeit

Mit Hilfe der Karolinska Sleepiness Scale wurde die subjektive Schläfrigkeit der Probanden gemessen, um damit Rückschlüsse auf die empfundene Aufmerksamkeit zu ziehen. Dieser Test wird häufig genutzt zur subjektiven Erfassung der Aufmerksamkeit und ergibt sich durch die Betrachtung der Schläfrigkeit der zu testenden Person¹¹⁰.

Bei dieser Betrachtung wurden in der Studie im Vergleich zur objektiven Messung mehr Probanden für die subjektive Aufmerksamkeit berücksichtigt (n=27). Dies ergab sich aus den technischen Problemen und der damit verbundenen geringeren Anzahl während der Testphase beim Aretim Gerät, zur Messung der objektiven Aufmerksamkeit.

In den Ergebnissen zeigte sich, dass die Teilnehmer nach der Lichtexposition signifikant niedrigere Werte in Bezug auf die Schläfrigkeit angaben als vor der Lichtexposition ($p=.008$).

Die aufgestellte Hypothese der Beeinflussung von monochromatischem Licht auf die subjektive Aufmerksamkeit, kann damit bezogen auf die Abhängigkeit der Zeit bestätigt werden.

Im Gegensatz zu der Aussagekräftigkeit der Ergebnisse der objektiven Aufmerksamkeitsmessung ist die subjektive Messung signifikant und nachvollziehbar. Hier liegen die Ausgangswerte vor der Lichtexposition nah beieinander (rot $M=5,2$ und blau $M=5,07$), wodurch die beiden Gruppen ein gleiches Maß der Schläfrigkeit vor der Lichtexposition angeben und die Werte gut verglichen werden können. Dies bedeutet, dass die Teilnehmer nach der Lichtexposition signifikant niedrigere Werte in Bezug auf die Schläfrigkeit angaben als vor der Lichtexposition. Jedoch konnte keine Signifikanz der Art der Lichtexposition in Abhängigkeit der Zeit auf die subjektive Aufmerksamkeit festgestellt werden. Auch hier wäre die Vermutung gewesen, dass durch monochromatisch blaues Licht aufgrund der hohen Affinität der ipRGC zu kurzwelligen Lichtspektren, die Aufmerksamkeit mehr steigt als durch monochromatisch rotes Licht^{4,44}.

Für die Messung der subjektiven Schläfrigkeit wurde hier bewusst die KSS gewählt. Die KSS ist insbesondere für die Messung in der Nacht konzipiert. Für unsere Testung am Morgen könnte unter Umständen die Skala jedoch zu extrem gewesen sein, wodurch die Unterschiede vor und nach der Lichtexposition nicht eindeutig erfasst wurden. Da die objektiv gemessenen Werte zur Aufmerksamkeit nicht die Veränderung durch die Lichtexposition belegt werden konnte, ist ein Vergleich der beiden Messungen nicht aussagekräftig möglich.

Betrachtet man vergleichbare Studien, so reihen sich unsere Ergebnisse in ein diverses Bild. Denn im Gegensatz zur objektiven Aufmerksamkeit (s.o.) gibt es für die subjektive Aufmerksamkeit deutlich weniger signifikante Studien von monochromatischer Lichtexposition mit Veränderung in der spektralen Verteilung. Von acht Studien Review von Souman et al.¹³² belegen von 14 Studien nur vier Studien signifikant die Beeinflussung subjektiver

Aufmerksamkeit mittels eines Fragebogens¹³². Schaut man zur besseren Vergleichbarkeit auf die durchgeführten Studien, die ebenfalls am Morgen stattgefunden haben, so zeigt sich hier ein ausgeglichenes Bild. Es gibt nur vier Studien zu diesem Messzeitpunkt, von welchen zwei Studien eine Veränderung der subjektiven Aufmerksamkeit messen konnten, sowie zwei die keine Signifikanz belegten.

Beim Vergleich von polychromatischem Licht mit unterschiedlicher spektraler Verteilung gibt es hingegen fünf von zehn Studien mit signifikantem Effekt auf die subjektive Aufmerksamkeit. Bei den genannten Studien wurde hingegen nicht immer die subjektive Aufmerksamkeit vor der Lichtexposition gemessen, sondern in den meisten Fällen erst innerhalb der Lichtexposition. So lassen sich die erhobenen Daten der verschiedenen Studien nur eingeschränkt vergleichen. Hier gilt es in Zukunft in weiteren Studien vergleichbare Daten zu erheben, die sowohl die objektive als auch die subjektive Aufmerksamkeit in einem standardisierten Setting untersuchen, in welchem klar definierte Abläufe eine bessere Vergleichbarkeit ermöglichen.

So ergibt sich abschließend für die Interpretation folgendes Bild. Die Beeinflussung von LED Licht auf die Aufmerksamkeit lässt sich nur in der subjektiven Betrachtung in Abhängigkeit der Zeit nachweisen. Weder eine Veränderung zwischen den unterschiedlichen Wellenlängen rot und blau noch eine Veränderung zwischen den unterschiedlichen Wellenlängen in Abhängigkeit der Zeit auf die subjektive Aufmerksamkeit konnte gefunden werden.

Die objektive Messung mittels des Go/NoGo-Testes zeigte zwar zwei signifikante Veränderungen bei den Mittelwerten und den kürzesten Reaktionszeiten, diese sind jedoch aufgrund der unterschiedlichen Ausgangswerte nur eingeschränkt verwertbar. Die restlichen Untersuchungsmerkmale des Aretim Testes (längste Reaktionszeiten, falsch Positive, verfehlten Töne) ergaben keine signifikanten Veränderungen.

5.2. Klinische Implikation

Licht beeinflusst den Menschen in allen Bereichen des Lebens. So ist auch die mögliche klinische Implikation vielfältig. Es stellt eine kostengünstige, nicht-invasive und einfache Behandlungsmöglichkeit dar. Allen voran LED sind durch ihre intensive Erforschung heutzutage in der Lage Licht in verschiedenen Wellenlängen, Beleuchtungsstärken und Farbspektren, im sichtbaren wie auch nicht sichtbaren Bereich zu produzieren^{203,204}.

Schon vor der LED Entwicklung etablierten sich schon früh erste Ansätze Licht als therapeutisches Mittel einzusetzen. So etablierte sich die Behandlung mit Licht für saisonale

Störungen^{11,205,206}, Depressionen und Einschlafstörungen^{205,207} oder mittels UV Licht für Hautkrankheiten wie Psoriasis²⁰⁸⁻²¹⁰.

Durch die automatische und tägliche Lichtexposition bieten künstliche Lichtquellen in vielen Bereichen die Möglichkeit, abseits von gezielter Behandlung von Krankheiten, den menschlichen Organismus zu beeinflussen. Hier liegt das Potenzial für weitere intelligente Beleuchtungssysteme. Gerade im Gesundheitssektor können moderne Beleuchtungssysteme die Patient*innen im tageszeitlichen Rhythmus unterstützen und gleichzeitig für das Personal eine adäquate Arbeitsbeleuchtung sowohl tagsüber, wie auch nachts gewährleisten. Da der Einfluss von Licht auf den menschlichen Körper über die nicht visuellen Verschaltungen sehr umfassend und vielfältig ist, sind noch nicht alle Aspekte genügend erforscht. So gab es in diesem Feld eine große Zunahme an Studien in den letzten zehn Jahren. Im Auftrag der deutschen Unfallversicherung verfasste Vandahl et al. 2020 die Literaturstudie „Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit“, wo sie erste Empfehlungen für optimale Beleuchtung für Schichtarbeitende, auf Grundlage der aktuellen Erkenntnisse formulierten²¹¹. Diese Empfehlungen wurden aber aufgrund der Komplexität und der Limitierungen der bisherigen Studien (siehe Kapitel 5.4) nur eingeschränkt formuliert. Dies verdeutlicht gleichzeitig Bedarf an weiterer Forschung in dem Feld, um eine noch bessere Nutzung von Licht in diesem Bereich zu ermöglichen.

5.3. Stärken und Schwächen der Studie

Wie in jeder durchgeführten Studie gibt es sowohl Stärken als auch Limitationen und Einschränkungen, die dazu führen, dass die erhobenen Ergebnisse individuell im Kontext interpretiert und analysiert werden müssen. Erkannte Stärken und Limitationen des Studiendesigns können dann in folgenden Studien bewusst übernommen bzw. vermieden werden.

Zu den Stärken der durchgeführten Studie zählt vor allem der hohe Standardisierungsgrad des Testprotokolls. So wurde ein standardisiertes Schlafen im Labor ermöglicht. Die Schlaflaborbedingungen gewährleisteten damit auch das Aufwachen vor der experimentellen Lichtexposition bei Abdunklung der Räume (1lx), wodurch konstante Lichtverhältnisse für alle Probanden geschaffen wurden.

Bei der großen Menge an relevanten Einflussfaktoren von Lichteinwirkung bedarf es einer großen Menge an Studien um diese Faktoren ausreichend zu analysieren. Die durchgeführte Studie befasst sich dabei bewusst mit monochromatischem Licht und unterschiedlicher spektraler Verteilung am Morgen, was im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren, nur vereinzelt

in dieser Konstellation getestet wurde. So wurden Daten zum besseren Vergleich für weitere Studien generiert.

Wie schon in der Interpretation der Ergebnisse erwähnt, ist in dieser Studie die Stichprobengröße ($n=13$ objektive Aufmerksamkeit bzw. $n=27$ subjektive Aufmerksamkeit) ein limitierender Faktor in der Aussagefähigkeit der erhobenen Ergebnisse. Aufgrund eines technischen Defektes des Aretim Gerätes war die Möglichkeit der Erhebung der Daten des Reaktionsschnelligkeits-Testes stark eingeschränkt. Zugunsten der Vergleichbarkeit wurden nur Datensätze von Probanden genommen, bei welchen Daten roter und blauer Lichtexposition beide vorhanden waren. Aus diesem Grund ergibt sich die Differenz zwischen der Gruppengröße der Datensätze der Aretim Daten und der der erhobenen KSS Daten. Ein größerer Datensatz erhöht die statistische Power und damit die Aussagekraft der erhobenen Ergebnisse. Dies wäre hier u.U. auch der Fall gewesen.

Im Testprotokoll war keine Akklimatisierungsnacht für die Probanden vorgesehen. Dies könnte die Aretim Daten und damit die Aufmerksamkeit der Probanden beeinflusst haben, indem sie durch die neue und ungewohnte Umgebung eine schlechtere Schlafqualität gehabt haben. Für weitere Studien sollte dieser Aspekt berücksichtigt werden und ggf. eine Akklimatisierungsnacht ins Testprotokoll mit aufgenommen werden.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus den Ein- und Ausschlusskriterien der Studie. Für die Studie sind nur männliche Probanden zugelassen, in einem begrenzten Alter. So bilden die erhobenen Ergebnisse in der Studie nicht die komplette Breite der Gesellschaft ab, da Frauen und ältere Menschen nicht mit eingeschlossen sind. Hierdurch lassen sich die Ergebnisse nur bedingt auf die gesamte Gesellschaft übertragen. Studien konnten zeigen, dass mit steigendem Alter die Empfindlichkeit für Licht mit kurzwelligem Spektrum abnimmt und damit Auswirkungen auf die Beeinflussung des zirkadianen Rhythmus hat. Dies wiederum kann Folgen für die Interaktion von Licht und der Aufmerksamkeit haben. Auch hier gilt, dies in weiteren Studien zu untersuchen²¹²⁻²¹⁴.

Die Beschränkung auf ausschließlich männliche Probanden einer bestimmten Altersgruppe in dieser Studie ist durch den Fokus auf ein kontrolliertes Studiensetting bedingt. Durch die klar definierten Ein- und Ausschlusskriterien und die genaue zeitliche Abfolge, wurden möglichst viele Einflussfaktoren minimiert, die sonst die Ergebnisse und deren Interpretation beeinflusst hätten.

5.4. Empfehlungen für weiterführende Studien

Die Gesamtheit der Studien, sowie die aktuellen Literaturreviews zum Thema Licht und Aufmerksamkeit legen die Diversität und Komplexität der Ergebnisse dar. Viele Eigenschaften des Lichts beeinflussen die Aufmerksamkeit auf verschiedene Wege. Besonders die Interaktion mit dem zirkadianen Rhythmus und damit verbundene Auswirkungen auf den Tag-Nacht-Rhythmus verdeutlicht die Komplexität der Verschaltungen der unterschiedlichen Systeme miteinander. Zum tiefen Verständnis der einzelnen Faktoren und Abhängigkeiten ist es unerlässlich, die Elemente einzeln und konkret zu analysieren und in Zukunft in wissenschaftlichem Rahmen weitere Studien durchzuführen.

Gleichzeitig ist es von großer Bedeutung, neue Studien mit den vorherigen besser vergleichen zu können. Dafür ist es essenziell, standardisierte Studiensettings zu schaffen und andere Einflussfaktoren zu minimieren. Die Vermeidung von Lichtquellen vor der Lichtexposition in dieser Studie stellt eine solche Maßnahme dar. Trotzdem zeigten die Ergebnisse dieser Studie keine annähernd gleichen Ausgangswerte. Es konnten folglich nicht alle anderen Einflussfaktoren minimiert werden. Gleichzeitig bildet dies einen ersten Ausgangspunkt für weitere Studien, nach nicht bekannten oder bedachten Einflussfaktoren zu forschen, um sie zukünftig zu unterbinden oder mit einzukalkulieren.

Ein weiterer Faktor, den die Autoren der oben genannten Literaturreviews benennen, ist die grundsätzlich geringe Studiengröße und die damit geringe Statistische Power der Studien. Dadurch steigt die Gefahr Fehler erster und zweiter Art entstehen zu lassen. Um dies zu verhindern, sollten weiterführende Studien mit deutlich größerer Personenanzahl durchgeführt werden. Dies steht häufig dem hohen Aufwand und finanziellen Kosten gegenüber, gerade wenn durch das Studiendesign überwacht Schlaf vor der Lichtexposition notwendig ist. Hier wird also auch in Zukunft eine Abwägung im Vorfeld stattfinden müssen, welche Studiengröße man in Bezug auf die statistische Power wählt, bei gleichzeitig noch realisierbaren Kosten der Studie.

Des Weiteren sollte eine möglichst optimale Abbildung der Gesellschaft geschaffen werden, was neben Männern auch Frauen, Kinder und Rentner*innen miteinschließt. Durch diese bessere Abbildung der Gesellschaft lassen sich die gewonnen Ergebnisse u. U. besser in den Alltag implementieren, wie zum Beispiel in die Bereiche der Schichtarbeit oder des krankenhäuslichen Settings. Unter diesem Aspekt könnte es auch von Interesse sein, den Fokus auf den Zeitpunkt der Lichtexposition zu richten und gezielt Lichtexposition zu unterschiedlichen Tageszeiten zu vergleichen. Aufgrund der unterschiedlichen Lichtexposition an verschiedenen Orten (Arbeitsplatz, häusliches Umfeld etc.) sollten die Untersuchungen diese Orte betrachten.

Generell wird die Anwendung von LED weiter zunehmen und noch vielfältigere Anwendungsgebiete haben als es aktuell schon der Fall ist. Daraus ergibt sich ein großes Potenzial Licht intelligent einzusetzen, was immer besser gelingt, je mehr wir die Zusammenhänge und Abhängigkeiten von Licht auf den menschlichen Körper verstehen.

5.5. Schlussfolgerung

Unsere Studie hat gezeigt, dass monochromatisches Licht die Aufmerksamkeit beeinflusst. Es zeigte sich in der Beeinflussung der subjektiven Aufmerksamkeit durch die Lichtexposition. Diese Beeinflussung konnten wir jedoch nicht für die objektive Aufmerksamkeit nachweisen. Es hat sich dabei gezeigt, dass trotz sorgfältig überlegtem Studiendesign, andere Faktoren als die direkte Lichtexposition den menschlichen Körper beeinflussen und damit Auswirkungen auf die Aufmerksamkeit zu haben scheinen. Im Umkehrschluss unterstreicht diese Erkenntnis die Komplexität und das Zusammenspiel von Licht und Aufmerksamkeit.

Licht als essenzieller Bestandteil im menschlichen Leben ist damit nicht nur im medizinischen Sinne von Großer Relevanz. Je besser wir das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten von Licht wie Beleuchtungsstärke, spektrale Verteilung, Beleuchtungsdauer, Farbtemperatur und Lichthistorie kennen und deren Auswirkungen auf die Aufmerksamkeit verstehen, desto gezielter und vielfältiger können wir Licht einsetzen. Die Themenbereiche sind dabei vielfältig und reichen von der Medizin als Therapiemittel bis hin zum Arbeitsplatz als aufmerksamkeitsförderndes Beleuchtungsmedium. Eine immer bessere Implementierung von Licht in den verschiedenen Bereichen zu gewährleisten sollte die Motivation für die weiterführende Forschung sein.

6. Literaturverzeichnis

1. Duffy JF, Czeisler CA. Effect of light on human circadian physiology. *Sleep medicine clinics* 2009; **4**(2): 165-77.
2. Navara KJ, Nelson RJ. The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *Journal of pineal research* 2007; **43**(3): 215-24.
3. Pauley SM. Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical hypotheses* 2004; **63**(4): 588-96.
4. Cajochen C, Munch M, Kobińska S, et al. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *The journal of clinical endocrinology & metabolism* 2005; **90**(3): 1311-6.
5. Cajochen C. Alerting effects of light. *Sleep medicine reviews* 2007; **11**(6): 453-64.
6. Eurostat. Anteil der Erwerbstätigen in Deutschland, die Schichtarbeit leisten, in den Jahren 1992 bis 2019. 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/360921/umfrage/anteil-der-erwerbstaetigen-in-deutschland-die-schichtarbeit-leisten/>.
7. Berson DM, Dunn FA, Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 2002; **295**(5557): 1070-3.
8. Postuma RB, Dagher A. Basal ganglia functional connectivity based on a meta-analysis of 126 positron emission tomography and functional magnetic resonance imaging publications. *Cerebral cortex* 2006; **16**(10): 1508-21.
9. Engel S, Zhang X, Wandell B. Colour tuning in human visual cortex measured with functional magnetic resonance imaging. *Nature* 1997; **388**(6637): 68-71.
10. Vandewalle G, Maquet P, Dijk D-J. Light as a modulator of cognitive brain function. *Trends in cognitive sciences* 2009; **13**(10): 429-38.
11. Rosenthal NE, Sack DA, Gillin JC, et al. Seasonal affective disorder: a description of the syndrome and preliminary findings with light therapy. *Archives of general psychiatry* 1984; **41**(1): 72-80.
12. Lam RW, Lee SK, Tam EM, Yatham LN. An open trial of light therapy for women with seasonal affective disorder and comorbid bulimia nervosa. *The Journal of clinical psychiatry* 2001; **62**(3): 164-8.
13. Pimputkar S, Speck JS, DenBaars SP, Nakamura S. Prospects for LED lighting. *Nature photonics* 2009; **3**(4): 180-2.
14. Steele RV. The story of a new light source. *Nature photonics* 2007; **1**(1): 25-6.
15. Figueiro MG. An overview of the effects of light on human circadian rhythms: implications for new light sources and lighting systems design. *Journal of Light & Visual Environment* 2013; **37**(2_3): 51-61.
16. Chang A-M, Aeschbach D, Duffy JF, Czeisler CA. Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2015; **112**(4): 1232-7.

17. Rafique N, Al-Asoom LI, Alsunni AA, Saudagar FN, Almulhim L, Alkaltham G. Effects of mobile use on subjective sleep quality. *Nature and Science of Sleep* 2020; **12**: 357.
18. Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD. Circadian photobiology: an emerging framework for lighting practice and research. *Lighting research & technology* 2002; **34**(3): 177-87.
19. Papatsimpa C, Linnartz J-P. Personalized office lighting for circadian health and improved sleep. *Sensors* 2020; **20**(16): 4569.
20. Frings S, Müller F. Visuelles System. In: Behrends J, Bischofberger J, Deutzmann R, et al., eds. *Duale Reihe Physiologie*. 4., unveränderte Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2021.
21. Aumüller G, Aust G, Conrad A, et al. *Duale Reihe Anatomie*. 5., korrigierte Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2020.
22. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH. 5.14 Netzhaut (Retina). In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH, eds. *Prometheus LernAtlas - Kopf, Hals und Neuroanatomie*. 4. Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2015.
23. Frings S, Müller F. Netzhaut und primäre sensorische Prozesse. In: Behrends J, Bischofberger J, Deutzmann R, et al., eds. *Duale Reihe Physiologie*. 4., unveränderte Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2021.
24. Eysel U. Die Netzhaut. In: Brandes R, Lang F, Schmidt RF, eds. *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. 32 ed. Berlin: Springer-Verlag; 2019.
25. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH. 13. Funktionelle Systeme und klinische Bezüge. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH, eds. *Prometheus LernAtlas - Kopf, Hals und Neuroanatomie*. 4. Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2015.
26. Vaupel P, Schaible, H.G., Mutschler, E. *Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie des Menschen*. 7 ed. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH; 2015.
27. Ishida A, Mutoh T, Ueyama T, et al. Light activates the adrenal gland: timing of gene expression and glucocorticoid release. *Cell metabolism* 2005; **2**(5): 297-307.
28. Dickmeis T. Glucocorticoids and the circadian clock. *Journal of Endocrinology* 2009; **200**(1): 3.
29. Berson DM. Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors. *Trends in Neurosciences* 2003; **26**(6): 314-20.
30. Ecker JL, Dumitrescu ON, Wong KY, et al. Melanopsin-expressing retinal ganglion-cell photoreceptors: cellular diversity and role in pattern vision. *Neuron* 2010; **67**(1): 49-60.
31. Schmidt TM, Chen S-K, Hattar S. Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: many subtypes, diverse functions. *Trends in neurosciences* 2011; **34**(11): 572-80.
32. Brown TM, Gias C, Hatori M, et al. Melanopsin contributions to irradiance coding in the thalamo-cortical visual system. *PLoS biology* 2010; **8**(12): e1000558.
33. Gooley JJ, Lu J, Chou TC, Scammell TE, Saper CB. Melanopsin in cells of origin of the retinohypothalamic tract. *Nature neuroscience* 2001; **4**(12): 1165.

34. Wong KY, Dunn FA, Berson DM. Photoreceptor adaptation in intrinsically photosensitive retinal ganglion cells. *Neuron* 2005; **48**(6): 1001-10.
35. 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.
36. Dacey DM, Liao H-W, 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.
37. Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A. A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Research Reviews* 2005; **50**(2): 213-28.
38. Saper CB, Lu J, Chou TC, Gooley J. The hypothalamic integrator for circadian rhythms. *Trends in Neurosciences* 2005; **28**(3): 152-7.
39. Vandewalle G, Baeteau E, Phillips C, et al. Daytime light exposure dynamically enhances brain responses. *Current Biology* 2006; **16**(16): 1616-21.
40. Mure LS, Vinberg F, Hanneken A, Panda S. Functional diversity of human intrinsically photosensitive retinal ganglion cells. *Science* 2019; **366**(6470): 1251-5.
41. Thapan K, Arendt J, Skene DJ. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *The Journal of physiology* 2001; **535**(1): 261-7.
42. Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, et al. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *Journal of Neuroscience* 2001; **21**(16): 6405-12.
43. Hankins M, Lucas R. The primary visual pathway in humans is regulated according to long-term light exposure through the action of a nonclassical photopigment. *Current Biology* 2002; **12**(3): 191-8.
44. 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.
45. Eysel U. Sehsystem und Augenbewegungen. In: Pape HC, Kurtz A, Silbernagl S, eds. *Physiologie*. 7 ed. Stuttgart: Thieme; 2014.
46. Melyan Z, Tarttelin E, Bellingham J, Lucas R, Hankins M. Addition of human melanopsin renders mammalian cells photoresponsive. *Nature* 2005; **433**(7027): 741-5.
47. Revell VL, Arendt J, Fogg LF, Skene DJ. Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths. *Neuroscience letters* 2006; **399**(1-2): 96-100.
48. Vandewalle G, Gais S, Schabus M, et al. Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure. *Cerebral cortex* 2007; **17**(12): 2788-95.
49. Anderson JR. *The architecture of cognition*: Psychology Press; 1996.
50. Neisser U. *Cognitive Psychology*. 1st ed. New York: Psychology Press; 2014.
51. Palmer SE. *Vision science: Photons to phenomenology*: MIT press; 1999.
52. Barbara J. Knowlton KJH, Christopher Summerfield, Etienne Koechli. Chapter 9 - Higher cognitive functions. In: Gazzaniga MS, ed. *The new cognitive neuroscience*. 4th ed: MIT Press; 2009.

53. Gerrig RJ. Gedächtnis. In: Richard J. G, ed. Psychologie. 20th ed. Hallbergmoos, Germany: Pearson Deutschland GmbH; 2016.
54. Strube GB, B.; Freksa, C.; Hahn, U.; Opwis, K.; Palm, G. Strube, G. (Hrsg): Wörterbuch der Kognitionswissenschaft. Stuttgart, 1996. Stuttgart: Klett-Cotta; 1996.
55. Parasuraman R. The attentive brain: Mit Press; 2000.
56. Davies DR, Parasuraman R. The psychology of vigilance: Academic Press; 1982.
57. Milner AD, Goodale MA. Two visual systems re-viewed. *Neuropsychologia* 2008; **46**(3): 774-85.
58. De Gelder B. Uncanny sight in the blind. *Scientific American* 2010; **302**(5): 60-5.
59. Boyer JL, Harrison S, Ro T. Unconscious processing of orientation and color without primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2005; **102**(46): 16875-9.
60. Libet B. Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *Behavioral and brain sciences* 1985; **8**(4): 529-39.
61. Libet B. Mind time: The temporal factor in consciousness: Harvard University Press; 2009.
62. Soon CS, Brass M, Heinze H-J, Haynes J-D. Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature neuroscience* 2008; **11**(5): 543.
63. Aston-Jones G. Brain structures and receptors involved in alertness. *Sleep medicine* 2005; **6**: S3-S7.
64. Brown RE, Basheer R, McKenna JT, Strecker RE, McCarley RW. Control of sleep and wakefulness. *Physiological reviews* 2012.
65. Brudzynski SM. The Ascending Mesolimbic Cholinergic System—A Specific Division of the Reticular Activating System Involved in the Initiation of Negative Emotional States. *Journal of Molecular Neuroscience* 2014; **53**(3): 436-45.
66. Trepel M. Neuroanatomie. 5 ed. München: Elsevier GmbH Urban und Fischer Verlag; 2012.
67. Pape H-C. Wachheit und Schlaf: Rhythmen des Gehirns im Muster des Elektroenzephalogramms. In: Palmer SE, Kurtz A, Silbernagl S, eds. Physiologie. 8 ed. Stuttgart: Thieme Verlag; 2018.
68. Saper CB, Chou TC, Scammell TE. The sleep switch: hypothalamic control of sleep and wakefulness. *Trends in neurosciences* 2001; **24**(12): 726-31.
69. Chun MM, Golomb JD, Turk-Browne NB. A Taxonomy of External and Internal Attention. *Annual Review of Psychology* 2011; **62**(1): 73-101.
70. Wilson TD. Strangers to ourselves: Discovering the adaptive unconscious. Cambridge, MA: Harvard University Press; 2002.
71. Bronkhorst AW. The Cocktail Party Phenomenon: A Review of Research on Speech Intelligibility in Multiple-Talker Conditions. *Acta Acustica united with Acustica* 2000; **86**(1): 117-28.
72. Just MA, Keller TA, Cynkar J. A decrease in brain activation associated with driving when listening to someone speak. *Brain research* 2008; **1205**: 70-80.

73. Myers DG. Bewusstsein und der zweigleisige Verstand. In: Myers DG, ed. *Psychologie*. 3rd ed. Berlin Heidelberg: Springer Verlag; 2014.
74. Prime DJ, McDonald JJ, Green J, Ward LM. When cross-modal spatial attention fails. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale* 2008; **62**(3): 192-7.
75. Müller H. J. KJ, Schubert T. *Aufmerksamkeit und Handlungssteuerung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2015.
76. Stein BE, Meredith, M.A. *The merging of the senses*. Cambridge, MA: MIT Press; 1993.
77. Schroeder CE, Foxe J. Multisensory contributions to low-level, 'unisensory' processing. *Current Opinion in Neurobiology* 2005; **15**(4): 454-8.
78. Fuster JM. *The prefrontal cortex: anatomy, physiology and neuropsychology of the frontal lobe*. 3rd ed. Philadelphia, New York: Lippincott Raven; 1997.
79. Macaluso E, Frith CD, Driver J. Supramodal Effects of Covert Spatial Orienting Triggered by Visual or Tactile Events. *Journal of Cognitive Neuroscience* 2002; **14**(3): 389-401.
80. Shomstein S, Yantis S. Control of Attention Shifts between Vision and Audition in Human Cortex. *The Journal of Neuroscience* 2004; **24**(47): 10702-6.
81. Pashler H, Carrier M. Chapter 1 - Structures, Processes, and the Flow of Information. In: Bjork EL, Bjork RA, eds. *Memory*. San Diego: Academic Press; 1996: 3-29.
82. Gruber T. Übersicht. *Gedächtnis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018: 1-13.
83. Atkinson RC, Shiffrin RM. Human memory: A proposed system and its control processes. *Psychology of learning and motivation* 1968; **2**(4): 89-195.
84. Becker-Carus C, Wendt M. *Gedächtnis. Allgemeine Psychologie: Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2017: 353-420.
85. Dunlap JC. Molecular bases for circadian clocks. *Cell* 1999; **96**(2): 271-90.
86. Buijs FN, León-Mercado L, Guzmán-Ruiz M, Guerrero-Vargas NN, Romo-Nava F, Buijs RM. The circadian system: a regulatory feedback network of periphery and brain. *Physiology* 2016; **31**(3): 170-81.
87. Pape H-C. Der zirkadiane Rhythmus. In: Pape H-C, Kurtz A, Silbernagl S, eds. *Physiologie*. 9., vollständig überarbeitete Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2019.
88. Kramer A. 475 Bedeutung der Chronobiologie für Gesundheit und Krankheit. In: Suttrop N, Möckel M, Siegmund B, Dietel M, eds. *Harrisons Innere Medizin*. 20. Auflage ed: ABW Verlag; 2020.
89. Hucklebridge F, Hussain T, Evans P, Clow A. The diurnal patterns of the adrenal steroids cortisol and dehydroepiandrosterone (DHEA) in relation to awakening. *Psychoneuroendocrinology* 2005; **30**(1): 51-7.
90. Gekle M, Singer D. Was heißt Konstanz der Körpertemperatur? In: Pape H-C, Kurtz A, Silbernagl S, eds. *Physiologie*. 9., vollständig überarbeitete Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2019.

91. Badia P, Myers B, Boecker M, Culpepper J, Harsh J. Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior. *Physiology & behavior* 1991; **50**(3): 583-8.
92. Refinetti R, Menaker M. The circadian rhythm of body temperature. *Physiology & behavior* 1992; **51**(3): 613-37.
93. Te Kulve M, Schlangen L, Schellen L, Souman JL, van Marken Lichtenbelt W. Correlated colour temperature of morning light influences alertness and body temperature. *Physiology & behavior* 2018; **185**: 1-13.
94. te Kulve M, Schellen L, Schlangen L, van Marken Lichtenbelt W. The influence of light on thermal responses. *Acta Physiologica* 2016; **216**(2): 163-85.
95. Sato M, Sakaguchi T, Morita T. The effects of exposure in the morning to light of different color temperatures on the behavior of core temperature and melatonin secretion in humans. *Biological Rhythm Research* 2005; **36**(4): 287-92.
96. Cajochen C, Zeitzer JM, Czeisler CA, Dijk D-J. Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behavioural brain research* 2000; **115**(1): 75-83.
97. Scheer FA, Van Doornen LJ, Buijs RM. Light and diurnal cycle affect autonomic cardiac balance in human; possible role for the biological clock. *Autonomic neuroscience* 2004; **110**(1): 44-8.
98. Froy O. Metabolism and circadian rhythms—implications for obesity. *Endocrine reviews* 2010; **31**(1): 1-24.
99. Eckel-Mahan KL, Patel VR, Mohny RP, Vignola KS, Baldi P, Sassone-Corsi P. Coordination of the transcriptome and metabolome by the circadian clock. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2012; **109**(14): 5541-6.
100. Eckel-Mahan K, Sassone-Corsi P. Metabolism control by the circadian clock and vice versa. *Nature structural & molecular biology* 2009; **16**(5): 462-7.
101. Fonken LK, Aubrecht TG, Meléndez-Fernández OH, Weil ZM, Nelson RJ. Dim light at night disrupts molecular circadian rhythms and increases body weight. *Journal of biological rhythms* 2013; **28**(4): 262-71.
102. Cailotto C, Lei J, van der Vliet J, et al. Effects of nocturnal light on (clock) gene expression in peripheral organs: a role for the autonomic innervation of the liver. *PloS one* 2009; **4**(5): e5650.
103. Sinha MK, Ohannesian JP, Heiman ML, et al. Nocturnal rise of leptin in lean, obese, and non-insulin-dependent diabetes mellitus subjects. *The Journal of clinical investigation* 1996; **97**(5): 1344-7.
104. Kalsbeek A, Fliers E, Romijn J, et al. The suprachiasmatic nucleus generates the diurnal changes in plasma leptin levels. *Endocrinology* 2001; **142**(6): 2677-85.
105. Ruiter M, La Fleur SE, van Heijningen C, van der Vliet J, Kalsbeek A, Buijs RM. The daily rhythm in plasma glucagon concentrations in the rat is modulated by the biological clock and by feeding behavior. *Diabetes* 2003; **52**(7): 1709-15.
106. Wang X, Armstrong M, Cairns B, Key T, Travis R. Shift work and chronic disease: the epidemiological evidence. *Occupational medicine* 2011; **61**(2): 78-89.
107. Obayashi K, Saeki K, Iwamoto J, et al. Exposure to light at night, nocturnal urinary melatonin excretion, and obesity/dyslipidemia in the elderly: a cross-sectional analysis

of the HEIJO-KYO study. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 2013; **98**(1): 337-44.

108. Davis S, Mirick DK. Circadian disruption, shift work and the risk of cancer: a summary of the evidence and studies in Seattle. *Cancer causes & control* 2006; **17**(4): 539-45.

109. Schernhammer ES, Kroenke CH, Laden F, Hankinson SE. Night work and risk of breast cancer. *Epidemiology* 2006: 108-11.

110. 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.

111. Johns MW. A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. *sleep* 1991; **14**(6): 540-5.

112. Hoddes E, Zarcone V, Smythe H, Phillips R, Dement WC. Quantification of sleepiness: a new approach. *Psychophysiology* 1973; **10**(4): 431-6.

113. Samn SW, Perelli LP. Estimating aircrew fatigue: a technique with application to airlift operations: School of Aerospace Medicine Brooks Afb tx, 1982.

114. Hyvärinen M. Methodological questions in lighting acceptance and preference studies. 2015.

115. Zhou X, Ferguson SA, Matthews RW, et al. Mismatch between subjective alertness and objective performance under sleep restriction is greatest during the biological night. *Journal of sleep research* 2012; **21**(1): 40-9.

116. Dinges DF, Powell JW. Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior research methods, instruments, & computers* 1985; **17**(6): 652-5.

117. Jung CM, Ronda JM, Czeisler CA, Wright Jr KP. Comparison of sustained attention assessed by auditory and visual psychomotor vigilance tasks prior to and during sleep deprivation. *Journal of sleep research* 2011; **20**(2): 348-55.

118. Loh S, Lamond N, Dorrian J, Roach G, Dawson D. The validity of psychomotor vigilance tasks of less than 10-minute duration. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 2004; **36**(2): 339-46.

119. Langenecker SA, Zubieta J-K, Young EA, Akil H, Nielson KA. A task to manipulate attentional load, set-shifting, and inhibitory control: Convergent validity and test-retest reliability of the Parametric Go/No-Go Test. *Journal of clinical and experimental neuropsychology* 2007; **29**(8): 842-53.

120. Wright L, Lipszyc J, Dupuis A, Thayapararajah SW, Schachar R. Response inhibition and psychopathology: a meta-analysis of go/no-go task performance. *Journal of abnormal psychology* 2014; **123**(2): 429.

121. Barry RJ, de Pascalis V, Hodder D, Clarke AR, Johnstone SJ. Preferred EEG brain states at stimulus onset in a fixed interstimulus interval auditory oddball task, and their effects on ERP components. *International Journal of Psychophysiology* 2003; **47**(3): 187-98.

122. Brickenkamp R, Schmidt-Atzert L, Liepmann D. d2-R: Test d2 – Revision. Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest. Göttingen: Hogrefe; 2010.

123. Blotenberg I, Schmidt-Atzert L. Towards a process model of sustained attention tests. *Journal of Intelligence* 2019; **7**(1): 3.
124. Mackworth JF. Paced memorizing in a continuous task. *Journal of experimental psychology* 1959; **58**(3): 206.
125. Kasteleijn-Nolst Trenité D, Rubboli G, Hirsch E, et al. Methodology of photic stimulation revisited: updated European algorithm for visual stimulation in the EEG laboratory. *Epilepsia* 2012; **53**(1): 16-24.
126. Santamaria J, Chiappa KH. The EEG of drowsiness in normal adults. *Journal of clinical Neurophysiology* 1987; **4**(4): 327-82.
127. Van Orden KF, Jung T-P, Makeig S. Combined eye activity measures accurately estimate changes in sustained visual task performance. *Biological psychology* 2000; **52**(3): 221-40.
128. Johns MW, Chapman R, Crowley K, Tucker A. A new method for assessing the risks of drowsiness while driving. *Somnologie-Schlafforschung und Schlafmedizin* 2008; **12**(1): 66-74.
129. Henelius A, Sallinen M, Huotilainen M, Müller K, Virkkala J, Puolamäki K. Heart rate variability for evaluating vigilant attention in partial chronic sleep restriction. *Sleep* 2014; **37**(7): 1257-67.
130. Rajendra Acharya U, Paul Joseph K, Kannathal N, Lim CM, Suri JS. Heart rate variability: a review. *Medical and biological engineering and computing* 2006; **44**: 1031-51.
131. Wright Jr KP, Hull JT, Czeisler CA. Relationship between alertness, performance, and body temperature in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 2002.
132. 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.
133. Lok R, Smolders KC, Beersma DG, de Kort YA. Light, alertness, and alerting effects of white light: a literature overview. *Journal of biological rhythms* 2018; **33**(6): 589-601.
134. Mu Y-M, Huang X-D, Zhu S, et al. Alerting effects of light in healthy individuals: a systematic review and meta-analysis. *Neural Regeneration Research* 2022; **17**(9): 1929.
135. Pachito DV, Eckeli AL, Desouky AS, et al. Workplace lighting for improving alertness and mood in daytime workers. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2018; (3).
136. Kantermann T, Schierz C, Harth V. Gesicherte arbeitsschutzrelevante Erkenntnisse über die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf den Menschen. *Eine Literaturstudie* 2018.
137. Karlsson B, Knutsson A, Lindahl B. Is there an association between shift work and having a metabolic syndrome? Results from a population based study of 27 485 people. *Occupational and environmental medicine* 2001; **58**(11): 747-52.
138. Uttley J. Power analysis, sample size, and assessment of statistical assumptions—Improving the evidential value of lighting research. *Leukos* 2019; **15**(2-3): 143-62.

139. Rahman SA, Marcu S, Shapiro CM, Brown TJ, Casper RF. Spectral modulation attenuates molecular, endocrine, and neurobehavioral disruption induced by nocturnal light exposure. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism* 2011; **300**(3): E518-E27.
140. 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. *Journal of applied physiology* 2011.
141. 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.
142. Rahman SA, Hilaire MAS, Lockley SW. The effects of spectral tuning of evening ambient light on melatonin suppression, alertness and sleep. *Physiology & behavior* 2017; **177**: 221-9.
143. Hartstein L, Durniak M, Karlicek Jr R, Berthier N. A comparison of the effects of correlated colour temperature and gender on cognitive task performance. *Lighting Research & Technology* 2018; **50**(7): 1057-69.
144. Figueiro M, Kalsher M, Steverson B, Heerwagen J, Kampschroer K, Rea M. Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers. *Lighting Research & Technology* 2019; **51**(2): 171-83.
145. Viola AU, James LM, Schlangen LJ, Dijk D-J. Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian journal of work, environment & health* 2008: 297-306.
146. Mills PR, Tomkins SC, Schlangen LJ. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. *Journal of circadian rhythms* 2007; **5**(1): 1-9.
147. Sahin L, Wood BM, Plitnick B, Figueiro MG. Daytime light exposure: Effects on biomarkers, measures of alertness, and performance. *Behavioural brain research* 2014; **274**: 176-85.
148. Burattini C, Piccardi L, Curcio G, Ferlazzo F, Giannini AM, Bisegna F. Cold LED lighting affects visual but not acoustic vigilance. *Building and Environment* 2019; **151**: 148-55.
149. Smolders KC, de Kort YA. Investigating daytime effects of correlated colour temperature on experiences, performance, and arousal. *Journal of Environmental Psychology* 2017; **50**: 80-93.
150. 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): 86-92.
151. O'Brien PM, O'Conner PJ. Effect of bright light on cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 2000.
152. Huiberts LM, Smolders KC, de Kort YA. Non-image forming effects of illuminance level: exploring parallel effects on physiological arousal and task performance. *Physiology & behavior* 2016; **164**: 129-39.
153. Myers BL, Badia P. Immediate effects of different light intensities on body temperature and alertness. *Physiology & behavior* 1993; **54**(1): 199-202.

154. Lok R, Woelders T, Gordijn MC, Hut RA, Beersma DG. White light during daytime does not improve alertness in well-rested individuals. *Journal of biological rhythms* 2018; **33**(6): 637-48.
155. Smolders KC, Peeters ST, Vogels IM, de Kort YA. Investigation of dose-response relationships for effects of white light exposure on correlates of alertness and executive control during regular daytime working hours. *Journal of biological rhythms* 2018; **33**(6): 649-61.
156. Smolders KC, De Kort YA, Cluitmans P. A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Physiology & Behavior* 2012; **107**(1): 7-16.
157. Tanaka K, Takahashi M, Tanaka M, et al. Brief morning exposure to bright light improves subjective symptoms and performance in nurses with rapidly rotating shifts. *Journal of occupational health* 2011; **53**(4): 258-66.
158. Huiberts L, Smolders K, De Kort Y. Seasonal and time-of-day variations in acute non-image forming effects of illuminance level on performance, physiology, and subjective well-being. *Chronobiology international* 2017; **34**(7): 827-44.
159. Phipps-Nelson J, Redman JR, Dijk D-J, 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.
160. Leichtfried V, Mair-Raggautz M, Schaeffer V, et al. Intense illumination in the morning hours improved mood and alertness but not mental performance. *Applied ergonomics* 2015; **46**: 54-9.
161. Smolders KC, de Kort YA. Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. *Journal of environmental psychology* 2014; **39**: 77-91.
162. Lok R, Woelders T, van Koningsveld M, et al. Bright light increases alertness and not cortisol in healthy men: A forced desynchrony study under dim and bright light (I). *Journal of biological rhythms* 2022; **37**(4): 403-16.
163. Borragán G, Deliens G, Peigneux P, Leproult R. Bright light exposure does not prevent the deterioration of alertness induced by sustained high cognitive load demands. *Journal of environmental psychology* 2017; **51**: 95-103.
164. Sleegers PJ, Moolenaar NM, Galetzka M, Pruyn A, Sarroukh BE, van der Zande B. Lighting affects students' concentration positively: Findings from three Dutch studies. *Lighting research & technology* 2013; **45**(2): 159-75.
165. Barkmann C, Wessolowski N, Schulte-Markwort M. Applicability and efficacy of variable light in schools. *Physiology & behavior* 2012; **105**(3): 621-7.
166. Wessolowski N, Koenig H, Schulte-Markwort M, Barkmann C. The effect of variable light on the fidgetiness and social behavior of pupils in school. *Journal of Environmental Psychology* 2014; **39**: 101-8.
167. Ruger 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. *American Journal of Physiology-regulatory, integrative and comparative physiology* 2006; **290**(5): R1413-R20.

168. Dewan K, Benloucif S, Reid K, Wolfe LF, Zee PC. Light-induced changes of the circadian clock of humans: increasing duration is more effective than increasing light intensity. *Sleep* 2011; **34**(5): 593-9.
169. Chang AM, Santhi N, St Hilaire M, et al. Human responses to bright light of different durations. *The Journal of physiology* 2012; **590**(13): 3103-12.
170. Zeitzer JM, Ruby NF, Fisicaro RA, Heller HC. Response of the human circadian system to millisecond flashes of light. *PloS one* 2011; **6**(7): e22078.
171. Najjar RP, Zeitzer JM. Temporal integration of light flashes by the human circadian system. *The Journal of clinical investigation* 2016; **126**(3): 938-47.
172. Kronauer RE, St. Hilaire MA, Rahman SA, Czeisler CA, Klerman EB. An exploration of the temporal dynamics of circadian resetting responses to short-and long-duration light exposures: cross-species consistencies and differences. *Journal of biological rhythms* 2019; **34**(5): 497-514.
173. Rahman SA, Brainard GC, Czeisler CA, Lockley SW. Spectral sensitivity of circadian phase resetting, melatonin suppression and acute alerting effects of intermittent light exposure. *Biochemical Pharmacology* 2021; **191**: 114504.
174. Hébert M, Martin SK, Lee C, Eastman CI. The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *Journal of pineal research* 2002; **33**(4): 198-203.
175. Smith KA, Schoen MW, Czeisler CA. Adaptation of human pineal melatonin suppression by recent photic history. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 2004; **89**(7): 3610-4.
176. Chang AM, Scheer FA, Czeisler CA. The human circadian system adapts to prior photic history. *The Journal of physiology* 2011; **589**(5): 1095-102.
177. Drummond SP, Bischoff-Grethe A, Dinges DF, Ayalon L, Mednick SC, Meloy M. The neural basis of the psychomotor vigilance task. *Sleep* 2005; **28**(9): 1059-68.
178. Lisper HO, Kjellberg A. Effects of 24-hour sleep deprivation on rate of decrement in a 10-minute auditory reaction time task. *Journal of Experimental Psychology* 1972; **96**(2): 287.
179. Buysse DJ, Reynolds CF, 3rd, Monk TH, Berman SR, Kupfer DJ. The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res* 1989; **28**(2): 193-213.
180. Cohen S, Kamarck T, Mermelstein R. A global measure of perceived stress. *J Health Soc Behav* 1983; **24**(4): 385-96.
181. Cohen S. Perceived stress in a probability sample of the United States. The social psychology of health. Thousand Oaks, CA, US: Sage Publications, Inc; 1988: 31-67.
182. Klein EM, Brähler E, Dreier M, et al. The German version of the Perceived Stress Scale—psychometric characteristics in a representative German community sample. *BMC psychiatry* 2016; **16**(1): 159.
183. Schulz P SW, Becker P. Trierer Inventar zum chronischen Stress. TICS. 1st ed. Göttingen: Hogrefe; 2004.
184. Kudielka BM, Hellhammer DH, Kirschbaum C, Harmon-Jones E, Winkelman P. Ten years of research with the Trier Social Stress Test—revisited. *Social*

neuroscience: Integrating biological and psychological explanations of social behavior 2007; **56**: 83.

185. 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.

186. Ellert U, Bellach BM. [The SF-36 in the Federal Health Survey--description of a current normal sample]. *Gesundheitswesen* 1999; **61 Spec No**: S184-90.

187. McHorney CA, Ware JE, Jr., Raczek AE. The MOS 36-Item Short-Form Health Survey (SF-36): II. Psychometric and clinical tests of validity in measuring physical and mental health constructs. *Med Care* 1993; **31**(3): 247-63.

188. Ware Jr JE, Kosinski M, Keller SD. A 12-Item Short-Form Health Survey: construction of scales and preliminary tests of reliability and validity. *Medical care* 1996: 220-33.

189. Griefahn B, Künemund C, Bröde P, Mehnert P. Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg. *Somnologie - Schlafforschung und Schlafmedizin* 2001; **5**(2): 71-80.

190. Horne JA, Ostberg O. A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *Int J Chronobiol* 1976; **4**(2): 97-110.

191. Costa PT, McCrae RR. The NEO personality inventory. 1995.

192. Borkenau P, & Ostendorf, F. NEO-FFI : NEO-Fünf-Faktoren-Inventar nach Costa und McCrae. 2nd ed. Göttingen: Hogrefe; 2008.

193. Abler B, Kessler H. Emotion Regulation Questionnaire – Eine deutschsprachige Fassung des ERQ von Gross und John. *Diagnostica* 2009; **55**(3): 144-52.

194. R. Steyer R, Notz, P., Schwenkmezger, P., Eid, M. Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen. 1st ed. Göttingen: Hogrefe; 1997.

195. 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.

196. Åkerstedt T, Gillberg M. Subjective and objective sleepiness in the active individual. *International journal of neuroscience* 1990; **52**(1-2): 29-37.

197. Ganong WF. Medizinische Physiologie: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie des Menschen für Studierende der Medizin und Ärzte: Springer-Verlag; 2013.

198. Figueiro M, Rea M. Sleep opportunities and periodic light exposures: impact on biomarkers, performance and sleepiness. *Lighting Research & Technology* 2011; **43**(3): 349-69.

199. Phipps-Nelson J, Redman JR, Schlangen LJ, Rajaratnam SM. Blue light exposure reduces objective measures of sleepiness during prolonged nighttime performance testing. *Chronobiology International* 2009; **26**(5): 891-912.

200. 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.

201. Plitnick B, Figueiro M, Wood B, Rea M. The effects of red and blue light on alertness and mood at night. *Lighting Research & Technology* 2010; **42**(4): 449-58.

202. Averagesch R. Die Auswirkung von LED-Lichtexposition und des Chronotyps auf die morgendliche Cortisol-Aufwachreaktion. 2021.
203. Gibney E. Blue LED wins physics Nobel. *Nature* 2014; **514**(7521): 152-3.
204. Cho J, Park JH, Kim JK, Schubert EF. White light-emitting diodes: history, progress, and future. *Laser & photonics reviews* 2017; **11**(2): 1600147.
205. Mårtensson B, Pettersson A, Berglund L, Ekselius L. Bright white light therapy in depression: a critical review of the evidence. *Journal of Affective Disorders* 2015; **182**: 1-7.
206. Golden RN, Gaynes BN, Ekstrom RD, et al. The efficacy of light therapy in the treatment of mood disorders: a review and meta-analysis of the evidence. *American Journal of Psychiatry* 2005; **162**(4): 656-62.
207. Al-Karawi D, Jubair L. Bright light therapy for nonseasonal depression: meta-analysis of clinical trials. *Journal of affective disorders* 2016; **198**: 64-71.
208. Nast A, Altenburg A, Augustin M, et al. Deutsche S3-Leitlinie zur Therapie der Psoriasis vulgaris, adaptiert von EuroGuiDerm–Teil 2: Therapiemonitoring, besondere klinische Situationen und Komorbidität. *JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft* 2021; **19**(7): 1092-117.
209. Lee SY, You CE, Park MY. Blue and red light combination LED phototherapy for acne vulgaris in patients with skin phototype IV. *Lasers in Surgery and Medicine: The Official Journal of the American Society for Laser Medicine and Surgery* 2007; **39**(2): 180-8.
210. Elman M, Slatkine M, Harth Y. The effective treatment of acne vulgaris by a high-intensity, narrow band 405–420 nm light source. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy* 2003; **5**(2): 111-7.
211. Vandahl IC, Bieske D-IK, Neuhäuser S. Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit. *deutsche gesetzliche Unfallversicherung* 2020.
212. Turner PL, Van Someren EJ, Mainster MA. The role of environmental light in sleep and health: effects of ocular aging and cataract surgery. *Sleep medicine reviews* 2010; **14**(4): 269-80.
213. Herljevic M, Middleton B, Thapan K, Skene DJ. Light-induced melatonin suppression: age-related reduction in response to short wavelength light. *Experimental gerontology* 2005; **40**(3): 237-42.
214. Daneault V, Dumont M, Masse E, Vandewalle G, Carrier J. Light-sensitive brain pathways and aging. *Journal of physiological anthropology* 2016; **35**(1): 1-12.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sehbahn	14
Abbildung 2: Das menschliche Auge	16
Abbildung 3: Retinale Signalwege (ON- OFF-Wege)	17
Abbildung 4: nicht genikulärer Teil der Sehbahn	21
Abbildung 5: Arbeitsgedächtnis nach Baddeley.....	28
Abbildung 6: verwendetes Auretim-Gerät.....	48
Abbildung 7: Einfluss der Lichtexposition auf die Zeit in Bezug auf die KSS	61
Abbildung 8: Einfluss der Lichtexposition auf die Zeit in Bezug auf die Mittelwerte..	65
Abbildung 9: Einfluss der Lichtexposition auf die Zeit im Bezug auf die kürzeste Reaktionszeit	66

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Soziodemografische Daten, Quelle: eigene Darstellung	60
Tabelle 2: Varianzanalyse mit Messwiederholung anhand der KSS, Quelle: eigene Darstellung	61
Tabelle 3: Varianzanalyse mit Messwiederholung der nicht gedrückten Werte im Aurretim-Test, Quelle: eigene Darstellung	62
Tabelle 4: Varianzanalyse mit Messwiederholung der falsch positiv gedrückten Werte im Aurretim-Test, Quelle: eigene Darstellung	63
Tabelle 5: Varianzanalyse mit Messwiederholung der Mittelwerte der gedrückten Werte im Aurretim-Test, Quelle: eigene Darstellung	64
Tabelle 6: Multivarianzanalyse mit Messwiederholung mit den Werten der kürzesten Reaktionszeiten im Aurretim-Test, Quelle: eigene Darstellung	66
Tabelle 7: Multivarianzanalyse mit Messwiederholung den Werten der am langsamsten gedrückten Reaktionszeiten im Aurretim-Test, Quelle: eigene Darstellung	67

7.3. Probandenanschreiben und Aufklärung

7.3.1. Probandenaufklärung

Aufklärungsbogen zu Studienablauf und Diagnostik

Lieber Testteilnehmer,

vielen Dank für Ihre Bereitschaft als Proband an der Studie zur mentalen Gesundheit und Licht an der Deutschen Sporthochschule Köln teilzunehmen. Im folgenden Schreiben finden Sie einige Infos zum Ablauf und Inhalt Ihres Testtermins.

Es sind während der Untersuchung folgende Tests zu diagnostischen Zwecken vorgesehen:

- Sehtests
- Konzentrationstest
- 60-minütige Lichtexposition
- Messung der Herzrate mittels einer Sportuhr
- Messung des Aktivitäts- und Ruhezyklus mittels eines Aktigraphie-Armbands

Vor und während dieser Tests werden Sie 11 Speichelproben zu unterschiedlichen Zeiten abgeben. Die Speichelproben werden sofort nach Ende der Testung zur Analyse in ein Labor gebracht und anschließend vernichtet.

Da die Testungen bereits um 6:30 Uhr morgens beginnen ist eine Übernachtung vorgesehen. Die Testungen und Übernachtungen finden in externen Büroräumen der Deutschen Sporthochschule Köln statt.

Die Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit ohne Angaben von Gründen die Teilnahme beenden, wobei Ihnen dadurch keinerlei Nachteile entstehen. Sollten Sie weitere Fragen bezüglich der Untersuchung haben, wenden Sie sich bitte an das Studententeam.

Weitere Infos:

Ort der Testung: Eupener Str. 70- Etage 2

50933 Köln (Räumlichkeiten der Deutschen Sporthochschule Köln)

Ankunft: 22 Uhr

Schlafen: 23 Uhr

Beginn der Testung: 6:30 Uhr

Ende der Testung: 9:15 Uhr

Bitte erscheinen Sie zum Testtag ausgeruht und verzichten Sie am Vortag auf Alkohol. Falls Sie eine Brille benötigen, bringen Sie diese bitte mit. Bitte bringen Sie außerdem bequeme Kleidung mit, welche sie zum Schlafen und am Morgen zur weiteren Testung der Lichtexposition tragen können. Ein Jogginganzug o.ä. ist geeignet.

Vor Ort gibt es Wasch- und Umkleidemöglichkeiten. Sie werden in einem bequemen Zwei-Bett Zimmer mit einem weiteren Probanden schlafen. Wasser und Ohrenstöpsel stellen wir Ihnen zur Verfügung. Bettdecken und Kissen haben wir vor Ort. Auf Wunsch können Sie aber auch gerne einen eigenen Schlafsack mitbringen und nutzen.

Der Zeitaufwand entspricht für Sie zweimalig etwa 3 Stunden plus jeweils einer Übernachtung vor Ort und wird mit einer Aufwandspauschale von 100€ per Überweisung vergütet. Hierzu benötigen wir Ihre Bankdaten welche Sie auf dem Formular ‚Probandenabrechnung‘ angeben können. Die Aufwandspauschale wird durch die Verwaltung der Deutschen Sporthochschule Köln nach erfolgreicher Teilnahme an beiden Testterminen überwiesen. Dies kann einige Zeit in Anspruch nehmen.

Im Anhang dieses Schreibens befinden sich erste Unterlagen wie z.B. die Datenschutzerklärung. Wenn es Ihnen möglich ist, würden wir uns sehr freuen wenn Sie die Dokumente unterschrieben zum ersten Untersuchungstag mitbringen könnten.

Wir möchten uns bereits im Voraus für Ihre Mühe und Unterstützung bedanken!

Viele Grüße,

das Studienteam:

Namen des Studienteams:

Thomas Spürk

Paul Wefers

Lukas Weber Czekalla

Miriam Weber

Ann Naeem

Ihr erreicht uns unter folgender E-mail Adresse: nivil3studie@gmail.com

Verantwortliche Projektleiterin: Prof. Dr. Katja Petrowski (k.petrowski@dshs-koeln.de)^[1]_[SEP]

Telefon: 0221- 1681 5011

Universität: Deutsche Sporthochschule Köln

7.3.2. Einverständniserklärung der Diagnostik

Einverständniserklärung Diagnostik

Lieber Testteilnehmer,

vielen Dank für Ihre Bereitschaft als Proband an einer Studie der Deutschen Sporthochschule Köln teilzunehmen. Die Studie dient dazu, Parameter zu vergleichen die Auskunft über den Gemütszustand von Personen geben.

Mit Ihrer Unterschrift bestätigen Sie, dass Sie keine Herz-Kreislauf-, Lungen- und Blutkrankheiten haben, dass Sie eigenverantwortlich und freiwillig an den Tests teilnehmen und dass Sie über die Untersuchungsdurchführungen und Kontraindikationen informiert wurden.

Weiterer Ausschlusskriterien sind:

- Jünger als 18 Jahre und älter als 65 Jahre
- Psychische Erkrankungen
- akute oder chronische Erkrankungen (Stoffwechselerkrankungen, Autoimmunerkrankungen, Bluterkrankungen, Herz-, Kreislauferkrankungen, chronisch-entzündliche Erkrankungen)
- Einnahme von Psychopharmaka
- Kürzlich zurückliegende Impfungen (innerhalb der letzten zwei Wochen)
- Nikotinkonsum > 10 Zigaretten/ Tag
- Body Mass Index > 27 kg/ m²

Die Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit ohne Angaben von Gründen die Teilnahme beenden, ohne dass Ihnen dadurch Nachteile entstehen.

Sollten Sie weitere Fragen bezüglich der Untersuchung haben, wenden Sie sich bitte an das Studienteam bzw. die verantwortliche Projektleiterin.

Teilnahme an der Intervention? ☐ Ja ☐ Nein

Ich habe den Untersuchungsablauf verstanden und bin mir der Risiken bewusst.

Köln, den

..... Unterschrift Proband

..... Unterschrift Testleiter/in

7.3.3. Datenschutzerklärung

Datenschutzerklärung

Mir ist bekannt, dass im Rahmen dieses Forschungsprojekts personenbezogene Daten über mich erhoben, gespeichert und ausgewertet werden sollen. Die Verwendung dieser Daten erfolgt ausschließlich nach gesetzlichen Bestimmungen und entsprechend dieser Erklärung und setzt vor der Teilnahme an der Untersuchung folgende freiwillig abgegebene Einwilligungserklärung voraus, d.h. ohne die nachfolgende Einwilligung kann ich nicht an dem Forschungsprojekt teilnehmen.

1. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass im Rahmen des Forschungsprojektes erhobene Daten, insbesondere Angaben über meine Gesundheit, in Papierform und auf elektronischen Datenträgern bei Institut für Bewegungstherapie und bewegungsorientierte Prävention und Rehabilitation, Deutsche Sporthochschule Köln aufgezeichnet werden.
2. Meine Daten dürfen soweit erforderlich, anonymisiert (verschlüsselt) weitergegeben werden.
3. Ich bin bereits darüber aufgeklärt worden, dass ich jederzeit die Teilnahme an dem vorgenannten Forschungsprojekt beenden kann. Im Fall eines solchen Widerrufs meiner Einwilligung, an der Studie teilzunehmen, erkläre ich mich damit einverstanden, dass die bis zu diesem Zeitpunkt gespeicherten Daten ohne Namensnennung weiterhin verwendet werden dürfen, soweit dies erforderlich ist.
4. Meine Daten werden nach Beendigung der Studie, das heißt, wenn sie verarbeitet sind und nicht mehr erforderlich sind, gelöscht.
5. Ich bin über folgende gesetzliche Regelung informiert: Falls ich meine Einwilligung, an der Studie teilzunehmen, widerrufe, müssen alle Stellen, die meine personenbezogenen Daten, insbesondere Gesundheitsdaten gespeichert haben, unverzüglich prüfen, inwieweit die gespeicherten Daten für die vorgenannten Zwecke noch erforderlich sind. Nicht mehr benötigte Daten sind unverzüglich zu löschen.

Name, Datum, Unterschrift

7.4. Fragebögen

7.4.1. Sozialdemografischer Fragebogen

Soziodemographischer Fragebogen

1. Angaben zur Person

Geschlecht: ☐ männlich ☐ weiblich

--	--	--	--	--	--

Geburtsdatum: z.B. 01.10.65

2. Nationalität

Welcher Nationalität gehören Sie an?

- ☐ Deutsch
- ☐ Deutscher Übersiedler/Spätaussiedler - Jahr der Übersiedlung: _____
- ☐ Andere Nationalität - Internationales Autokennzeichen: _____
- ☐ Oder _____

3. Familienstand

Wie ist Ihr aktueller Familienstand? (Mehrfachankreuzungen möglich)

- ☐ ledig
- ☐ verheiratet
- ☐ getrennt lebend
- ☐ geschieden
- ☐ verwitwet
- ☐ wieder verheiratet

In welcher Partnersituation leben Sie?

- ☐ Kurzfristig kein Partner
- ☐ Langfristig/dauerhaft kein Partner
- ☐ Wechselnde Partner
- ☐ Fester Partner (Ehepartner)
- ☐ Fester Partner (nicht Ehepartner)

4. Bildung und Beruf

Welchen höchsten Schulabschluss haben Sie? (bei Schule im Ausland bitte Vergleichbares wählen)

- ☐ Noch in der Schule
- ☐ Kein Schulabschluss
- ☐ Sonderschulabschluss
- ☐ Haupt-/Volksschulabschluss
- ☐ Realschulabschluss/mittlere Reife/polytechnische Oberschule
- ☐ Fachabitur/Abitur
- ☐ Sonstiges

Welchen höchsten Berufsabschluss haben Sie?

- ☐ Noch in der Ausbildung
- ☐ Lehre/Fachschule
- ☐ Meister
- ☐ Fachhochschule/Universität
- ☐ Ohne Berufsabschluss
- ☐ Sonstiges
- ☐ Wie lautet Ihr letzter (oder zuletzt ausgeübter) Beruf?

- ☐ Sind Sie derzeit arbeitsunfähig? ☐ Ja ☐ Nein
- ☐ Wenn ja, seit wie vielen Wochen ununterbrochen? _____

7.4.2. Karolinska-Schläfrigkeitsskala

Karolinska-Schläfrigkeitsskala

Auf einer Skala von 1 bis 10 - wie schläfrig fühlen Sie sich in diesem Moment?

Kreuzen Sie bitte zutreffendes an.

- ☐ 1 = äußerst wach
- ☐ 2 = sehr wach
- ☐ 3 = normal wach
- ☐ 4 = ziemlich wach
- ☐ 5 = weder wach noch schläfrig
- ☐ 6 = schläfrig
- ☐ 7 = schläfrig, ohne Mühe wach zu bleiben
- ☐ 8 = schläfrig, etwas Mühe wach zu bleiben
- ☐ 9 = sehr schläfrig, große Mühe wach zu bleiben
- ☐ 10 = äußerst schläfrig, kann nicht wach bleiben

7.5. Ethiknachweis

 **TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Ethikkommission

Ethikkommission an der TU Dresden
Fetscherstraße 74, 01307 Dresden

Frau
PD Dr. Katja Petrowski
Klinik und Poliklinik für Psychotherapie und
Psychosomatik
Universitätsklinikum Carl Gustav Carus
Hauspost

Prof. Dr. med.
Uwe Platzbecker
Vorsitzender der Ethikkommission

Telefon: 0351 458-2982
Telefax: 0351 458-4369
E-Mail: ethikkommission@ethik.tu-dresden.de

Dresden, 12.12.2014

Studie: Untersuchung der HPA-Achsen-Funktionalität bei Panikstörung mit / ohne
Agoraphobie bei psychosozial induziertem Stress mit und ohne Lichteinwirkung

Unser AZ: EK 353082014 (bitte stets angeben!)

Antragsteller: Klinik und Poliklinik für Psychotherapie und Psychosomatik

Eingangsbestätigung

- Anschreiben (Stellungnahme) an unsere Ethikkommission hier eingegangen am 08.12.2014
- Antragsformular, Literaturverzeichnis, Versuchsanordnung, Aufklärungsbogen, Einwilligungserklärung, Aufklärung zur Venenpunktion, Einwilligungserklärung zur Venenpunktion, Prüfplan, Studienablauf und Untersuchungsmethoden, Antrag auf Entgeltbefreiung

Sehr geehrte Frau Priv. Doz. Petrowski,

die o. g. überarbeiteten Unterlagen sind am 08.12.2014 bei uns eingegangen. Die Hinweise der Ethikkommission sind somit berücksichtigt. Die Studie kann entsprechend dem Bescheid vom 23.10.2014 durchgeführt werden.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. med. Uwe Platzbecker
Vorsitzender der Ethikkommission

[Signature]

Postanschrift:
Ethikkommission an der
Technischen Universität Dresden
Fetscherstr. 74
01307 Dresden

Besuchersadresse:
Sekretariat, Fiedrich: 27
Dekanatsgebäude, Haus 40
Z.: 115

Internet:
[http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/
gemein_und_beschaeftigte/kommissionen/
ethikkommission/](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/gemein_und_beschaeftigte/kommissionen/ethikkommission/)

 **DRESDEN
1011891**
Fakultät für
Medizinische
und Naturwissenschaften