Biosignale als Indikator der Lichtwirkungen auf Menschen – eine Literaturstudie der letzten Jahrzehnte

Sebastian Beck, Tran Quoc Khanh; Fachgebiet Lichttechnik, TU Darmstadt

1 Abstract

Licht bildet die essentielle Grundlage für visuelle Sehaufgaben. Darüber hinaus kann es den Menschen sowohl auf psychologischer als auch auf physiologischer Ebene durch nicht-visuelle Wirkung beeinflussen. Mit diesem Beitrag soll ein Überblick über die Interpretationen verschiedener Biosignale als Reaktion auf Lichtreize aufgezeigt werden. Diese stellen besonders für zukünftige Studien ein großes Potential für die Untersuchung der Lichtwirkung auf den Menschen dar, um die Reaktion der Lichtwirkung auf den Menschen weiter zu spezifizieren. Genauer betrachtet werden die grundlegenden Wirkprinzipien sowie der aktuelle Forschungsstand. Bei Letzterem wird speziell auf Studien, welche die Biosignale des Kardiovaskuläre Systems (EKG), der Kernkörpertemperatur, des Elektroenzephalogramms (EEG) und des Elektrookulogramms (EOG) thematisieren, eingegangen.

2 Einleitung

Licht bildet für den Menschen nicht nur die essentielle Grundlage des Sehens, sondern hat auch einen Einfluss auf das Wohlbefinden in Form von nicht-visuellen Einflüssen: Neben der Auswirkung auf den zirkadianen Rhythmus sind auch akute, direkt messbare Effekte wie beispielsweise die Melatoninunterdrückung, die Steigerung der Aufmerksamkeit oder der Wachheit möglich [1–3]. Die Abhängigkeit der Wirkung als Funktionen der spektralen Zusammensetzung sowie der Intensität bzw. Dosis des Lichts ist jedoch bislang nur in Ansätzen beforscht.

Der Mensch unterliegt einem inneren Rhythmus, der ohne äußere Einflüsse eine Periode von ca. 25 Stunden durchläuft [4]. Das neurale Zentrum der inneren Uhr sitzt im Nucleus suprachiasmaticus (SCN) im vorderen Hypothalamus und wird über den retionohypothalamischen Trakt mit Informationen der Netzhaut versorgt. Dies sorgt für die Synchronisierung des zirkadianen Rhythmus durch den Hell-Dunkel-Rhythmus. Maßgeblich beteiligt sind die fotosensitiven Ganglienzellen (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells; ipRGCs). Sie werden als fünfter Rezeptor auf der Netzhaut betrachtet mit einer maximale Sensitivität der Zellen mit dem Photopigment Melanopsin bei 479 nm [5]. Komplexe neuronale Verschaltungen des SCN im Hypothalamus haben Auswirkungen auf vegetative Funktionen und beeinflussen die Zirbeldrüse, die unter anderem als Reaktion die Ausschüttung des Schlafhormons Melatonin reguliert [6]. Die Sensitivität für eine nächtliche Melatoninunterdrückung wurde von Thapan et al. [7] und Brainard et al. [8] in zwei unabhängigen Studien zu einer maximalen Sensitivität bei 460 nm festgestellt. Diese Daten bilden die Grundlage für das Model von Rea. et al. zur Bewertung der Auswirkung eines

Lichtreizes auf den Menschen und wird als Circadian Stimulus (CS) definiert [1]. Eine weitere Möglichkeit der Bewertung der nichtvisuellen Lichtwirkung stellt der Faktor a_{mel} aus der DIN SPEC 5031 –100 dar. Deren Metrik bezieht sich auf die Sensitivität von Melanopsin, korrigiert durch die Alterseinflüsse des Menschen wie zum Beispiel Linsentransmission und Pupillenweite [9].
Generell können Aussagen über die Auswirkung eines Lichtreizes auf verschiedene Weisen untersucht werden. Mit Hilfe der klassischen psychologischen und psychophysikalischen Verfahren können durch subjektive Befragungen mittels Fragebögen sowie durch Beurteilungen der Wirkung/Empfindung von Schwellen oder Reizunterschiede Daten erhoben werden. Aussagen über die Leistungsfähigkeit können auch anhand von Konzentrations- und Leistungstests gemessen werden. Weitergehend können physiologische Veränderungen unter anderem durch die Bestimmung des Hormonspiegels von beispielsweise Melatonin oder Cortisol im Blut oder Speichel bestimmt werden. Speziell der Melatoninspiegel stellt einen Marker für die zirkadiane Phase dar. Benloucif et al. beschreibt diese verschiedenen Methoden und empfiehlt den Dim Light Melatonin Onset (DMLO) als Werkzeug zur besseren Vergleichbarkeit [10].
Biosignale dagegen stellen eine direkte elektrische Ableitung von Signalen des Körpers an dessen Oberfläche dar. Aus diesen Signalen können weitere sogenannte psychophysiologische Parameter abgeleitet werden [11]. Eine Entnahme von Proben bzw. invasive Messungen sind somit nicht notwendig, sodass diese Analysen auch in nicht-klinischen Einrichtungen durchgeführt werden können.

Generell sind aufgrund der komplexen Zusammenhänge im Körper, eine Vielzahl von Einflussfaktoren zu beachten. Diese Faktoren beeinflussen unter anderem die Ausgangsgrößen und erschweren somit die allgemeingültigen Aussagen und gestalten die Untersuchungen bedingt durch die vielfältigen Parameter als sehr aufwendig. Zu den Einflussfaktoren zählen beispielsweise Alter, Geschlecht, Chronotyp oder die Uhrzeit. Die Zusammenhänge sind in Abb. 2.1 skizziert. Final soll die Beschreibung der Wirkweise von Licht (mit den Eingangsparametern) auf den Menschen zu ermöglichen, um in folgenden Projekten Beleuchtungssysteme hinsichtlich des Wohlbefindens des Menschen optimieren zu können.

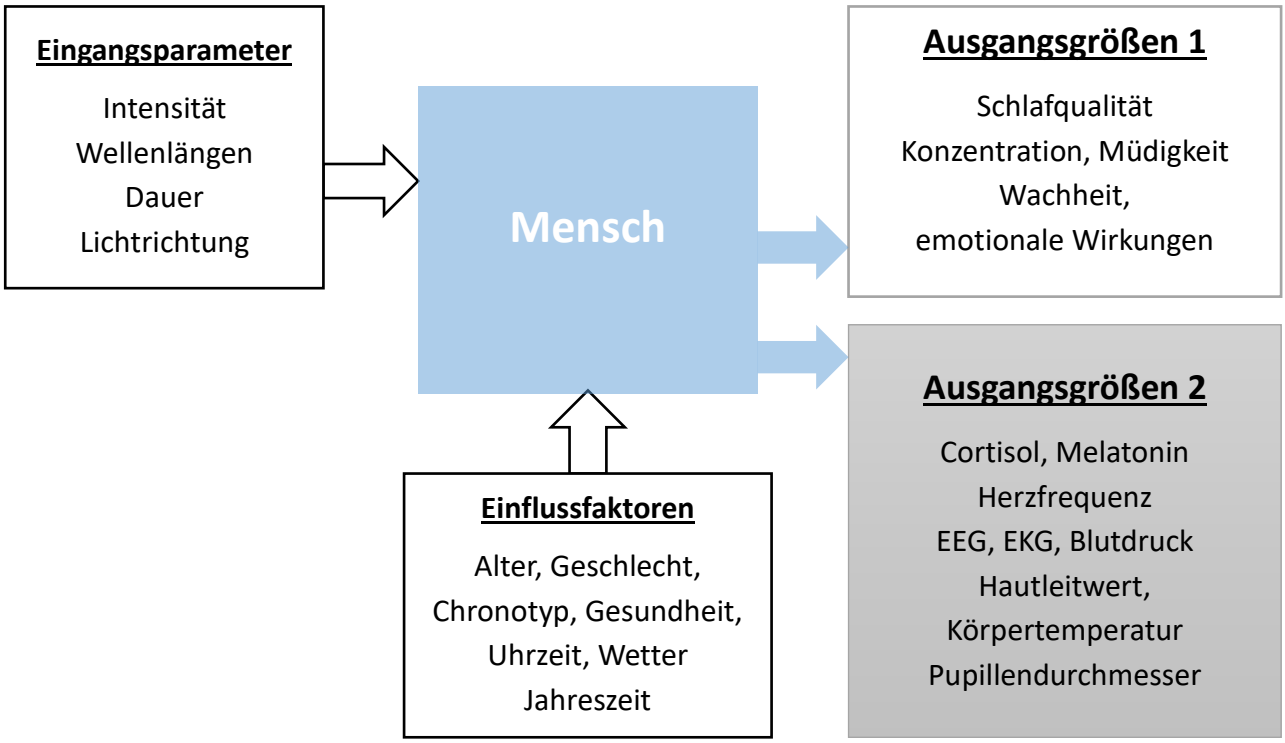

Abb. 2.1 Die Lichtwirkung auf den Menschen unterliegt vielen Einflussfaktoren. Neben den Eingangsparametern des Lichtreizes sind die Ausgangsgrößen auch maßgeblich von weiteren Einflussfaktoren abhängig.

Mit diesem Beitrag soll ein Überblick über die Interpretationen verschiedener Biosignale als Reaktion auf Lichtreize aufgezeigt werden. Diese stellen auch für zukünftige Studien ein großes Potential für die Untersuchung der Lichtwirkung auf den Menschen dar, um Antwortfunktionen der Lichtwirkung auf den Menschen weiter zu spezifizieren. Daher werden hier die grundlegenden Wirkprinzipien näher betrachtet. Desweitern wird ein Abriss des derzeitigen Forschungsstandes mit Fokus auf Untersuchungen von Biosignalen des Kardiovaskuläre Systems (Elektrokardiogramms; EKG), der Kernkörpertemperatur, des Elektroenzephalogramms (EEG) und des Elektrookulogramms (EOG) eingegangen wird.

3 Lichtwirkung auf physiologisch Parameter

Im Folgenden werden die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur physiologisch messbaren Wirkweise aufgeführt und deren grundlegenden Wirkprinzipien bzw. physiologischen Grundlagen erläutert.

Die Kernkörpertemperatur beschreibt die Temperatur im Inneren des menschlichen Organismus. Sie unterliegt thermoregularischen Prozessen und ist im Vergleich zur Temperatur an der Hautoberfläche weitestgehend unabhängig von der Umgebungstemperatur. Die Körpertemperatur wird im Hypothalamus reguliert und unterliegt dem zirkadianen Rhythmus. Der charakteristische Verlauf zeigt unter anderem ein ausgeprägtes Minimum in den frühen Morgenstunden. Mithilfe der relativen

gemessenen Veränderung der Kernkörpertemperatur lässt sich die aktuelle circadiane Phase bestimmen und mögliche Phasenverschiebungen detektieren. Hierzu wird in klinischen Studien ein rektaler Temperaturfühler für fortlaufende Messungen genutzt [3, 11–13]. Die Kernkörpertemperatur wird beispielsweise von Cajochen et al. als Marker für den Start von Lichtreizen für weiterführende Untersuchungen genutzt [3]. Auf diese Weise kann ein vor beziehungsweise nach dem Tiefpunkt gesetzter Lichtreiz, eine Verschiebung des zirkadiane Rhythmus nach hinten beziehungsweise eine Verschiebung nach vorne bewirken [14]. Die zirkadiane Phase kann um bis zu ± 3 h verschoben werden. Die erreichbare Verschiebung ist nicht nur abhängig des Zeitpunktes, sondern auch von der spektralen Verteilung, der Dauer und Intensität des Lichtreizes.

Des Weiteren wurde die Kernkörpertemperatur bereits als Marker für den zirkadianen Rhythmus in mehreren Studien erfolgreich eingesetzt. Dies ermöglichte beispielsweise die Bestimmung der Phasenverschiebung. Die Kerntemperatur wird in Körperhöhlen gemessen, um mögliche Störeinflüsse, wie der Umgebungstemperatur zu vermeiden. Zusätzlich ist eine stabile bzw. sichere Platzierung des Sensors wichtig, um potentielle Abweichungen möglichst gering zu halten [11]. Daher wird in den aufgeführten Studien eine rektale Platzierung vorgenommen, was jedoch wiederum eine klinische Umgebung voraussetzt.

Das Elektroenzephalogramm (EEG) ermöglicht die Erfassung der Hirnaktivität anhand von Potentialänderungen. Diese Änderungen werden von verschiedenen Punkten der Kopfhaut gegenüber einem Bezugspunkt (beispielsweise des Ohrläppchens) abgeleitet. Die Potentiale entsprechen der summierten Aktivität vieler ablaufender Vorgänge, die aufgrund ihrer aus intrakortikalen Netzwerken oder Feedbackschleifen aus dem Thalamus synchronisierten Abfolge ein rhythmisches Signal bilden [6]. Diese oszillatorischen Schwankungen werden als Spontanaktivität beschrieben und spiegeln den aktuellen Bewusstseinszustand wider. Da es örtlich zu verschieden Ausprägungen der Schwingungen kommen kann, sollten möglichst viele verteilte Messpunkte aufgezeichnet werden. Die Oszillatoren werden in Frequenzbereiche unterteilt, mit denen entsprechende Aussagen anhand der Ausprägung bzw. des Frequenzspektrums getroffen werden können. Die Spontanaktivität kann mittels Frequenzanalyse ausgewertet werden. Hier kann die Intensität und Aktivität verschiedener Frequenzbänder zu einer Aussage über beispielsweise die Wachheit oder Aufmerksamkeit führen. Der Frequenzbereich von 1 – 4 Hz beschreibt die Delta-Wellen, die vor allem im Tiefschlaf auftreten. Der Frequenzbereich von 4 – 8 Hz wird als Theta-Wellen bezeichnet, welche auch im dösenden Wachzustand auftreten können. Der Wachzustand kann durch Alpha-Rhythmen (8 –13 Hz) mit geringer visueller Aufmerksamkeit beschrieben werden. Beim Öffnen und Schließen der Augen tritt die sogenannte Alpha-Blockade auf. Diese veränderte Ausprägung der Alpha-Wellen mit geschlossenen und geöffneten Augen kann als Alpha Attenuation Test (AAT) zur Beurteilung der Schläfrigkeit benutzt werden [15]. Bei höherer Konzentration bzw. visueller Aufmerksamkeit findet ein Übergang der Alpha- in die Beta-Wellen mit einem Frequenzband von 13 – 30 Hz statt. Zuletzt stellen die Gamma-Wellen den Bereich über 30 Hz dar. Die

hier nur schwach ausgeprägten Potentialdifferenzen dienen als Indikatoren für Objekterkennung.[11, 16]

Für die Auswirkungen von Lichtreizen auf den Aufmerksamkeitszustand des Menschen ist die Interpretation der Alpha-Wellen daher besonders interessant und wird entsprechend oft in der Literatur thematisiert. Schwerpunkte hierbei sind die Untersuchung des Wachzustandes gemessen an dem physiologischen Einfluss. Weiterhin wird das EEG in der Schlafforschung eingesetzt, m Aufschlüsse bezüglich Schlafstadien und Schlafqualität zu erlangen.

Neben der dauerhaft auftretenden Spontanaktivität lösen externe Reize ereigniskorrelierte Potenziale aus, die auf die rhythmischen Signale aufaddiert werden und durch entsprechende Auswertemethodik extrahiert werden müssen [6]. Abhängig von der an der Kopfoberfläche platzierte Elektrodenzahl kann auch eine örtlich aufgelöste Aktivierung gemessen werden. Dies hat als Ziel die physiologischen Wirkmechanismen zu erforschen.

Anhand des EEGs wird der aktuelle physische Zustand des Körpers gemessen und durch entsprechende Auswertung der aufgezeichneten Potentialänderungen interpretiert. Dass mit Hilfe des EEGs Rückschlüsse auf die subjektiv empfundene Schläfrigkeit bzw. Aktivität angestellt werden können zeigt Akerstedt et al. durch seine Korrelation der subjektiven Aussage der Probanden mit der Karolinska Sleepiness Scale (KSS) und den EEG Alpha- und Theta-Wellen bei geöffneten Augen [17]. Die Änderungen des EEGs traten nur auf, wenn auch subjektiv entsprechende Müdigkeit empfunden wurde. Cajochen et al. erweitert in den Untersuchungen die Aussage zur Korrelation zwischen Theta-Alpha (5 – 9 Hz) Bereiche und der subjektiven Schläfrigkeit mit der nächtlichen Melatoninunterdrückung [13]. Dies hatte als Ziel eine Antwortfunktion auf Bestrahlung mit polychromatischem weißem Licht zu erhalten, eine sogenannte Dose-Response Relationship. Bei diesen Betrachtungen fehlt jedoch die Angabe der spektralen Zusammensetzung. Weiterführend in diesem Gebiet zeigen Chang et al. , dass die die Auswirkungen auf Wachheit und Delta-Theta-Wellen auch von der Lichthistorie abhängig sind [18].

Das EEG wird neben dem Einsatz bei Studien für nächtliche Melatoninsupression auch zunehmend für Test zur objektiven Beurteilung der physiologischen Lichtwirkung am Tag eingesetzt. So untersuchen unter anderem Sahin et al. den Unterschied von kurzwelligem (470 nm) und langwelligem (630 nm) Licht am Nachmittag, wenn der Melatoninspiegel auf einem natürlich geringen Level ist. Die Ergebnisse zeigen signifikant geringere Alpha-, Alpha-Theta und Theta-Wellen bei Bestrahlung mit langwelligem Licht im Vergleich zur Dunkelheit [19]. Hierbei zeigen die Befragung zur subjektiven Schläfrigkeit (KSS) dagegen nur einen Trend aber keine signifikante Abnahme der Schläfrigkeit in beiden Lichtsituationen im Vergleich zur Dunkelheit. Auch Okamoto et al. zeigen die signifikanten aktivierenden Auswirkungen von schmalbandigen sowohl kurz- als auch langwelligen Lichtreizen auf die Alpha-Wellen am frühen Morgen [20]. Dies wird durch Studien von Sahin et al. erweitert, die die Wirkung von langwelligem Licht (631 nm) und polychromatischem weißem Licht (Correlated Color Temperature (CCT) von 2568 K) bei gleicher Bestrahlungsstärke am Auge von 1,1 W/m^2 auf die Reaktions-/Leistungsfähigkeit und die Müdigkeit um 7:00, 11:00 und

15:00 Uhr analysieren. Die Studie zeigt, dass bei weißer Bestrahlung die Alpha- und Alpha-Theta Wellen zu allen Zeitpunkten signifikante Unterschiede auftreten. Im Gegensatz dazu werden bei langwelliger roter Bestrahlung nur am Nachmittag Unterschiede gemessen. Die Reaktionszeit und Leistungsfähigkeit ist jedoch unter den roten Bedingungen signifikant besser. Allerdings konnte kein signifikanter Unterschied in der Hormonausschüttung von Cortisol und Melatonin festgestellt werden. Außerdem fehlt wiederum eine detaillierte Aussage über die Anordnung der LEDs, die den Lichtreiz generieren [21].

Eine kombinierte Betrachtung von ereigniskorrelierter und Spontanaktivität betrachtet Zeitzer et al.: In seiner Studie untersucht er die Auswirkungen von 2 ms Lichtreizen während der Nacht, die durch das geschlossene Auge appliziert werden [22]. Die Reize können als ereigniskorreliertes Signal gemessen werden. Gleichzeitig kann eine Auswirkung auf die Schlafqualität aufgrund nicht signifikanter Änderungen der Spontanaktivität ausgeschlossen werden. Durch die Lichtreize wird jedoch eine Phasenverschiebung des zirkadianen Rhythmus erreicht. Mit den ereigniskorrelierten EEG (ERP) Antworten bei einer hohen örtlich aufgelösten Dichte an Messpunkten (128), untersuchten Münch et al. Gehirnreaktion auf Lichtreize (rot, grün, blau und weiß) in Abhängigkeit des Adaptationslevels der Probanden [23, 24]. Sie stellen fest, dass die Antwort der verschiedenen Lichtreize hierbei abhängig vom Adaptationszustand ist.

Erkenntnisse und Methoden dieser Untersuchungen werden besonders im Forschungsfeld der dynamischen Beleuchtung wichtig. Dabei gilt es die Parameter des Lichtes wie Intensität, Spektrum, zeitlicher Verlauf sowie räumliche Verteilung in Hinblick auf ihre Wirkung auf den Menschen zu bewerten. Dies stellt aufgrund der vielen Einflussfaktoren und Parameter eine große Herausforderung dar. Park et al. beschreiben Alpha-Wellen als Biomarker zur Bewertung von sich ändernden polychromatischem Lichtquellen [25]. Weiterführend variieren Ming et al. in deren Studie sowohl zeitliche Variationsparameter (Periode der Änderungen 0,5 - 2 h) und die CCT (4000 K – 10000 K und 6000 K – 12000 K). Die CCT hat in der Untersuchung signifikanten Einfluss auf die Alpha-Wellen und auf die subjektive Wachheit, jedoch zeigten die Periodendauern keine signifikanten Unterschiede [26].

Da bei den bisherigen Untersuchungen nur eine Lichtintensität betrachtet wurde, sind weitere Ausführungen notwendig, um allgemeine Aussagen über nichtlineare Prozesse treffen zu können.

Das Kardiovaskuläre System (Herz-Kreislauf-System) beschreibt die Funktionsweis des Herzen und des damit verbundenen Blutkreislaufs. Durch die Erfassung der Herzaktivität und des Blutdrucks können Parameter wie Herzfrequenz (oder Herzrate; HR), Herzratenvariabilität oder der Blutdruck selbst abgeleitet werden [11]. Das Herz unterliegt sowohl der Innervation des Sympathikus als auch des Parasympathikus. Während die sympathischer Innervation für eine Erhöhung der Herzfrequenz verantwortlich ist, bewirkt die Aktivierung des Parasympathikus gegenläufig eine Absenkung der Herzfrequenz. Demnach ist der parasympathische Einfluss hauptsächlich im Ruhezustand des Körpers aktiviert [16]. Die Änderung der Herzrate kann durch die Herzratenvariabilität (HRV)

quantifiziert werden. Diese lässt sich in einen niederfrequenten (Low Frequency 0,05 – 0,15 Hz; LF) und einen hochfrequenten (High Frequency 0,15 – 0,4Hz; HF) Bereich unterteilen. Ersterer kann sowohl sympathische und parasympathische Einflüsse beinhalten, wohingegen letzterer parasympathische Einflüsse beschreibt. Weitergehend kann das Verhältnis zwischen LF und HF gebildet werden. [27, 28]

Mit dem Elektrokardiogramm (EKG) wird die Herzaktivität/Erregung gemessen. Der Herzmuskel erzeugt ein elektrisches Feld, das sich auf der Hautoberfläche ausbreitet. Mithilfe von Elektroden kann der Potentialverlauf gemessen werden. Anhand der Charakteristik des Potentialverlaufs können weitere Parameter wie Frequenz und phasische Herzfrequenzänderungen evaluiert werden. Für die Aufzeichnung und Platzierung der Elektroden gibt es standardisierte Verfahren.

Die Bestimmung der Herzfrequenz kann neben dem EKG auch mit anderen, weniger genaueren Methoden bestimmt werden. Dazu zählen optische Messapparaturen mit geringerer Auflösung, die am Handgelenk oder an der Fingerkuppe angebracht werden oder angepasste EKG Messungen, die in einem Brustgurt integriert und einfach anzubringen ist. Diese Messmethoden werden vor allem in Feldstudien eingesetzt, bedingt durch deren unkomplizierte und flexible Handhabung.

Bisherige Untersuchungen lassen sich in die Lichtwirkung während der biologischen Nacht sowie am Tag unterteilen. Cajochen et al. vergleichen in deren Studie den signifikanten Anstieg der HR während der Bestrahlung mit kurzwelligem (λ_{max} = 460 nm) Licht mit den Effekten der HR bei Dunkelheit und bei der Bestrahlung mit grünem Licht (λ_{max} = 550 nm; gleiche Photonendichte bei $2{,}8 \cdot 10^{13}$ Photonen/cm^2/sek) [3]. In dieser Studie werden signifikante Unterschiede sowohl bei den Parametern der Melatoninunterdrückung als auch der subjektiven Schläfrigkeit (KSS) und der CBT gemessen werden. Figuerio et al. treffen anhand der Vergrößerung der HR durch schmalbandige rote (λ_{max} = 630 nm) und blaue (λ_{max} = 470 nm; 40 lx am Auge) Lichtreize während der biologischen Nacht die Annahme, dass es physiologische Anregung gibt, die im Vergleich zur psychologischen Wachheit jedoch empfindlicher reagiert [29]. Des Weiteren zeigen Smolders et al. in deren 2 x 2 Studie (200 lx und 1000 lx), dass eine höhere Beleuchtungsstärke auch unter normalen Umgebungsbedingungen neben subjektiver gesteigerter Aufmerksamkeit auch höhere physiologische Anregung auslöst [2]. Hier herrschen Beleuchtungsstärken von 1000 lx und 200 lx bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 4000 K am Auge. In einer weiteren Studie können Smolders et al. bei gleichen Beleuchtungsstärken am Auge keine signifikanten Unterschiede in HR und HRV feststellen [30].

HR und HRV können neben der Betrachtung von statischen Lichtsituationen ebenfalls bei dynamischen Lichtbedingungen untersucht werden. Eine Studie von Stefani et al., die dies thematisiert, können jedoch lediglich eine Tendenz für eine aktivierende Wirkung der dynamischen, aber keine signifikanten Unterschiede zwischen statischer und dynamischer Beleuchtungssituation feststellen [31]. Allerdings wird bei dieser Untersuchung lediglich ein kurzes 8,5-minütiges Untersuchungsintervall gewählt, mit der Intension eine direkte Auswirkung zu erlangen. Canazei et al. untersucht dagegen die Auswirkung von

dynamischem Licht (Änderung der Beleuchtungsstärke und CCT) auf Morgenschichtarbeiterinnen in einer Feldstudie [27]. Hier wirken sich dynamische Lichtbedingung verglichen mit der statischen Lichtbedingung signifikant auf den Anstieg der HF und HRV während der ersten Schichthälfte aus.

Das Elektrookulogramm (EOG) ermöglicht die Aufzeichnung der Augenbewegungen (Aktivität). Die Hornhaut ist im Gegensatz zur Netzhaut positiv geladen, sodass die Platzierung von zwei Elektroden rechts und links neben beiden Augen die Aufzeichnung der Augenbewegungen ermöglicht. Die Häufigkeit der Augenbewegungen lässt Rückschlüsse auf Schlafphase und die Schläfrigkeit zu [16, 17]. Weiterhin kann die Augenbewegung in Form der Slow Eye Movement (SEM) ausgewertet und interpretiert werden. Cajochen et al. betrachtet in der bereits beschriebenen Untersuchung der Dose-Response Relationship ebenfalls die SEM der Probanden, welche zudem mit der nächtlichen Melatoninsupression korreliert [13].

4 Zusammenfassung/Ausblick

Biosignale bieten diverse Möglichkeiten physiologische Parameter des Menschen zu erfassen, um so objektive Aussage über den Zustand (z.B. Müdigkeit, Aktivität, usw.) der Probanden zu treffen. Aufgrund des komplexen System des menschlichen Organismus unterliegen sie nicht nur einzelnen Reizen, sondern meist einer Vielzahl von Einflüssen, die bei der Versuchsdurchführung als auch bei der Interpretation der Ergebnisse sorgfältig beachtet werden müssen.
Im Hinblick auf dynamische Beleuchtungssysteme, die mit den Parametern (Spektrum, Intensität, Zeit und räumliche Beschaffenheit) gemessen werden, stellt die Untersuchung von Biosignale eine weitere/neue Möglichkeit dar, die ablaufenden Prozesse im menschlichen Organismus zu ergründen.
Diese Arbeit zeigt einen Überblick von Studien der vergangenen Jahre, welche die Lichtwirkung auf den Menschen mit Biosignale als Indikatoren untersuchten. Allerdings weisen die verwendeten Systeme sowie die erhobenen Ergebnisse gewisse Schwächen und Stärken auf. Dies ist bedingt durch die Vielzahl von Parametern und Einflüsse, die die Reaktionen des menschlichen Körpers beeinflussen. Daher sollten die geschlussfolgerten Aussagen mit Vorsicht interpretiert und verstanden werden. Weiterhin kann meist keine allgemeingültige Aussage getroffen oder ein Modell abgeleitet werden, da in bisherigen Untersuchungen aufgrund der Vielzahl von möglichen Parametern nur geringe Parameterkombinationen untersucht wurden.
Daher ist es auch in Zukunft wichtig, auch Negativergebnisse zu publizieren, wenn der Lichtreiz beispielsweise keine Auswirkung hatte (vgl. Smolders et al. [30]). Nur so können vielfältige Auswirkungen und Einflüsse untersucht, abgearbeitet und durch weitere sinnvolle Studien ergänzt werden. Weiterhin ist es wichtig, dass die Bedingungen und die Stimuli ausreichend dokumentiert werden, sodass bereits bestehende Modelle zur Reaktion auf Lichtreize/Lichtreizreaktion gemessen werden erweitert werden können.

5 References

[1] Rea, M. and Figueiro, M. Light as a circadian stimulus for architectural lighting. *Lighting Research and Technology,* 0. (2016), 1–14. DOI=10.1177/1477153516682368.

[2] Smolders, K. C. H. J., Kort, Y. A. W. de, and Cluitmans, P. J. M. A higher illuminance induces alertness even during office hours. Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Physiology & behavior* 107, 1. (2012), 7–16. DOI=10.1016/j.physbeh.2012.04.028.

[3] Cajochen, C., Munch, M., Kobialka, S., Krauchi, K., Steiner, R., Oelhafen, P., Orgul, S., and Wirz-Justice, A. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 90, 3. (2005), 1311–1316. DOI=10.1210/jc.2004-0957.

[4] Aschoff, J., Fatranska, M., Giedke, H., Doerr, P., Stamm, D., and Wisser, H. Human Circadian Rhythms in Continuous Darkness. Entrainment by Social Cues. *Science* 171, 3967. (1971), 213–215. DOI=10.1126/science.171.3967.213.

[5] Bailes, H. J. and Lucas, R. J. Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light (λmax ≈ 479 nm) supporting activation of G(q/11) and G(i/o) signalling cascades. *Proceedings. Biological sciences* 280, 1759. (2013), 20122987. DOI=10.1098/rspb.2012.2987.

[6] Schandry, R. *Biologische Psychologie*. Grundlagen Psychologie. Beltz, Weinheim. (2011).

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

[8] Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E., and Rollag, Mark, D. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans:. Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *The Journal of Neuroscience*. (2001), 6405–6412.

[9] DIN. *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren,* DIN SPEC 5031-100:2015-08.

[10] Benloucif, S., Burgess, H. J., Klerman, E. B., Lewy, A. J., Middleton, B., Murphy, P. J., Parry, B. L., and Revell, V. L. Measuring Melatonin in Humans. *Journal of Clinical Sleep Medicine* 4, 1. (2008), 66–69. DOI=10.1097/01720610-200803000-00013.

[11] Gramann, K. and Schandry, R. *Psychophysiologie*. *Körperliche Indikatoren psychischen Geschehens*. Grundlagen Psychologie. Beltz, Weinheim. (2009).

[12] Cajochen, C. Alerting effects of light. *Sleep medicine reviews* 11, 6. (2007), 453–464. DOI=10.1016/j.smrv.2007.07.009.

[13] Cajochen, C., Zeitzer, J. M., Czeisler, C. A., and Dijk, D.-J. Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behavioural Brain Research* 115, 1. (2000), 75–83. DOI=10.1016/S0166-4328(00)00236-9.

[14] Rüger, M., St Hilaire, M. A., Brainard, G. C., Khalsa, S.-B. S., Kronauer, R. E., Czeisler, C. A., and Lockley, S. W. Human phase response curve to a single 6.5 h pulse of short-wavelength light. *The Journal of physiology* 591, 1. (2013), 353–363. DOI=10.1113/jphysiol.2012.239046.
[15] Putilov, A. A. and Donskaya, O. G. Alpha attenuation soon after closing the eyes as an objective indicator of sleepiness. *Clinical and experimental pharmacology & physiology* 41, 12. (2014), 956–964. DOI=10.1111/1440-1681.12311.
[16] Birbaumer, N. and Schmidt, R. F. *Biologische Psychologie*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. (2010).
[17] Åkerstedt, T. and Gillberg, M. Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. *International Journal of Neuroscience* 52, 1-2. (1990), 29–37. DOI=10.3109/00207459008994241.
[18] Chang, A.-M., Scheer, F. A. J. L., Czeisler, C. A., and Aeschbach, D. Direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans depend on prior light history. *Sleep* 36, 8. (2013), 1239–1246. DOI=10.5665/sleep.2894.
[19] Sahin, L. and Figueiro, M. G. Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon. *Physiology & behavior* 116-117. (2013), 1–7. DOI=10.1016/j.physbeh.2013.03.014.
[20] Okamoto, Y., Rea, M. S., and Figueiro, M. G. Temporal dynamics of EEG activity during short- and long-wavelength light exposures in the early morning. *BMC research notes* 7. (2014), 113. DOI=10.1186/1756-0500-7-113.
[21] Sahin, L., Wood, B. M., Plitnick, B., and Figueiro, M. G. Daytime light exposure. Effects on biomarkers, measures of alertness, and performance. *Behavioural Brain Research* 274. (2014), 176–185. DOI=10.1016/j.bbr.2014.08.017.
[22] Zeitzer, J. M., Fisicaro, R. A., Ruby, N. F., and Heller, H. C. Millisecond flashes of light phase delay the human circadian clock during sleep. *Journal of biological rhythms* 29, 5. (2014), 370–376. DOI=10.1177/0748730414546532.
[23] Münch, M., Plomp, G., Thunell, E., Kawasaki, A., Scartezzini, J. L., and Herzog, M. H. Different colors of light lead to different adaptation and activation as determined by high-density EEG. *NeuroImage* 101. (2014), 547–554. DOI=10.1016/j.neuroimage.2014.06.071.
[24] Münch, M. *Die Untersuchung von chronobiologischen Aspekten nicht-visueller Lichtwirkungen beim Menschen,* Charité Universitätsmedizin Berlin. März / (2015).
[25] Park, J. Y., Ha, R.-Y., Ryu, V., Kim, E., and Jung, Y.-C. Effects of Color Temperature and Brightness on Electroencephalogram Alpha Activity in a Polychromatic Light-emitting Diode. *Clinical psychopharmacology and neuroscience : the official scientific journal of the Korean College of Neuropsychopharmacology* 11, 3. (2013), 126–131. DOI=10.9758/cpn.2013.11.3.126.
[26] Ming, Y., S., Q., Zheng, and Ming, Ronnier, Luo. The Impact of Dynamic Light with Different CCT Ranges and Frequencies on Human Alertness. 15-17 November 2016, Beijing, China, 110–113.
[27] Canazei, M., Dehoff, P., Staggl, S., and Pohl, W. Effects of dynamic ambient lighting on female permanent morning shift workers. *Lighting Research and Technology* 46, 2. (2014), 140–156. DOI=10.1177/1477153513475914.

[28] Tsunoda, M., Endo, T., Hashimoto, S., Honma, S., and Honma, K. I. Effects of light and sleep stages on heart rate variability in humans. *Psychiatry and clinical neurosciences* 55, 3. (2001), 285–286. DOI=10.1046/j.1440-1819.2001.00862.x.
[29] Figueiro, M. G., Bierman, A., Plitnick, B., and Rea, M. S. Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night. *BMC neuroscience* 10. (2009), 105. DOI=10.1186/1471-2202-10-105.
[30] Smolders, K. C. and Kort, Y. A. de. Bright light and mental fatigue. Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. *Journal of Environmental Psychology* 39. (2014), 77–91. DOI=10.1016/j.jenvp.2013.12.010.
[31] Stefani, O. EFFECTS OF DISCERNIBLE ILLUMINANCE CHANGES ON PERFORMANCE AND CONDITION, CIE x04:2016. (2016).