

Evaluierung der Auswirkungen von klein- und großflächigen Leuchten auf die Melatoninsuppression als Maß für nicht-visuelle Wirkungen von Licht

Laura Thelen,¹ Philipp Novotny,² Dipl.-Ing. Kai Broszio,¹ Dr. Martine Knoop,¹
Prof. habil. Dr.-Ing. Stephan Völker¹

¹ Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

² Ludwig-Maximilians-Universität München

Zusammenfassung

Seit der Entdeckung des ipRGC Rezeptors gilt dem Forschungsgebiet nicht-visuelle (eng. non-image-forming, NIF) Wirkung von Licht neue Aufmerksamkeit. "Nicht-visuell" bedeutet, dass ein Fehlen des ipRGC (engl. intrinsically photosensitive retinal ganglion cells) Rezeptors keine Auswirkung auf das Sehen des Menschen hätte, jedoch wären Auswirkungen auf den circadianen Rhythmus des Menschen zu beobachten. Der ipRGC Rezeptor ist eine fotosensitive Ganglienzelle und mit nur weniger als 5% aller Ganglienzellen auf der Netzhaut des Auges verteilt. Der Rezeptor enthält das Photopigment Melanopsin. Wird der Rezeptor angeregt, so kann nachts die Ausschüttung des Hormons Melatonin durch die Zirbeldrüse gehemmt werden. Melatonin wird zunehmend im Laufe der Abendstunden und während der Nacht ausgeschüttet. Mit einer angepassten Beleuchtung könnte der circadiane Rhythmus eines Menschen unterstützt werden. Zur Untersuchung des Einflusses der Größe der Lichtquelle auf die Melatoninunterdrückung wurde im Jahr 2013 von Philipp Novotny et al. eine Probandenstudie mit 30 Versuchsteilnehmern durchgeführt. Diese wurden mit zwei unterschiedlich großen Flächen beleuchtet, um zu erforschen ob die Melatoninunterdrückung flächenabhängig ist. Der Melatoninspiegel wurde mittels Salivaproben untersucht. Bereits 2010 führte Philipp Novotny et al. dieselbe Probandenstudie mit 6 Versuchsteilnehmern durch. Die Auswertung der Studiendaten ergaben einen Trend, dass eine große Fläche die Melatoninausschüttung unter den verwendeten Versuchsbedingungen mehr unterdrücken könnte.[5] Mittels einer größeren Teilnehmerzahl sollte dies 2013 wiederholt überprüft werden, jedoch wurden die Ergebnisse bisher noch nicht veröffentlicht. Dieser Beitrag stellt die ermittelten Ergebnisse von Novotny et al.s zweiter Studie vor, analysiert diese und berücksichtigt zusätzliche Faktoren wie z.B. den Einfallswinkel des Lichts in die Augen des Betrachters. Zur Charakterisierung der Lichtbedingungen und Beschreibung des Stimulus für nicht-visuelle Effekte wurde der Aufbau von Novotny et al.s Studie in einem LED Testraum am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin rekonstruiert. Hierbei soll eine fundierte Aussage über die Wirkung unterschiedlich großer Flächen getroffen werden.

Index Terms: ipRGC, Melatoninunterdrückung, Flächenabhängigkeit



1 Aktueller Forschungsstand:

Nicht-visuelle Wirkung von Licht bietet noch viel Forschungspotential. Da die ipRGC erst 2001 nachgewiesen werden konnten, und somit der Ursprung des biologischen Prozesses der Melatoninbildung erstmals mit der Wirkung des Lichts verbunden werden konnte, sind viele Einflussfaktoren noch nicht ausreichend erforscht. Bei folgenden Faktoren ergeben unabhängig voneinander geführte Studien jedoch eine ähnliche Auswirkungen:

1.1 Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke

Je höher die Leuchtdichte ist und damit die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge, desto höher ist die Melatoninunterdrückung. [11] Die ipRGC erreichen jedoch bei vertikalen Beleuchtungsstärken von $E_v = 500 \text{ lx}$ ein Plateau und höhere Beleuchtungsstärken haben keinen stärkeren Einfluss mehr auf die Stimulierung der Zellen. Bei $E_v = 100 \text{ lx}$ werden 50% der Ausreizung der ipRGC erreicht. [9]

1.2 Wellenlänge der Lichtquelle

Kurzwelliges, blaues Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 460 \text{ nm}$ bis 490 nm unterdrückt das Melatonin am stärksten. Die DIN SPEC 5031-100 beschreibt die spektrale Sensitivitätsfunktion der Melatoninunterdrückung und zeigt ein Maximum bei einer Wellenlänge von 490 nm , was dem aktuellsten Forschungsstand entspricht. [8] [19] [18]

1.3 Richtungsabhängigkeit der Lichtquelle zum Betrachter

Nasal auftreffendes Licht unterdrückt die Melatoninproduktion mehr als schläfenseitig auftreffendes Licht. [12] [13] Aus dem oberen Blickfeld auftreffendes Licht ist wirksamer als aus dem unteren. [14] [15]

1.4 Anatomie und Physiologie des Betrachters

Die Unterdrückung von Melatonin ist umso höher, wenn beide Augen beleuchtet werden anstelle von nur einem. [16] Jedoch bedeutet dies nicht, dass verschiedene Lichtbedingungen keinen Effekt auf blinde Menschen haben. Es wurde nachgewiesen, dass blaues Licht den Melatoninspiegel von Blinden ebenfalls beeinträchtigen kann. [17]

1.5 Ergebnis aus dem bisherigen Stand der Forschung

Aus den bisherigen Forschungen, besonders aus den letzteren zwei Punkten, ergibt sich die Aufteilung des Raumes für einen Betrachter wie in den Abbildungen 1 und 2 zu sehen ist. Broszio et al. schlagen in ihrer Veröffentlichung [2] vor, die Frontansicht in sechs Feldern aufzuteilen.

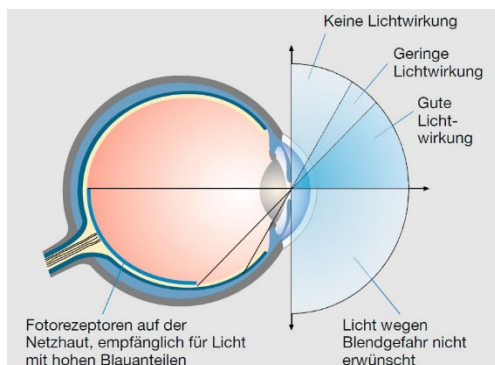


Abb. 1 Aufteilung der Höhenwinkel des einfallenden Lichts von der Fördergemeinschaft Gutes Licht [1]

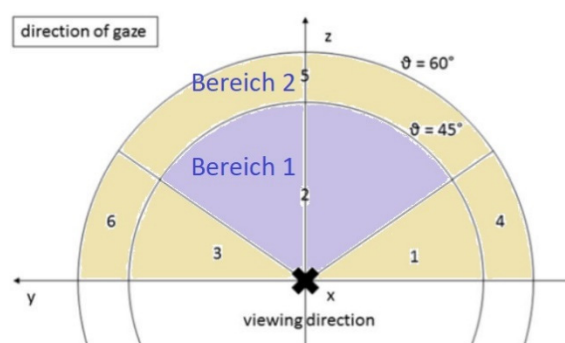


Abb. 2: Aufteilung des Blickfeldes in 6 Bereiche adaptiert von Broszio et al. [2]

1.6 Beleuchtungsstärke am sowie Flächenabbildung auf das Auge

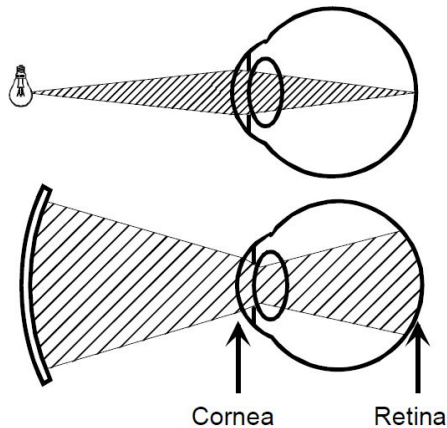


Abb. 3 Vergleich der Abbildung von großer und kleiner Fläche - von Schierz [4]

Aufgrund des biologischen Aufbaus des Auges werden Flächen unterschiedlich von der Hornhaut auf die Netzhaut abgebildet. Während eine punktförmige Lichtquelle auch nur punktförmig auf die Netzhaut abgebildet wird, deckt eine großflächige Lichtquelle mehr Zellen der Netzhaut ab, da sie großflächig abgebildet wird (siehe Abb. 3)[4]. Hierbei ergibt sich das Problem, dass häufig die Beleuchtungsstärke an der Hornhaut des Auges verglichen wird. Jedoch ist die Leuchtdichte der Lichtquellen, die auf die Netzhaut des Auges abgebildet werden, als Vergleichsparameter aussagekräftiger. Sie ist proportional zur Netzhautbeleuchtungsstärke, die für eine adäquate Beurteilung zu nutzen wäre. Außerdem hat die Leuchtdichte den Vorteil im Gegensatz zur Beleuchtungsstärke nicht vom Abstand der Lichtquelle zum Betrachter abzuhängen.[4]

Hat man also eine kleine Lichtquelle und verwendet die Beleuchtungsstärke als Maß, dann wird die kleine Fläche auch klein abgebildet und die gesamte Beleuchtungsstärke wirkt auf den kleinen abgebildeten Punkt. Bei einer großen Lichtquelle wirkt die gesamte Beleuchtungsstärke, jedoch über die Fläche verteilt, also wirkt weniger Beleuchtungsstärke auf die einzelnen Punkte der gesamten großen Fläche, als bei der kleinen Lichtquelle.

2 Studienbeschreibung:

Im Jahr 2013 untersuchte Philip Novotny et al.[5] die Auswirkung von unterschiedlich großen Flächen auf die Melatoninunterdrückung von 30 Probanden, je 15 Frauen und Männer. Es wurden zwei Flächen

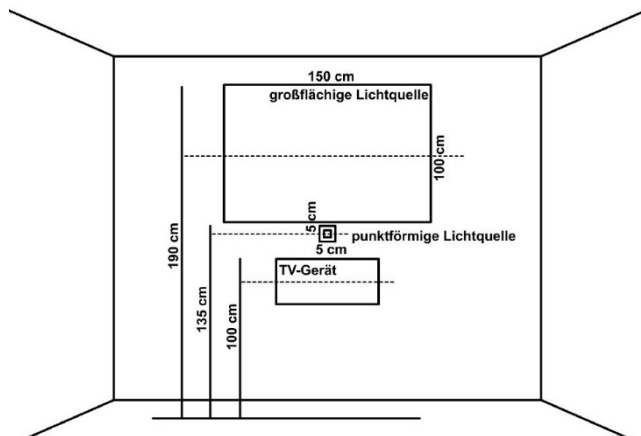


Abb. 4 Aufbau von Novotny et al.[5]

gewählt, eine große und eine kleine. Dessen Dimensionierung und Parameter sind in Tab. 1 und der Aufbau ist in Abb. 4 zu sehen. Die Studienteilnehmer wurden ab 21 Uhr untersucht. Nach einer zweistündigen Washoutphase, ein Zeitbereich, in dem die Probanden nur von blaugefiltertem Licht umgeben waren, wurden sie mit einer der beiden Lichtquellen für zwei Stunden beleuchtet, während der Versuchsteilnehmer gerade aus auf einen Fernsehbildschirm blickte. Der Fernseher wurde mit einem Blaufilter versehen, damit dessen Blauanteile keine Auswirkung auf die Probanden haben kann. Der Melatoninspiegel des Teilnehmers

wurde in äquidistanten Zeitabständen mittels Salivaprobe bestimmt. Es wurden ab 21 Uhr in 20-minütigen Abständen insgesamt 12 Salivaprobe entnommen. Nach einer Woche kamen die Versuchsteilnehmer wieder in die Versuchsräumlichkeiten und wurden unter denselben Bedingungen mit der jeweils anderen Lichtquelle beleuchtet und untersucht.

Tab. 1 Auflistung der Dimensionierung und Parameter der Lichtquellen von Philip Novotny et al.s Studie [5]

	Kleine Lichtquelle	Große Lichtquelle
Dimension der Fläche	5 cm x 5 cm	150 cm x 100 cm
Mittlere Höhe der Lichtquelle	135 cm	190 cm
Material vor Lichtquelle	Milchglas	Weiß bemalte, homogenstreuende Platte
Ähnlichste Farbtemperatur	10713 K	18504 K
a_{mel}	1,14	1,328
Beleuchtungsstärke an der Hornhaut	91 lx	86 lx

3 Methodik

Die Lichtquellen aus Novotny et al.s Probandenversuch wurden maßstabsgetreu in dem LED-Testraum des Fachgebiets Lichttechnik der TU Berlin rekonstruiert. Es sollte hierbei herausgefunden in welche Bereiche das Licht aus der Perspektive des Betrachters fällt. In dem Testraum ist die komplette Wand mit LED Kacheln versehen. 40 cm vor den Kacheln hängt eine Leinwand, die das Licht der LED-Kacheln diffus verteilt. In diesem Zwischenraum von Leinwand und LED-Kacheln, wurden mittels nichtlichtdurchlässigem Materials das Licht so abgedeckt, dass die Maße der großen und kleinen Lichtquelle (s. Tab. 1) erreicht werden. Mit Hilfe einer Leuchtdichtekamera (*LMK 5 color* der Firma Techno Team Bildverarbeitung GmbH) im Abstand von 85 cm zur Wand und 120 cm Höhe, wurden die Leuchtdichtebilder aufgenommen und ausgewertet.

4 Auswertung:

4.1 Vergleich der Felder:

Bei der kleinen Lichtquelle kommt das gesamte Licht aus dem Bereich 1 (siehe Definition der Felder in Abb. 2). Die große Lichtquelle belegt alle Bereiche wie in Abb. 5 zu sehen ist. Aus dem Bereich 1 trifft 56% der Gesamtbeleuchtungsstärke auf den Betrachter, und daraus folgen 37% für den Bereich 2 und die restlichen 7% fallen in den Bereich, dem keine Lichtwirkung zugeschrieben wird. Somit fällt die Mehrheit in den als "Gute Lichtwirkung" bezeichneten Bereich.

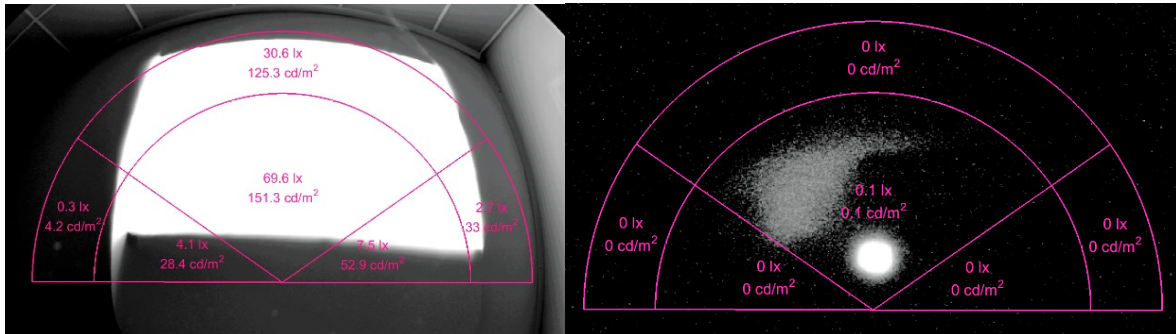


Abb. 5 LMK Aufnahmen der großen Lichtquelle (links) und der kleinen Lichtquelle (rechts)

4.2 Abbildungsbereich auf der Retina:

Lichtquellen werden ihrer Größe entsprechend auf der Retina abgebildet. So werden punktförmige Lichtquellen punktförmig abgebildet, großflächige Lichtquellen werden großflächig abgebildet [4]. Somit ist auch der Abbildungsbereich auf der Retina zu beachten. Bei einem gleichen Wertebereich des Pupillendurchmessers, ist jedoch zu sehen, welche Auswirkungen eine gleiche Hornhautbeleuchtungsstärke, als Maß zur Vergleichbarkeit der Lichtquellen, auf die retinale Beleuchtungsstärke hat. Die kleine Lichtquelle erzeugt eine viel höhere retinale Beleuchtungsstärke. Dies lässt vermuten, dass die kleine Lichtquelle die beleuchteten Bereiche der Netzhaut immens stark reizt. Somit hat sie möglicherweise einen größeren Einfluss auf die Melatoninunterdrückung, als die große Lichtquelle mit einer niedrigeren retinalen Beleuchtungsstärke. Es sei jedoch vorab angemerkt, dass bei 500 lx vertikaler Beleuchtungsstärke am Auge schon eine Sättigung der subjektiven Wachsamkeit erreicht sein kann.

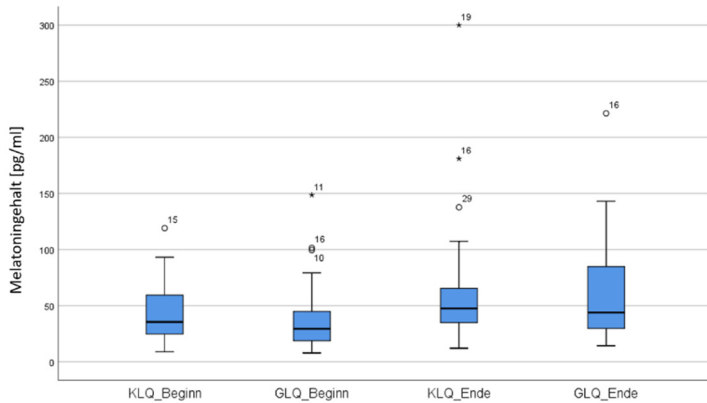
Tab. 2 Berechnete retinale Beleuchtungsstärke mittels Pupillendurchmesser; aus Novotny et al. [5]

	d_p [mm]	E_R [lx]
Kleine Lichtquelle	2,5 – 6,5	414 – 2801
Große Lichtquelle	2,5 – 6,5	0,9 – 6,1

4.3 Statistische Auswertung

Die Melatoninwerte der Studie wurden statistisch untersucht, wobei der Anfangswert (AW) vor der Beleuchtung und der Endwert (EW) nach der Beleuchtung der jeweiligen Quelle miteinander verglichen wurden.

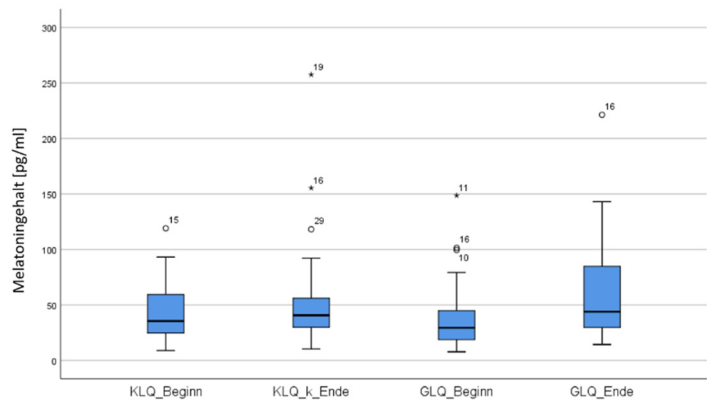
4.3.1 Kleine Lichtquelle vs große Lichtquelle



Beide Lichtquellen ergaben ein signifikantes Ergebnis mit $p < 0.05$, jedoch hat die kleine Lichtquelle minimal weniger unterdrückt. Der Abstand der Mittelwerte von Anfangs- zum Endwert der kleinen Lichtquelle (AW: 41.9 pg / ml; EW: 63.6 pg / ml) ist höher als bei der großen Lichtquelle (AW: 39.3 pg / ml; EW: 59.5 pg / ml).

Abb. 2: Boxplots der Melatoninwerte der kleinen Lichtquelle (KLQ) und großen Lichtquelle (GLQ) zu Beginn und Ende

4.3.2 Kleine Lichtquelle (korrigiert) vs große Lichtquelle



Da die große Lichtquelle aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften vermutlich besser für die Melatoninunterdrückung geeignet ist als die kleine Lichtquelle, wurde nach einem Korrekturfaktor für die Melatoninwerte gesucht. Hierbei wurde auf die unterschiedlichen melanopischen Wirkungsfaktoren zurückgegriffen. Der melanopische Wirkungsfaktor der großen Lichtquelle war höher (s. Tab.1) und wurde auf die Melatoninendwerte der kleinen Lichtquelle angewandt. Dies folgte in einer Reduzierung des Endwertes der kleinen Lichtquelle von

Abb. 3: Boxplots der Melatoninwerte der korrigierten kleinen Lichtquelle (KLQ) und großen Lichtquelle (GLQ) zu Beginn und Ende

ursprünglich 63.6 pg/ml zu 54.6 pg/ml. Das statistische Ergebnis wurde zudem nicht signifikant, was bedeuten könnte, dass die kleine Lichtquelle eine stärkere Melatoninunterdrückung verursachte.

4.3.3 Frauen vs Männer

Ein Vergleich der Melatoninwerte von Frauen und Männern (s. Tab. 3) ergab, dass Frauen nicht nur einen deutlich höheren Melatoninanstieg hatten, sondern auch der Mittelwert des Anfangswertes wesentlich höher war als bei den Männern.

Dass der Anstieg bei Frauen so stark ist konnten bereits Chellappa et al. beobachten [6], wo Männer zweimal so stark auf blaues Licht reagierten. Ferner fanden Gunn et al. [7] in ihrer Studie heraus, dass Männer allgemein weniger Melatonin ausschütten.

Tab. 3 Vergleich des Anfangs- und Endwertes nach Frauen und Männern getrennt für die kleine Lichtquelle

Kleine Lichtquelle	Anfangswert	Endwert
Frauen	49,4 pg/ml	71,7 pg/ml
Männer	34,4 pg/ml	37,5 pg/ml

5 Fazit

Zieht man die Kapitel 4.1 und 4.2 in Betracht, so vermutet man eine stärkere Unterdrückung des Melatonins durch die kleine Lichtquelle. Jedoch sieht man in Kapitel 4.3, dass die große Lichtquelle trotz ihrer kleineren retinalen Beleuchtungsstärke, dass Melatonin leicht besser unterdrückt. Dies könnte u.a. an der lichttechnischen Beschaffenheit der großen Lichtquelle liegen. Die große Lichtquelle hat nach Tab. 1 viel mehr Blauanteile, auch der melanopische Wirkungsfaktor ist höher. Weiterhin könnte es an einer größeren Abdeckung von ipRGC liegen. Auch wenn die kleine Lichtquelle eine über 100-fache retinale Beleuchtungsstärke verursacht, so wird sie aufgrund ihrer punktförmigen Abbildung nur wenige ipRGCs stimulieren. Der genaue Grund für die Ergebnisse ist jedoch derzeit unklar.

Die Anwendung des melanopischen Wirkungsfaktors der großen Lichtquelle auf die Melatoninwerte der kleinen Lichtquelle ergab, dass die kleine Lichtquelle besser das Melatonin unterdrückt, jedoch ist es ungewiss ob solch ein Korrekturfaktor überhaupt angewandt werden darf.

Die Auswertung der Daten wurde zusätzlich zu den unterschiedlichen lichttechnischen Eigenschaften auch durch die verschiedenen Höhen der Mittelpunkte der Flächen erschwert. Die große Lichtquelle besitzt mit 190 cm einen wesentlich höheren Mittelpunkt als die kleine Lichtquelle mit 135 cm.

Ferner wurde die Beleuchtungsstärke an der Hornhaut für beide Lichtquellen gleichgehalten. Dies sorgt für unterschiedliche Beleuchtungsstärken auf der Retina. Und obwohl die große Lichtquelle eine geringe Beleuchtungsstärke auf der Retina verursacht, unterdrückte sie das Melatonin stärker als die kleine Lichtquelle.

Die große Lichtquelle unterdrückte zwar das Melatonin besser, aber es ist nicht klar zuzuordnen aus welchem Grund dies geschah. Zudem ist unbekannt inwieweit die Lichtquellen wirksam waren, da es keine Kontrollprobandengruppe gab bzw die gleichen Probanden wurden nicht ein drittes Mal untersucht, wobei keine der beiden Lichtquellen eingesetzt wurde.

6 Empfehlung für zukünftige Studien

Der Probandenversuch von Novtony et al. ist ein wichtiger Anhaltspunkt für zukünftige Forschung. Mittels aktuellen Forschungsstand sollte ein Probandenversuch mit unterschiedlich großen leuchtenden Flächen wiederholt werden, da bislang nur Trends, jedoch keine fundierten Aussagen aufgestellt werden konnte. Essentiell ist dabei, dass auf die lichttechnischen Eigenschaften und ihre Vergleichbarkeit geachtet wird.

6.1 Angabe des Alters der Probanden

Bei einer Wiederholung wird zum einen empfohlen das Alter der Probanden anzugeben. Es war in der Auswertung durch fehlende Angaben des Studienprotokolls nicht möglich zu sagen, ob das Durchschnittsalter der Probanden bei 32 Jahren lag. Dies ist der Referenzwert der DIN SPEC 5031-100 [7]. Eine Abweichung dieses Alters bedarf eines Korrekturfaktors, da mit dem Altern des Auges die Transmission von blauem Licht, aufgrund einer gelblichen Färbung der Hornhaut, abnimmt. [4] [8]

6.2 Kontrollprobandengruppe

Weiterhin wird empfohlen entweder eine Kontrollprobandengruppe einzuführen oder die Probanden ein drittes Mal zu einem Dunkelszenario in die Räumlichkeiten einzuladen, um deren Melatoninwerte ohne Lichtquelle zu beobachten.

6.3 Lichthistorie

In der Studie wäre zusätzlich zu einer Washoutphase eine Protokollierung der Lichthistorie sowie zur Schlafqualität für die möglichst genaue Interpretation der Ergebnisse von Vorteil, da bereits vor der Washoutphase sich die Melatoninwerte der Probanden untereinander stark unterschieden und es somit nicht eindeutig war, an welchen Einflüssen es vor dem Betreten der Versuchsräumlichkeiten lag.

6.4 Verbesserung der Protokollierung

Zuletzt möchte noch auf die Empfehlung zur Beschreibung und Messung von Lichtszenen von Knoop et al. [10] in ihrer aktuellsten Veröffentlichung verwiesen werden. In dieser wird zusätzlich erläutert, wie wichtig eine umfangreiche und möglichst detaillierte Beschreibung und Dokumentation der Methodik eines Versuchsaufbaus und dessen Durchführung ist.

7 Literatur

[1] Fördergemeinschaft Gutes Licht. „Wirkung des Lichts auf den Menschen“. In: *licht.wissen* 19 (), S. 15–21. url: www.licht.de (besucht am 11. 06. 2019).

[2] Kai Broszio u. a. *Effective radiant flux for non-image forming effects – is the illuminance and the melanopic irradiance at the eye really the right measure?* Hrsg. von Technische Universität Berlin. Berlin, Germany, 2015.

[3] Jens Hannibal u. a. „Melanopsin expressing human retinal ganglion cells: Subtypes, distribution, and intraretinal connectivity“. In: *The Journal of comparative neurology* 525.8 (2017), S. 1934–1961. doi: 10.1002/cne.24181.

[4] Christoph Schierz. „Zur Photometrie nichtvisueller Lichtwirkungen“. In: 6. *Symposium „Licht und Gesundheit“* (März 2008), S. 112–123.

[5] Philipp Novotny u. a. „The Solid Angle of Light Sources and Its Impact on the Suppression of Melatonin in Humans“. In: *Human-Computer Interaction. Towards Intelligent and Implicit Interaction*. Hrsg. von David Hutchison u. a. Bd. 8008. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 454–463. isbn: 978-3-642-39341-9. doi: 10.1007/978-3-642-39342-6_50.

[6] Sarah L. Chellappa u. a. „Sex differences in light sensitivity impact on brightness perception, vigilant attention and sleep in humans“. In: *Scientific reports* 7.1 (2017), S. 14215. doi: 10.1038/s41598-017-13973-1.

[7] Pippa J. Gunn u. a. „Sex differences in the circadian profiles of melatonin and cortisol in plasma and urine matrices under constant routine conditions“. In: *Chronobiology international* 33.1 (2016), S. 39–50. doi: 10.3109/07420528.2015.1112396.

[8] *DIN SPEC 5031-100:2015-08, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren*. Berlin. doi: 10.31030/2334694.

[9] Christian Cajochen. „Alerting effects of light“. In: *Sleep medicine reviews* 11.6 (2007), S. 453–464. issn: 1087-0792. doi: 10.1016/j.smr.2007.07.009.

[10] Martine Knoop u. a. „Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects“. In: *LEUKOS* 15.2-3 (2019), S. 163–179. issn: 1550-2724. doi: 10.1080/15502724.2018.1518716.

[11] K. Thapan, J. Arendt und D. J. Skene. „An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans“. In: *The Journal of physiology* 535.Pt 1 (2001), S. 261–267. issn: 0022-3751. doi: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00261.x.

[12] Melanie Rüger u. a. „Nasal versus temporal illumination of the human retina: effects on core body temperature, melatonin, and circadian phase“. In: *Journal of biological rhythms* 20.1 (2005), S. 60–70. issn: 0748-7304. doi: 10.1177/0748730404270539

[13] E. K. Visser, D. G. Beersma und S. Daan. „Melatonin suppression by light in humans is maximal when the nasal part of the retina is illuminated“. In: *Journal of biological rhythms* 14.2 (1999), S. 116–121. issn: 0748-7304. doi: 10.1177/074873099129000498.

- [14] Gena Glickman u. a. „Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans“. In: *Journal of biological rhythms* 18.1 (2003), S. 71–79. issn: 0748-7304. doi: 10.1177/0748730402239678.
- [15] T. A. Lasko, D. F. Kripke und J. A. Elliot. „Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields“. In: *Journal of biological rhythms* 14.2 (1999), S. 122–125. issn: 0748-7304. doi: 10.1177/074873099129000506.
- [16] Jenny Y. Wang u. a. „Ocular Regulation of the Human Pineal Gland: the Significance of Total Retinal Exposure for Melatonin Suppression“. In: *Biologic Effects of Light 1998*. Hrsg. von Michael F. Holick und Ernst G. Jung. Bd. 146. Boston, MA: Springer US, 1999, S. 367–374. isbn: 978-1-4613-7296-7. doi: 10.1007/978-1-4615-5051-8_59.
- [17] C. A. Czeisler u. a. „Suppression of melatonin secretion in some blind patients by exposure to bright light“. In: *The New England journal of medicine* 332.1 (1995), S. 6–11. issn: 0028-4793. doi: 10.1056/NEJM199501053320102.
- [18] Steven W. Lockley, George C. Brainard und Charles A. Czeisler. „High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light“. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 88.9 (2003), S. 4502–4505. issn: 0021-972X. doi: 10.1210/jc.2003-030570.
- [19] Christian Cajochen u. a. „High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light“. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 90.3 (2005), S. 1311–1316. issn: 0021-972X. doi: 10.1210/jc.2004-0957.