Können dynamische Lichtwechsel unter Änderung des Beleuchtungsniveaus und der spektralen Verteilung die Aufmerksamkeit steigern?

Birte Saathoff, Inga Rothert, Prof. Dr. Stephan Völker

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Einsteinufer 19, 10587 Berlin

1 Einleitung

Studien haben gezeigt, dass sowohl ein hohes Beleuchtungsniveau (u.a. Smolders und de Kort 2014; Cajochen 2007; van Bommel et al. 2006) als auch ein erhöhter kurzwelliger Anteil in der spektralen Lichtverteilung die Aufmerksamkeit steigern können (u.a. Keis et al. 2014; Shamsul et al. 2013; Mills et al. 2007). Dabei ist die Beleuchtung in den Studien meist statisch, das heißt sie verändert sich über die Dauer der Studie nicht.
In der Literatur finden sich jedoch auch Studien, die kurze helle Impulse als mindestens genauso effektiv oder effektiver als ein kontinuierlich hohes Beleuchtungsniveau beschreiben (Gronfier et al. 2004; Burgess et al. 2003). In der Studie von Chang et al. (2012) wurden verschiedene Pulslängen untersucht, wobei der kürzeste Puls von 12 min am effektivsten war. Allerdings wird hier in allen drei Studien ausschließlich Melatoninsuppression oder circadiane Phasenverschiebung durch eine Veränderung des Beleuchtungsniveaus in den Abendstunden betrachtet. Die Resultate der Studien mit Lichtpulsen lassen sich nicht zwingend auf die Aufmerksamkeit tagsüber übertragen und der Einfluss der spektralen Verteilung der Impulse ist weiterhin ungeklärt.
Dynamische Lichtverläufe sind heutzutage mit jedem modernen Lichtmanagementsystem möglich. Um einen Aufmerksamkeitsschub z.B. für das Mittagstief zu erreichen, könnte ein dynamischer Wechsel hinzu hohen Beleuchtungsstärken und kurzwelligerem Licht empfohlen werden.
Deshalb beschäftigt sich die hier vorgestellte Studie mit dem Einfluss von dynamischem Lichtwechsel auf die Aufmerksamkeit und das Wohlbefinden. Die Studie wurde innerhalb des BMBF geförderten Verbundprojekts Nicht-visuelle Lichtwirkungen (NiviL, Förderkennzeichen: 13N13398) im Rahmen einer Masterarbeit (Saathoff 2017) durchgeführt. Es wird folgende Hypothese überprüft: Dynamische Lichtwechsel unter Änderung des Beleuchtungsniveaus und der spektralen Verteilung können die Aufmerksamkeit und das Wohlbefinden steigern.

2 Methodik

2.1 Versuchsaufbau

Die hier vorgestellte Studie besteht aus einem Experiment, in dem jeweils die Verläufe der Aufmerksamkeit und des Wohlbefindens zweier Probandengruppen, die randomisiert zwei verschiedenen Lichtbedingungen zugeordnet sind, miteinander verglichen werden. In der statischen Kontrollgruppe wird eine warmweiße Lichtszene mit einer niedrigen vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge eingestellt. Für die dynamische Versuchsgruppe wechselt die Beleuchtung zyklisch zwischen ebendieser warmweißen Lichtszene und einer kaltweißen Lichtszene mit einer hohen vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge. Die lichttechnischen Parameter beider Lichtszenen sind in Tabelle 1 und Fotos in Abbildung 1 zu finden.

Tabelle 1: Lichtszenen

Lichtszene	Verwendet in		Vertikale Beleuchtungsstärke am Auge E_v	Ähnlichste Farbtemperatur CCT	Melanopischer Wirkungsfaktor a_{mel}
	Kontrollgruppe	Versuchsgruppe			
Warmweiß	Ja	Ja	200 lx	2.200 K	0,29
Kaltweiß	Nein	Ja	1.000 lx	12.000 K	1,59

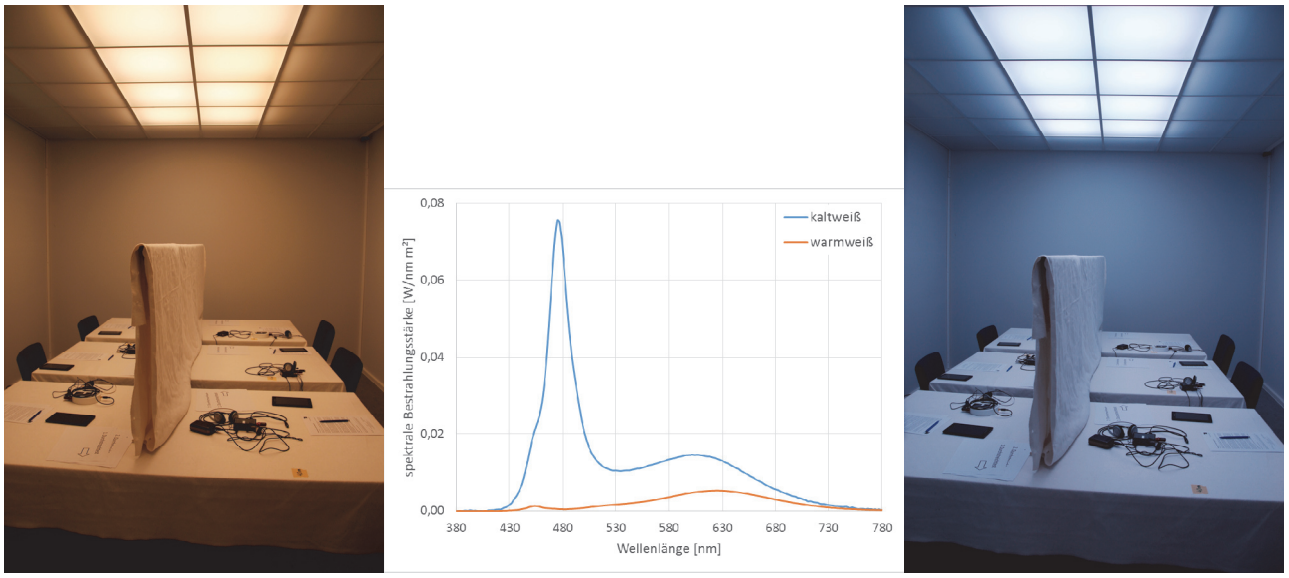


Abbildung 1: Spektren (Mitte), Warmweiße Lichtszene (links) und kaltweiße Lichtszene (rechts)

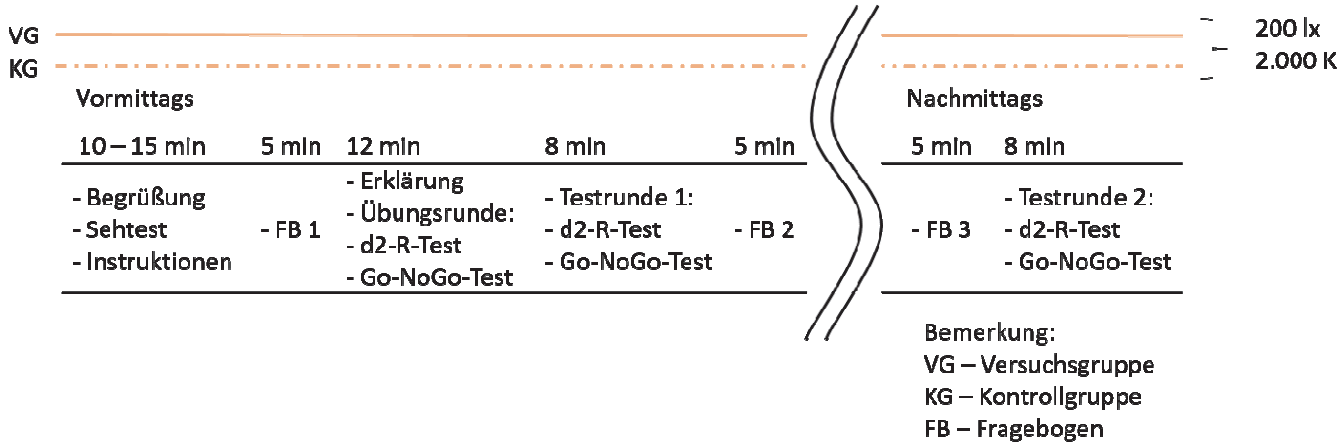
Es werden im Experiment die Aufmerksamkeit und das Wohlbefinden, welches durch die subjektive Wachheit sowie das subjektive Empfinden anhand der Angaben für Konzentriertheit, Stressgefühl und Motivation beschrieben wird, ermittelt. Zur Messung der Aufmerksamkeit werden zwei verschiedene Tests verwendet. Der d2-R-Test ist ein Durchstreichtest auf Papier, bei dem die Versuchspersonen unter Zeitdruck eine Konzentrationsleistung erbringen müssen (Brickenkamp et al. 2010). Mit einem auditiven Go-NoGo-Test wurde die Reaktionszeit gemessen und die Aufmerksamkeit über die Zeit ermittelt. Die subjektive Wachheit wird anhand der Karolinska-Sleepiness-Scale (KSS,

Åkerstedt und Gillberg 1990) und das subjektive Empfinden wird mittels Fragebögen erfasst. Die Fragebögen werden auf einem Tablet ausgefüllt, dessen Bildschirmhelligkeit reduziert wurde, sodass der Störeinfluss des Lichts sehr gering ist.
61 Versuchspersonen (32 weiblich) im Alter von 18 – 30 Jahren nahmen an dem Experiment teil. Das Durchschnittsalter lag bei 24,5 Jahren. 31 Versuchspersonen wurden der statischen Kontrollgruppe und 30 Versuchspersonen der dynamischen Versuchsgruppe zugeordnet.
Das Experiment fand im Spezialversuchsraum des Fachgebiets Lichttechnik der TU Berlin statt. Dort befinden sich drei mal zwei Arbeitsplätze, die durch eine Trennwand voneinander getrennt sind, so dass frontal kein Sichtkontakt zwischen den Versuchspersonen möglich ist. Tageslichteinfluss ist ausgeschlossen, da keine Fenster im Versuchsraum vorhanden sind. Die verwendeten LED-Leuchten wurden speziell für Versuche zu nicht-visuellen Wirkungen von Licht entwickelt (Niedling et al. 2017). Die weißen LEDs mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 2.000 K enthalten sehr wenig kurzwelliges Licht. Durch zusätzliche blaue LEDs mit einem Maximum bei 480 nm kann der kurzwellige Anteil, effektiv für die Aufmerksamkeitssteigerung, gezielt erhöht werden. Weitere 4.000 K LEDs dienen dem Erreichen von hohen vertikalen Beleuchtungsstärken. Im Versuchsraum können außerdem drei transluzente Wände hinterleuchtet werden, was für ein Lichtsignal benutzt wurde.
Als Zeitfenster für den Versuch wurde der frühe Nachmittag gewählt, um die leistungsschwache Phase des Mittagstiefs auszunutzen. Eine morgendliche Trainingsphase diente zum einen dem Üben der Tests und zum anderen einer möglichst einheitlichen Aufstehzeit. Die Studie wurde von Januar bis Anfang März 2017 durchgeführt, da ein aktivierender Effekt durch die Exposition von dynamischem Licht aufgrund der kürzeren Tage und des geringeren Tageslichtniveaus im Winter als wahrscheinlicher eingestuft wurde als im Sommer.

2.2 Versuchsablauf

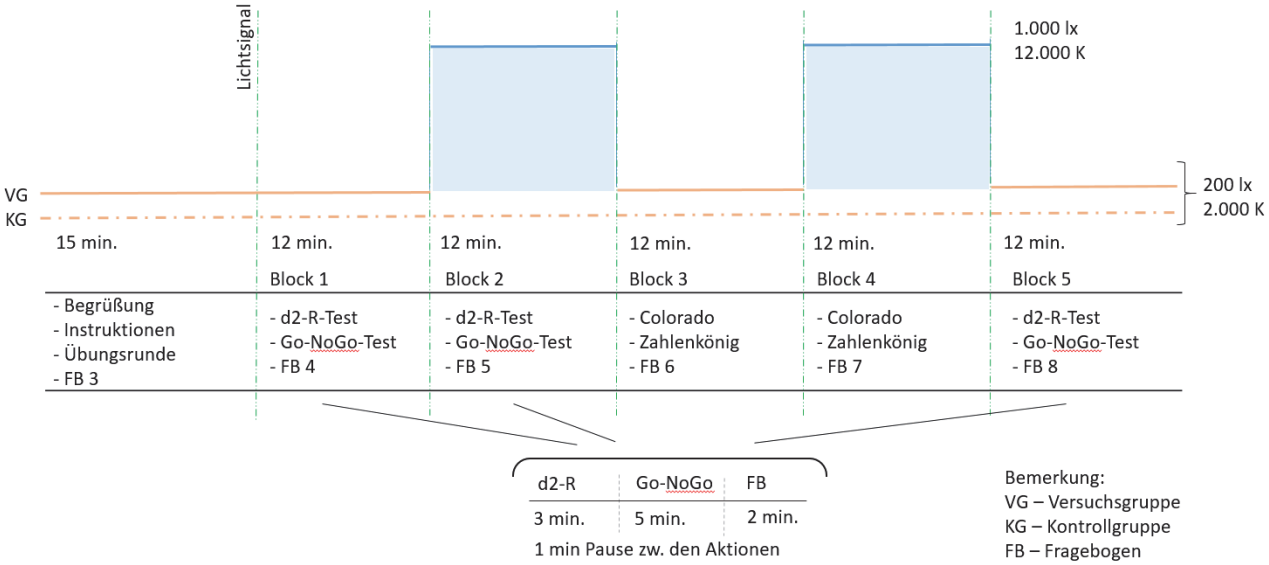
Der Versuch setzt sich zusammen aus einem Online-Vorabfragebogen, der Trainingsphase und der eigentlichen Versuchsphase.
Der Online-Vorabfragebogen enthält allgemeine Fragen zu Geschlecht, Alter, Größe, Händigkeit, Art der Sehhilfe, berufliche und private Situation sowie zur Art lichttechnischer Vorkenntnisse u.a..
Die Probanden kommen an einem Tag morgens von 9:00 – 9:45 Uhr (erste Trainingsphase) und nachmittags von 14:00 – 15:30 Uhr (zweite Trainingsphase und Versuchsphase mit Durchführung des Experiments) ins Labor. An einem Versuchstermin können maximal sechs Personen gleichzeitig teilnehmen und die Versuchsleitung ist sowohl während Trainingsphase, als auch während des der Versuchsphase im Versuchsraum anwesend. Die Lichtbedingung für die Versuchsphase und der Arbeitsplatz der Versuchspersonen werden zufällig ausgewählt.
Die Trainingsphase findet sowohl in der Kontroll- als auch in der Versuchsgruppe unter der warmweißen Lichtszene statt. In folgender Tabelle ist der Ablauf der Trainingsphase detailliert dargestellt.

Tabelle 2: Ablauf Trainingsphase



Die Versuchsphase erfolgt direkt im Anschluss an die Trainingsphase am Nachmittag und ist in fünf Blöcke á 12 Minuten eingeteilt (basierend auf den Versuchen von Chang et al. 2012). Die Blöcke sind jeweils durch ein Lichtsignal voneinander getrennt. Um den Erwartungseffekt der Versuchspersonen auf die experimentellen Bedingungen zu minimieren, wird dieses Lichtsignal sowohl in der Versuchs- als auch in der Kontrollgruppe verwendet. Dabei wird die Deckenbeleuchtung mit einem Fade-Out ausgeschaltet, während die hinterleuchteten Wände vor und hinter den Teilnehmenden mit einem Fade-In eingeschaltet werden. Das Lichtsignal dauert 10 Sekunden. Sowohl die Versuchs- als auch die Kontrollgruppe sind somit gleichermaßen über den Beginn des nächsten Blockes informiert, um experimentelle Verzerrungen der Ergebnisse zu vermeiden. Anschließend werden die Wandbeleuchtung wieder runter- und die Deckenbeleuchtung wieder hochgefahren. In der Versuchsgruppe wird dabei die Lichtszene gewechselt.
Die kaltweiße Lichtszene (KW) ist während der Versuchsphase in der Versuchsgruppe mit der warmweißen Lichtszene im Wechsel geschaltet. In Block 2 und Block 4 arbeiten die Versuchspersonen unter der kaltweißen Lichtszene. In Block 1, 3 und 5 ist die warmweiße Lichtszene eingeschaltet. Der Übergang zwischen den Lichtszenen erfolgt mit Hilfe des Lichtsignals, um den starken Übergang so angenehm wie möglich zu gestalten.
Während der Versuchsphase mit der Kontrollgruppe ist die Beleuchtung quasi-statisch. Vor jedem Block wird lediglich das Lichtsignal eingeschaltet, welches auf etwa gleiche Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe programmiert ist. Während der verschiedenen Blöcke ist die warmweiße Lichtszene (WW) eingeschaltet.
In den Blöcken 1, 2 und 5 werden der d2-R- und der auditive Go-NoGo-Test (Audiotest) durchgeführt und ein Fragebogen ausgefüllt. In Block 3 und 4 werden zwei Aufgaben *Colorado* und *Zahlenkönig* der App „NeuroNation“ (Synaptikon GmbH) auf dem Tablet eingeführt und gelöst, um eine Abwechslung in den Versuchsablauf zu bringen und eine Überbeanspruchung durch die Tests zu vermeiden. Der Ablauf der Versuchsphase ist im Einzelnen der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 3: Ablauf Versuchsphase



Der Inhalt der Fragebögen sowohl für die Trainingsphase als auch für die Versuchsphase sind in Tabelle 4 dargestellt. Der Fragebogen zum Wohlbefinden erfasst die subjektive Wachheit mittels der in neun Stufen unterteilten Karolinska-Sleepiness-Scale und das subjektive Empfinden wird durch die Angaben zu Konzentriertheit, Stressgefühl und Motivation beschrieben und mittels siebenstufiger Skalen erfasst.

Tabelle 4: Inhalt der Fragebögen

Fragebogen	Inhalt
1	- Wohlbefinden [1] - bisheriger Tagesverlauf [2]
2, 4, 6, 7	- Testbedingungen [3] - Wohlbefinden
3	- Wohlbefinden - bisheriger Tagesverlauf [4] - Umgebungsbedingungen im Raum
5	- Testbedingungen - Wohlbefinden - Umgebungsbedingungen im Raum
8	- Testbedingungen - Wohlbefinden - Umgebungsbedingungen im Raum - Veränderung des Lichts

[1] subjektive Wachheit und subjektives Empfinden für Konzentriertheit, Stressgefühl und Motivation

[2] Bettgehzeit, Aufstehzeit, Frühstück ja/nein, Aufenthalt im Freien, Ungewöhnliches

[3] Schwierigkeit und Ablenkung

[4] Koffeinkonsum, Mittag ja/nein, Aufenthalt im Freien, Schlaf, körperliche Aktivität, Ungewöhnliches

3 Ergebnisse

Die statistische Auswertung der Testergebnisse und Fragebögen aus der Testphase erfolgt anhand der Mixed-Anova-Berechnung. Die Gruppenzugehörigkeit (Kontrollgruppe KG und Versuchsgruppe VG) wird dabei als Zwischensubjektfaktor (between) und die Zeit als Innersubjektfaktor (within) betrachtet. Als Innersubjektfaktor werden die wiederholten Messungen der Tests bzw. die wiederholten Angaben zum Wohlbefinden, die über die Zeit erfolgen, untersucht.

3.1 d2-R-Test

Die anhand der Mixed-Anova-Analyse berechneten Ergebnisse zeigen keine statistisch erkennbare signifikante Interaktion zwischen der Konzentrationsleistung der d2-R-Tests über die Zeit und der Gruppenzugehörigkeit *(F(2; 116) = 1,596, p = 0,207).*
Die Konzentrationsleistung der d2-R-Tests verbessert sich über die Zeit *(p < 0,001)*. Dies kann auf einen möglichen bleibenden Lerneffekt hinweisen. Es ist kein Effekt der Gruppe (Zwischensubjekteffekt) erkennbar *(p = 0,634 > 0,05)*.

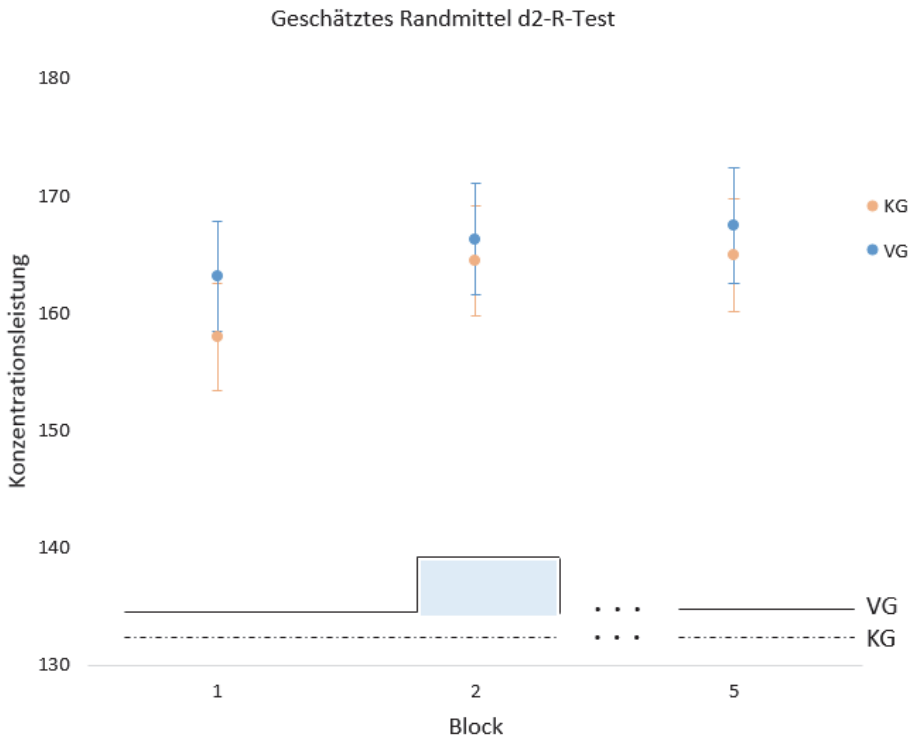


Abbildung 2: Profildiagramm der Konzentrationsleistung des d2-R-Tests

3.2 Go-NoGo-Audiotest

Der Test auf Innersubjekteffekte ergibt keine statistisch signifikante Interaktion zwischen den Medianen der Reaktionszeit über die Zeit der Audiotests und der Gruppenzugehörigkeit *(F(2; 112) = 0,794, p = 0,454).* Es ist zwar ein Anstieg der Aufmerksamkeit (sinkende Mediane der Reaktionszeiten) über die Zeit signifikant *(p = 0,001 < 0,05)*, jedoch ist kein Zwischensubjekteffekt der Gruppe zu erkennen *(p = 0,576 > 0,05)*. Die Gruppen unterscheiden sich somit nicht signifikant voneinander.

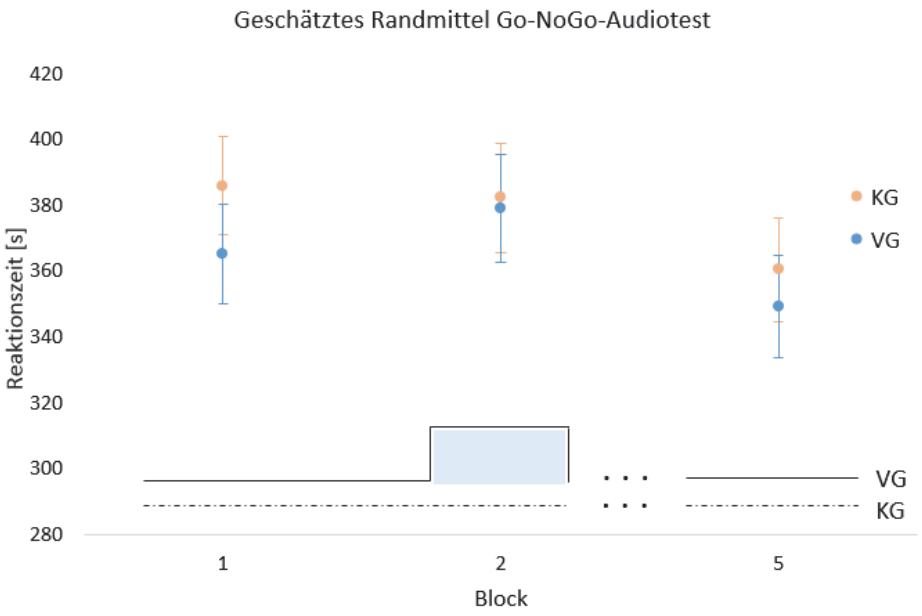


Abbildung 3: Profildiagramm der Reaktionszeit des Go-NoGo-Audiotests

3.3 Subjektive Wachheit

Es ist keine statistisch signifikante Interaktion zwischen den Angaben der subjektiven Wachheit der Karolinska-Sleepiness-Scale (KSS) über die Zeit und der Gruppe vorhanden (*F(3,503; 119,696) = 1,165; p = 0,327 > 0,05)*. Auch die Zwischensubjekteffekte der Gruppe sind nicht signifikant (*p = 0,538 > 0,05*). Es ist jedoch eine signifikante Ermüdung über die Zeit erkennbar (*p = 0,001*).

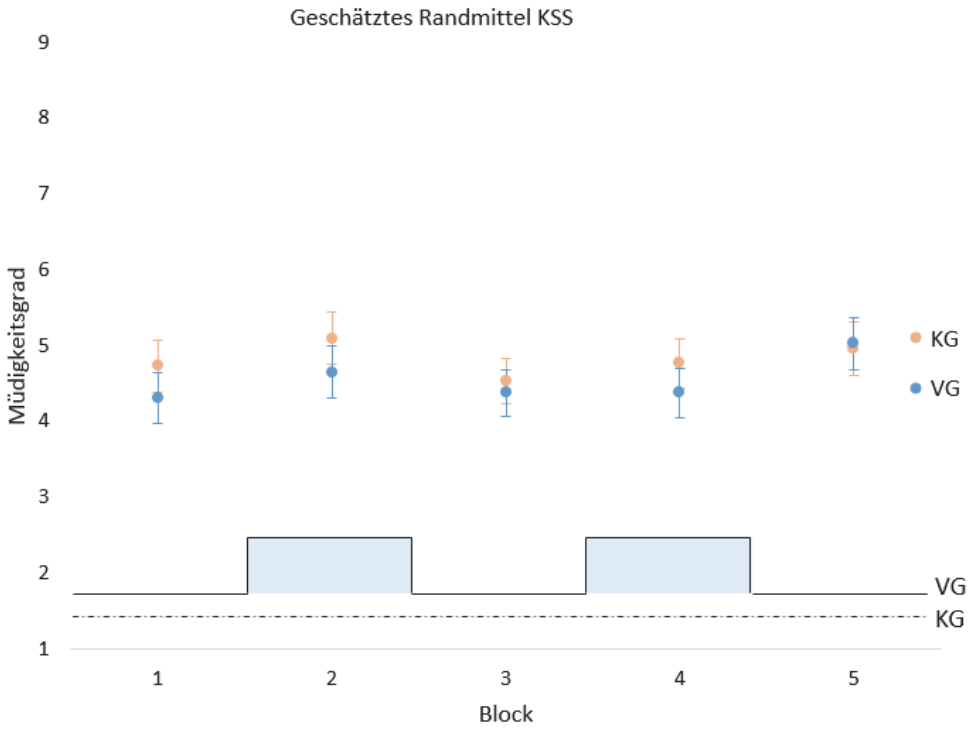


Abbildung 4: Profildiagramm der subjektiven Müdigkeit

3.4 Subjektives Empfinden der Konzentriertheit

Die Mixed-Anova-Berechnung ergibt keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der im Fragebogen angegebenen subjektiven Konzentriertheit über die Zeit und der Gruppenzugehörigkeit *F(4; 232) = 1,210; p = 0,307 > =0,05)*. Auch der Test auf die Zwischensubjekteffekte zeigt keine Signifikanz der Gruppen (*p = 0,664 > 0,05)*.

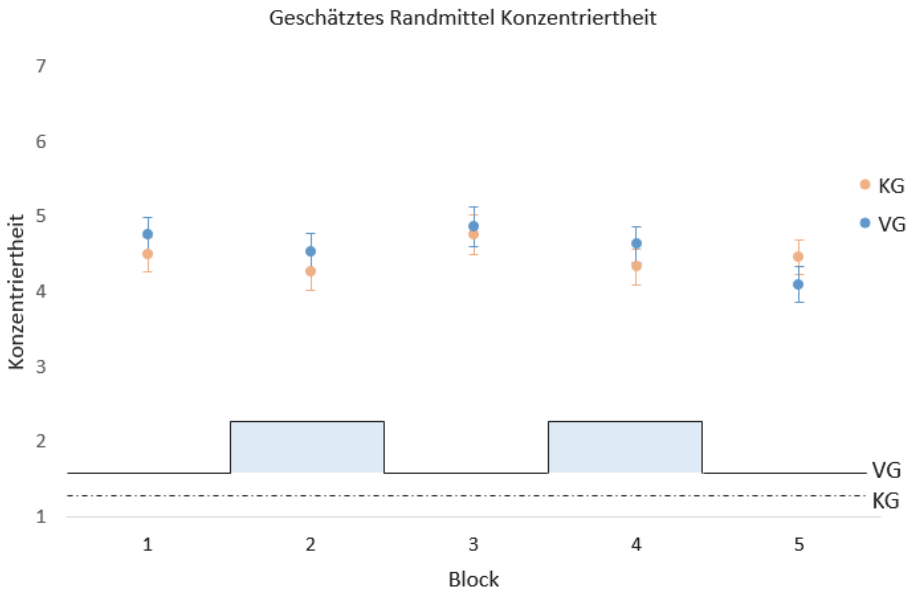


Abbildung 5: Profildiagramm der subjektiven Konzentriertheit

3.5 Subjektives Empfinden des Stressgefühls

Es ist keine statistisch signifikante Interaktion zwischen dem Verlauf dem subjektiven Stressgefühl und der Gruppenzugehörigkeit nachweisbar *(F(4; 232) = 1,218; p = 0,304 > 0,5)*. Zudem ist keine Signifikanz der Zwischensubjekteffekte der Gruppen zu erkennen *(p = 0,764 > 0,05).*

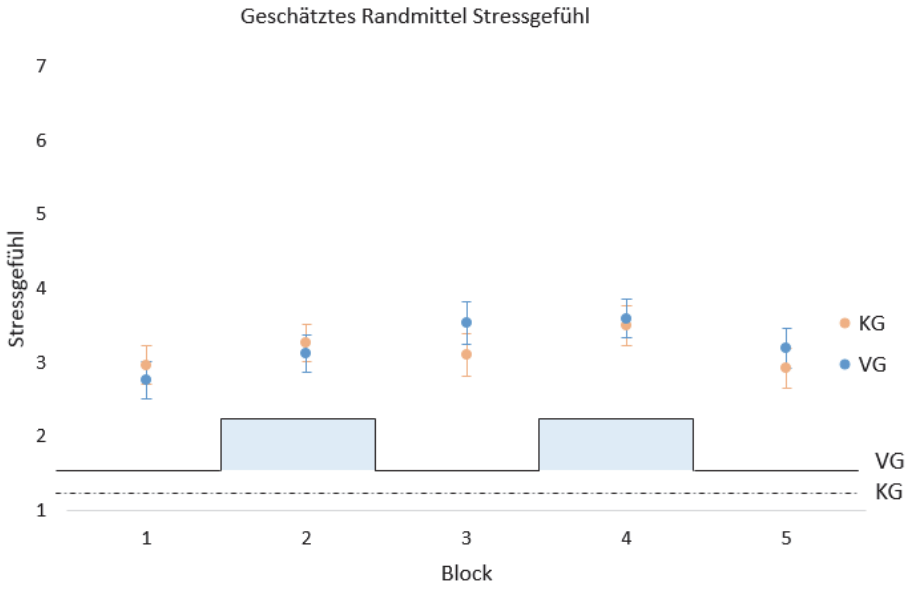


Abbildung 6: Profildiagramm des Stressgefühls

3.6 Subjektives Empfinden der Motivation

Es liegt keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der subjektiven Motivation über den Zeitraum des Versuchs und der Gruppenzugehörigkeit vor *(F(3,763; 218,257) = 0,952; p = 0,431 > 0,5)*. Die Zwischensubjekteffekte zeigen keine signifikanten Ergebnisse *(p = 0,552 > 0,05).* Ein signifikanter Zeiteffekt (p = 0,015) zeigt, dass die Motivation während des Versuchs sinkt und ist anhand des Profildiagramms in Abbildung 7 darstellbar. Der Motivationsanstieg in Block 3 geht einher mit der Einführung der Tablet-Aufgaben und der damit verbundenen Abwechslung des bis dahin monotonen Versuchsablaufs.

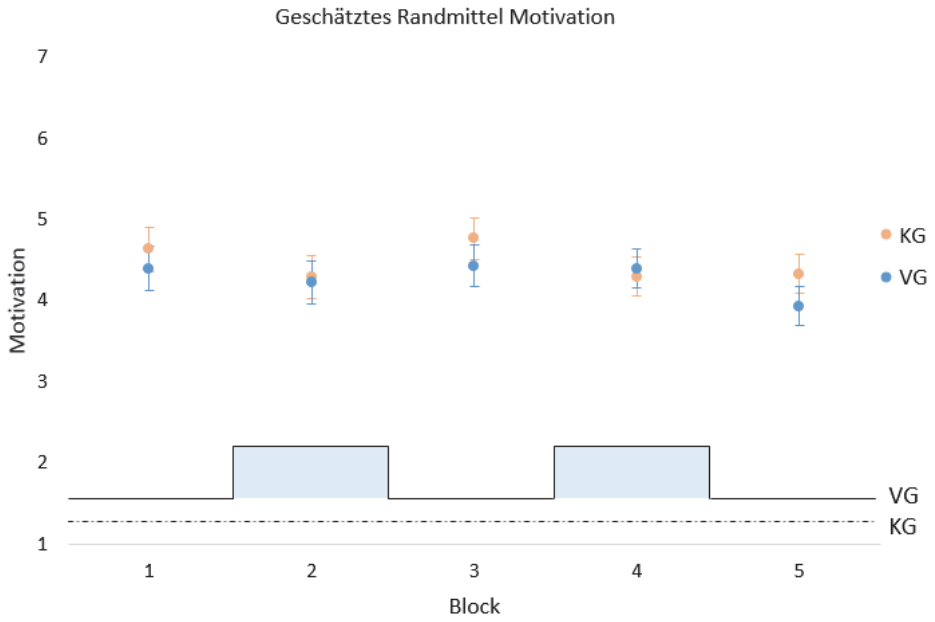


Abbildung 7: Profildiagramm der Motivation

4 Diskussion

Es wurde untersucht, ob die Exposition von dynamischem Licht im Wechsel zwischen zwei Lichtszenen unterschiedlicher vertikaler Beleuchtungsstärke am Auge und unter Erhöhung des melanopischen Wirkungsfaktors während des Mittagstiefs die Aufmerksamkeit steigert und das Wohlbefinden im Vergleich zu einer statischen warmweißen Lichtszene mit niedriger vertikaler Beleuchtungsstärke verbessert.
Es tritt zwar eine Steigerung der Aufmerksamkeit bei der Versuchsgruppe (VG) auf, die anhand der Konzentrationsleistung der d2-R-Tests und der Reaktionszeit der Go-NoGo-Audiotests gemessen wird. Eine Aufmerksamkeitssteigerung ist jedoch auch bei der Kontrollgruppe (KG) zu erkennen. Zwischen der VG und der KG gibt es keine statistisch signifikanten Unterschiede.
Die subjektive Wachheit (KSS) kann entgegen der Untersuchungshypothese nicht gesteigert werden. Am Ende der Versuchsphase weisen die Versuchspersonen beider Gruppen einen höheren Müdigkeitsgrad auf.
Das subjektive Empfinden wird durch die Angaben für Konzentriertheit, Stressgefühl und Motivation beschrieben. Eine Verbesserung des subjektiven Empfindens der VG stellt sich nicht ein. Die Versuchspersonen der VG fühlen sich am Ende des Versuchs unkonzentrierter, gestresster und weniger motiviert. Die Konzentriertheit und das Level des Stressgefühls der KG am Ende des Versuchs entsprechen den Angaben zum Versuchsbeginn. Auch die Versuchspersonen der KG sind nach dem Versuch demotivierter als zuvor.
Wird die subjektive Konzentriertheit mit den Messungen der Aufmerksamkeit anhand der d2-R-Tests und der auditiven Go-NoGo-Tests verglichen, zeigt sich eine Diskrepanz zwischen den Testergebnissen und der subjektiven Bewertung. Beim subjektiven Empfinden fühlen sich die Versuchspersonen zum Ende hin tendenziell weniger konzentriert als zu Beginn. Die Testergebnisse zeigen hingegen eher ansteigende Konzentrationsleistungen bzw. sinkende Reaktionszeiten. Mögliche Gründe wären eine fehlerhafte Übereinstimmung von subjektivem Gefühl und tatsächlich erbrachter Leistung oder ein Lerneffekt in der Testbearbeitung.
Der dynamische Lichtwechsel hat keinen positiven Einfluss auf das Wohlbefinden. Die Ursachen für die Verschlechterung des subjektiven Empfindens und der gesunkenen momentanen Wachheit können neben unpassenden Lichtszenen u.U. an der Länge des Versuchs und der gleichbleibenden sich wiederholenden Aufgabenreihenfolge in der Vorphase und den Blöcken 1, 2 und 5 der Versuchsphase liegen.
Dafür, dass die Untersuchungshypothese nicht bestätigt werden kann, sind verschiedene Gründe denkbar. Eine Ursache kann in der Art der Beleuchtung liegen. Hier fließen verschiedene Aspekte ein. Zum einen ist der Unterschied zwischen dem Referenzlicht und dem kaltweißen Licht des Lichtwechsels sehr groß. Der sichtbare Unterschied des Lichtwechsels kann ebenso als Störfaktor betrachtet werden. Einige Reaktionen der Versuchspersonen während des Versuchs zeigen, dass der Lichtwechsel teilweise als extrem und unangenehm wahrgenommen wird. Dies kann weitere Versuchspersonen im Raum negativ beeinflussen und konditionieren. Der fehlende Effekt kann auch in einer zu kurzen Dauer der Lichtexposition (12 min-Blöcke) während der VG liegen. Eine Verlängerung der Lichtexposition bei gleichem Versuchsdesign führt jedoch zu einer zu langen Versuchsphase, was sich negativ auf die Motivation und den Wachheitszustand auswirken kann. Bei Verlängerung der Lichtexposition sollte ein neues Versuchsdesign entwickelt werden. Zudem gibt es keinen echten Placeboeffekt zum Lichtwechsel. Obwohl ein Lichtsignal zwischen den Blöcken sowohl bei der VG als auch bei der KG gezeigt wird, ist der Lichtwechsel für die VG deutlich sichtbar. Die Versuchsgruppe ist für den Versuch nicht blind, auch wenn der Lichtwechsel mit Hilfe des Lichtsignals abgeschwächt wird. Eine Alternative kann hierbei eine Verminderung des Lichtunterschiedes sein,

insbesondere der vertikalen Beleuchtungsstärke. Die in dieser Arbeit erfolgte Studie kann hierfür als Orientierung genutzt werden, um einen dynamischen Lichtwechsel angenehmer und dennoch effektiv zu gestalten. Zudem hat der Einfallswinkel des Lichts einen möglichen Einfluss auf die Aktivierung der ipRGC-Zellen im Auge, welche als mitverantwortlich für die Aufmerksamkeitssteigerung durch Beleuchtung gesehen werden. Bei weiteren Untersuchungen sollte sichergestellt werden, dass der Einfallswinkel der Beleuchtung optimal ist, um eine Aktivierung der ipRGC-Zellen hervorrufen zu können.
In der Zeit zwischen Vorversuch am Morgen und Testdurchführung am Nachmittag durften die Versuchspersonen ihrem gewöhnlichen Alltag nachgehen. Dieser kann Einfluss auf Aufmerksamkeit und Wohlbefinden haben. Deshalb wurden u.a. verschiedene Aktivitäten z.B. Freizeit vs. Arbeit, Lichthistorie: Aufenthalt im Freien oder drinnen, und (keine) Einnahme von Mahlzeiten und Koffein per Fragebogen abgefragt. Unterschiedliche Wetterbedingungen beeinflussen die Lichthistorie der Versuchspersonen zusätzlich und können anhand von Wetterdaten zumindest nachvollzogen werden. Dieses Vorgehen ermöglicht jedoch nur eine nachträgliche Untersuchung der genannten Einflüsse. Noch besser ist es, diesen Zeitraum zukünftig in den Versuch im Versuchsraum (kein Tageslicht) zu integrieren und so eine direkte Kontrolle zu ermöglichen.
Die Umgebungsbedingungen im Versuchsraum sind ein weiterer möglicher Störfaktor. Die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO_2-Konzentration wurden während des Versuchs aufgenommen. Diese Werte lagen stets in den Grenzen der Behaglichkeit, außer an drei Versuchstagen, an denen eine Fehlfunktion in der Belüftung des Versuchsraums vorlag und eine CO_2-Konzentration über 1.000 ppm erreicht wurde. Dies betraf sechs Probanden der Versuchsgruppe und sieben Probanden der Kontrollgruppe, sodass sich der Effekt ausgleicht.
Die Studie ist so konzipiert, dass pro Versuchstag sechs Personen teilnehmen können. Die maximale Besetzung ist abhängig vom tatsächlichen Erscheinen der Versuchspersonen. Dies kann die Ergebnisse der Studie beeinflussen, da es bei einer höheren Anzahl von Versuchspersonen unruhiger im Versuchsraum ist und zu mehr Ablenkung durch gestellte Fragen etc. kommt. In diesem Versuch, war die Versuchsleitung im Raum anwesend, um bei technischen Problemen der Geräte helfen zu können oder Unklarheiten aus dem Weg zu räumen. Dies schließt mit ein, dass trotz gleicher Instruktionsanweisungen allein die Anwesenheit oder Reaktionen der Versuchsleitung den Versuch beeinflussen können. Die Gestaltung des Versuchs unabhängig von der Versuchsleitung sollte umgesetzt werden.

5 Ausblick

Die Hypothese, dass dynamische Lichtwechsel im Beleuchtungsniveau und der spektralen Verteilung des Lichts die Aufmerksamkeit steigern können, konnte in dieser Studie nicht belegt werden, bietet jedoch eine Vergleichsmöglichkeit für bereits erfolgte Studien im Forschungsprojekt und dient als Grundlage für weiterführende Untersuchungen im Projekt NiviL. U.a. wurde eine Studie (Rothert et al. 2017) des gleichen Projekts im Feldversuch mit 86 Studierenden mit ähnlichem Ziel durchgeführt. Auch hier kamen der d2-R-Test als Messgröße für die Aufmerksamkeit und die gleichen Fragebögen zur Ermittlung des Wohlbefindens zum Einsatz. Es wurde kein signifikanter Einfluss der Lichtbedingungen gefunden. Diese Ergebnisse befinden sich im Einklang mit Ergebnissen anderer Autoren, die keine oder widersprüchliche Einflüsse von Licht auf die Aufmerksamkeit fanden (Segal et al. 2016; St Hilaire et al. 2017; Rahman et al. 2014). Dem gegenüber stehen die eingangs erwähnten Studien mit positiven Ergebnissen.
Das Zusammenwirken von Licht auf biologische und kognitive Prozesse als auch auf das subjektive Empfinden ist sehr komplex und hängt von vielen teilweise schwer zu kontrollierenden Parametern ab. Ein Ansatz für zukünftige Studien sollte es sein, diese Störgrößen möglichst auszuschalten z.B. indem Versuchspersonen langfristig im Labor untersucht werden. Optimal wäre zudem eine konstante Anzahl von Personen pro Versuch, die Unabhängigkeit des Versuchs von der Versuchsleitung sowie gleichbleibende Umgebungsbedingungen. Der Ausschluss von Tageslicht, um den Einfluss des erhöhten kurzwelligen Bereiches von künstlichem Licht zu untersuchen, ist sinnvoll. Die Art des dynamischen Lichtwechsels muss weitergehend untersucht und angepasst werden, um optimale Versuchsbedingungen zu erhalten und Antworten auf die Forschungsfrage zu finden. Des Weiteren sollte der Einfluss dynamischen Lichts auf andere Altersgruppen aufgrund altersbedingter Veränderungen des Sehapparats untersucht werden. Außerdem sollte die Messgröße *‚Aufmerksamkeit‘* durch ein breites Spektrum an Tests und Fragebögen abgedeckt werden.
Diese Arbeit stellt eine Grundlage zur Verbesserung von Versuchsbedingungen in diesem Forschungsfeld dar. Des Weiteren können die hier erhobenen Daten und Ergebnisse für die Auswertung in größeren Zusammenhängen genutzt werden, um ein Modell zur Charakterisierung nicht-visueller Lichtwirkungen zu erstellen.

Literaturverzeichnis

Åkerstedt, Torbjörn; Gillberg, Mats (1990): Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. In: *Int J Neurosci* 52 (1-2), S. 29–37. DOI: 10.3109/00207459008994241.

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

Burgess, Helen J.; Crowley, Stephanie J.; Gazda, Clifford J.; Fogg, Louis F.; Eastman, Charmane I. (2003): Preflight Adjustment to Eastward Travel:3 Days of Advancing Sleep with and without Morning Bright Light. In: *Journal of biological rhythms* 18 (4), S. 318–328. DOI: 10.1177/0748730403253585.

Cajochen, Christian (2007): Alerting effects of light. In: *Sleep medicine reviews* 11 (6), S. 453–464. DOI: 10.1016/j.smrv.2007.07.009.

Chang, Anne-Marie; Santhi, Nayantara; St Hilaire, Melissa; Gronfier, Claude; Bradstreet, Dayna S.; Duffy, Jeanne F. et al. (2012): Human responses to bright light of different durations. In: *The Journal of Physiology* 590 (Pt 13), S. 3103–3112. DOI: 10.1113/jphysiol.2011.226555.

Gronfier, Claude; Wright, Kenneth P.; Kronauer, Richard E.; Jewett, Megan E.; Czeisler, Charles A. (2004): Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans. In: *American journal of physiology. Endocrinology and metabolism* 287 (1), S. E174-81. DOI: 10.1152/ajpendo.00385.2003.

Keis, Oliver; Helbig, Hannah; Streb, Judith; Hille, Katrin (2014): Influence of blue-enriched classroom lighting on students′ cognitive performance. In: *Trends in Neuroscience and Education* 3 (3-4), S. 86–92. DOI: 10.1016/j.tine.2014.09.001.

Mills, Peter R.; Tomkins, Susannah C.; Schlangen, Luc J M (2007): The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. In: *Journal of circadian rhythms* 5, S. 2. DOI: 10.1186/1740-3391-5-2.

Niedling, M.; Völker, S.; Knoop, M.; Rothert, I. (2017): Eine LED-Leuchte für die Forschung. Leuchtenentwicklung für das NiviL-Projekt. In: *LICHT* 02/2017, S. 78–81.

Rahman, Shadab A.; Flynn-Evans, Erin E.; Aeschbach, Daniel; Brainard, George C.; Czeisler, Charles A.; Lockley, Steven W. (2014): Diurnal spectral sensitivity of the acute alerting effects of light. In: *Sleep* 37 (2), S. 271–281. DOI: 10.5665/sleep.3396.

Rothert, I.; Völker, S.: Impact of spectrum and illuminance on alertness – a quasi-field study in a lecture hall. In: Lux Europa 2017 Proceedings.

Saathoff, B. (2017): Einfluss dynamischen Lichtwechsels unter Änderung des Beleuchtungsniveaus und der spektralen Verteilung auf die Aufmerksamkeit und das Wohlbefinden. Masterarbeit. Technische Universität Berlin, Berlin. Fachgebiet Lichttechnik.

Segal, Ahuva Y.; Sletten, Tracey L.; Flynn-Evans, Erin E.; Lockley, Steven W.; Rajaratnam, Shantha M. W. (2016): Daytime Exposure to Short- and Medium-Wavelength Light Did Not Improve Alertness and Neurobehavioral Performance. In: *Journal of biological rhythms* 31 (5), S. 470–482. DOI: 10.1177/0748730416659953.

Shamsul, B.M.T; Sia, C. C.; Ng, Y.G; Karmegan, K. (2013): Effects of Light's Colour Temperatures on Visual Comfort Level, Task Performances, and Alertness among Students. In: *AJPHR* 1 (7), S. 159–165. DOI: 10.12691/ajphr-1-7-3.

Smolders, Karin C.H.J.; de Kort, Yvonne A.W. (2014): Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. In: *Journal of Environmental Psychology* 39, S. 77–91. DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.12.010.

St Hilaire, Melissa A.; Rüger, Melanie; Fratelli, Federico; Hull, Joseph T.; Phillips, Andrew J. K.; Lockley, Steven W. (2017): Modeling Neurocognitive Decline and Recovery During Repeated Cycles of Extended Sleep and Chronic Sleep Deficiency. In: *Sleep* 40 (1). DOI: 10.1093/sleep/zsw009.

Synaptikon GmbH: NeuroNation. Online verfügbar unter https://www.neuronation.de/science/exercises-scientific-background, zuletzt geprüft am 14.07.2017.

van Bommel, Wout J M (2006): Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. In: *Applied ergonomics* 37 (4), S. 461–466. DOI: 10.1016/j.apergo.2006.04.009.