Einfluss des Lichts auf die Aufmerksamkeit des Menschen am Tag

Inga Rothert[1], Falk Wieland[2], Mathias Niedling[1], Prof. Dr. Stephan Völker[1]

[1]*Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Einsteinufer 19, 10587 Berlin*

[2]*Technische Universität Dresden,* Fak. EUL, ELI, *Leistungselektronik, 01069 Dresden*

inga.rothert@tu-berlin.de

1. Einleitung

An schönen Sommertagen lockt uns der Sonnenschein ins Freie – wir fühlen uns munter und frisch –, während wir an grauen Regentagen deprimiert ins Zimmer flüchten. Dass das Licht der Sonne nicht nur zum Sehen dient, sondern auch unsere Gefühle beeinflusst und unsere innere Uhr antreibt, zeigt dieses Beispiel. Diese sogenannten nicht-visuellen Wirkungen bieten ein breites Anwendungsspektrum. So wird der aktivierende und Leistungssteigernde Effekt von Licht unter anderem an Schulen (Barkmann et al. 2012; Wessolowski et al. 2014), im Büro (Smolders und de Kort 2014; Moeller et al. 2011), in der Industrie (Bieske et al. 2011) und in Pflegeheimen (Riemersma-van der Lek et al. 2008) erforscht.

Viele Studien zeigen einen positiven Effekt auf die Aufmerksamkeit bei erhöhter Beleuchtungsstärke (Phipps-Nelson et al. 2003; Vandewalle et al. 2006) oder einer hohen Farbtemperatur (Shamsul et al. 2013). Andere Studien zeigen hingegen widersprüchliche Ergebnisse (Smolders und de Kort 2014). Die Studienlage zur Wirkung von Licht auf die Cortisolkonzentration ist ähnlich inkonsistent (Jung et al. 2010). Diese Ergebnisse zu bewerten fällt schwer, da die Versuchsbedingungen stark variieren. Meist werden zwei bis drei Situationen z.B. dunkle Bedingung bei 200 lx und sehr helle Bedingung bei 1000 lx miteinander verglichen. Doch weitere wichtige Fragen bleiben meist unbeantwortet: z.B. Welches Spektrum wurde verwendet? Ist die Beleuchtungsstärke horizontal oder am Auge gemessen worden? Reicht vielleicht schon eine geringere Beleuchtungsstärke für eine positive Wirkung aus? Eine Vorhersage von nicht-visuellen Wirkungen wie der Aufmerksamkeitssteigerung durch gezieltes Licht ist daher anhand dieser nicht miteinander vergleichbaren Daten kaum möglich.

Die Melatoninsuppression durch Licht ist hingegen schon weiter erforscht. Das Hormon Melatonin wird in der Dunkelheit produziert. Wird es durch Licht am Abend unterdrückt, kann sich der circadiane Rhythmus verschieben und wir werden später müde. Der dafür verantwortliche Photorezeptor, die 2001 von Brainard und Thapan (Brainard et al. 2001; Thapan et al. 2001) entdeckten lichtempfindlichen Ganglienzellen (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells, kurz: ipRGCs), ist besonders für blaues Licht empfindlich (λ_{max} ~ 480 nm, Lucas et al. 2014). Das Aktionsspektrum der ipRGCs ist in DIN SPEC 67600 als circadianes Wirkungsspektrum festgehalten. Ob dieses Spektrum auch für andere nicht-visuelle Wirkungen wie Aufmerksamkeitssteigerung anwendbar ist, ist noch unklar. Der stärkere Effekt von blauem Licht (Cajochen et al. 2005) und hohen Farbtemperaturen (Shamsul et al. 2013) deuten auf diese Möglichkeit hin. Doch das

Aktionsspektrum der ipRGCs wurde nachts mit schmalbandigen (farbigen) Lichtreizen aufgenommen. Gilt die Additivität der Reize bei polychromatischem (weißem) Licht? Was gilt tagsüber, wenn gar kein Melatonin produziert wird? Solange diese Fragen nicht geklärt sind, ist das Aktionsspektrum der ipRGCs nicht direkt auf andere nicht-visuelle Wirkungen übertragbar (Schierz und Vandahl 2012). Zudem sind die Ganglienzellen mit den Zapfen und Stäbchen verschaltet und das Gehirn erhält ein aus allen Rezeptorantworten zusammengesetztes Signal (Lucas et al. 2014). Daher ist es wahrscheinlich, dass auch die Zapfen und Stäbchen einen Einfluss auf die nicht-visuelle Wirkung haben.

Das BMBF-geförderte Forschungsvorhaben *NiviL* (*ni*cht-*vi*suelle *L*ichtwirkungen) umfasst mehrere Projektpartner, die verschiedene nicht-visuelle Wirkungen, sowohl in Laborumgebung als auch in verschiedenen Anwendungsbereichen, untersuchen. Dabei werden die Versuchsbedingungen so kontrolliert und vergleichbar wie möglich gehalten. Das beinhaltet sowohl vergleichbare lichttechnische Bedingungen, u.a. durch Verwendung gleicher Versuchsleuchten und überprüfender Vor-Ort-Messungen, als auch vergleichbare Mess- und Auswertungsmethoden wie standardisierte Fragebögen und Versuchsabläufe sowie gemeinsam festgelegte Kontrollvariablen. Ziel ist es, aus den Ergebnissen der Projektteilnehmer und der vorhandenen Literatur ein Modell zur Vorhersage einzelner nicht-visueller Wirkungen zu erstellen (siehe Abbildung 1). Im Fokus des Teilvorhabens der TU Berlin steht die Wirkung des Lichts auf die Aufmerksamkeit als wichtige Grundvoraussetzung, um überhaupt Leistungen zu erbringen und das Wohlbefinden als Voraussetzung zur Akzeptanz der Beleuchtung. Es werden verschiedene Altersgruppen einbezogen, da die verringerte Lichtdurchlässigkeit der Pupille mit dem Alter ein bekannter individueller Einflussfaktor ist.

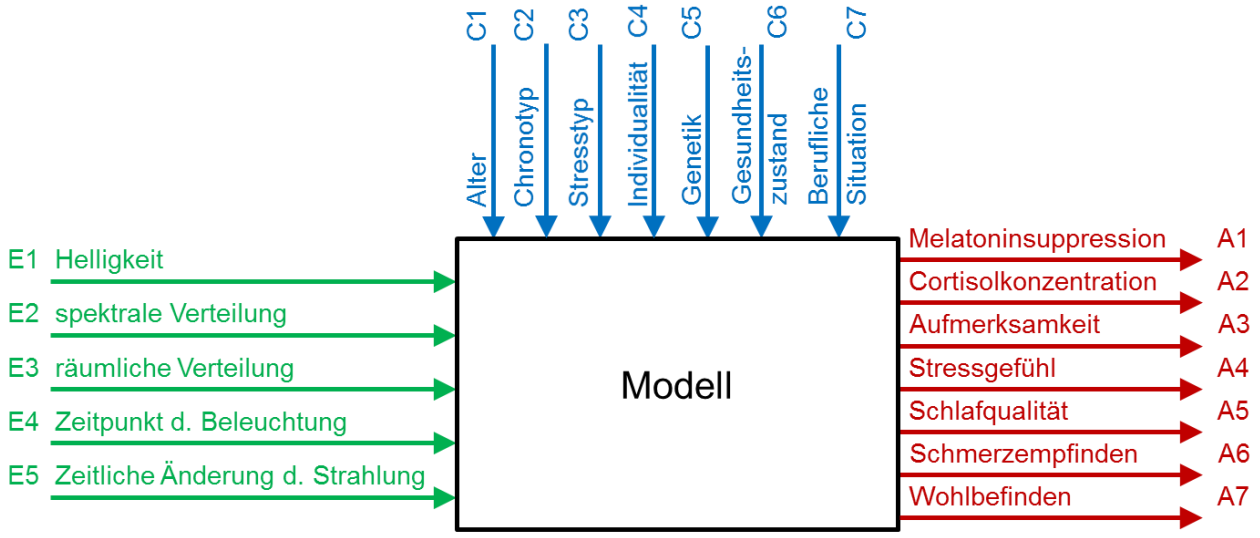


Abbildung 1: Beispielhaftes Modell für nicht-visuelle Größen (Ausgangsgrößen rechts) in Abhängigkeit der lichttechnischen Eingangsgrößen (links) und den individuellen Kontrollvariablen (oben)

2. Einflussparameter für nicht-visuelle Wirkungen

Nicht-visuelle Wirkungen sind erstens abhängig von der vorherrschenden Lichtsituation und zweitens vom Menschen selbst mit all seinen interindividuellen Einflussparametern. Die Lichtsituation soll gezielt eingestellt und variiert werden. Sie wird charakterisiert durch die Helligkeit, die spektrale und räumliche Verteilung des Lichtes, den Zeitpunkt der Beleuchtung und der zeitlichen Änderung der Strahlung.

Für die Helligkeit hat sich noch keine einheitliche physikalische Größe durchgesetzt. In der Beleuchtungsplanung wird üblicherweise die *horizontale* Beleuchtungsstärke verwendet, um anzugeben wie viel Licht auf eine Nutzebene trifft. Für die Beschreibung einer nicht-visuellen Größe ist aber die Strahlung, die ins Auge gelangt, von Bedeutung. Daher sollte die Beleuchtungsstärke *am Auge* in Blickrichtung bzw. vereinfacht *vertikal* gemessen werden. Aus der Literatur (Zeitzer et al. 2000; Cajochen et al. 2000) geht hervor, dass bei rund 1000 lx am Auge die stärkste Reaktion hervorgerufen wird und danach eine Sättigung eintritt. Aber auch bei relativ geringen Beleuchtungsstärken von 100 lx am Auge werden schon Reaktionen beobachtet.

Die circadiane Bestrahlungsstärke gewichtet die Strahlung nach der DIN SPEC 67600 mit dem Aktionsspektrum der lichtempfindlichen Ganglienzellen statt mit der photopischen Hellempfindlichkeit V(λ). Sie liefert einen guten Hinweis, ob die Strahlung einen großen (und möglicherweise effektiver wirksamen) Blauanteil enthält. Da, wie eingangs beschrieben, noch unklar ist, welche Rezeptortypen die Gesamtwirkung beeinflussen, sollte stets das Spektrum mit aufgenommen werden. Anhand des ungewichteten Spektrums (üblicherweise als Bestrahlungsstärken in W/m²nm gemessen) können dann mit den Empfindlichkeitskurven der fünf Rezeptortypen die gewünschten Zielgrößen im Nachhinein berechnet werden. Auch die Photonendichte (in 1/cm²s), die auf das Auge trifft, kann damit errechnet werden.

Ein wichtiger Aspekt ist, wie lange beleuchtet wird. Die Studienwerte reichen dabei von 5 min bis zu mehreren Stunden. Es hat sich gezeigt, dass der sprunghafte Helligkeitswechsel besonders effektiv ist (Smith et al. 2004). Nachts, wenn es dunkel ist, reicht schon eine geringe Helligkeit für kurze Zeit aus, um Melatonin zu unterdrücken (Cajochen 2007). Kurze sehr helle Pulse haben dabei die gleiche bis bessere Wirksamkeit wie eine langanhaltend konstant sehr helle Beleuchtung (Burgess et al. 2003; Gronfier et al. 2004).

Unterschiedliche Spektren werden üblicherweise anhand der ähnlichsten Farbtemperatur (CCT) klassifiziert. Einige Studien haben gezeigt, dass die ähnlichste Farbtemperatur keine geeignete Größe für die Beschreibung nicht-visueller Wirkung darstellt, sondern es vielmehr auf die Zusammensetzung des Spektrums ankommt. So zeigte Rea (Rea et al. 2006) in einem Versuch mit verschiedenen Leuchtstofflampen, dass auch Lampen mit niedrigerer CCT eine ähnlich starke bzw. stärkere Melatoninsuppression hervorriefen wie die mit hoher CCT. In einer Untersuchung von Möller bestand der einzige Unterschied im Spektrum LED vs. Leuchtstofflampe (Moeller et al. 2011). Die Farbtemperatur, die Beleuchtungsstärke und der Versuchsablauf waren komplett identisch. Obwohl äußerlich kein Unterschied der Situationen erkennbar war, empfanden die Probanden die LED-Beleuchtung als ansprechender und es gab einen positiven Effekt auf die Schlafqualität der Folgenacht. Neben der Lichtdosis ist die spektrale Verteilung daher ein weiterer wichtiger Einflussparameter der Beleuchtung.

Aufgrund der Verteilung der lichtempfindlichen Ganglienzellen auf der Netzhaut ist Beleuchtung aus dem oberen Halbraum besonders effektiv (Glickman et al. 2003; Lasko et al. 1999). Der für die sehr hohen Beleuchtungsstärken benötigte Lichtstrom sollte aus großflächigen Leuchten bereitgestellt werden, um Blendung zu vermeiden. In vielen Anwendungsfällen kommen daher Lichtdecken zum Einsatz (licht.de 2014).

Aufgrund des hormonellen Tagesverlaufs des circadianen Rhythmus hat zudem der Zeitpunkt der Beleuchtung einen Einfluss auf die nicht-visuelle Wirkung. Blaues Licht am Morgen ist besonders aktivierend (LACK et al. 2007), in den Abendstunden bewirkt es hingegen eine Melatoninunterdrückung. Ein Zusammenhang zum Chronotyp des Menschen ist hier wahrscheinlich: während die Lerche morgens schon wach ist, kann die Eule morgens durch das Licht stimuliert werden. Die Lichthistorie, die der Mensch am Tag erfährt, beeinflusst ebenfalls die Wirksamkeit der Beleuchtung. An einem wolkigen Tag herrschen horizontale Beleuchtungsstärken von mehr als 10.000 lx im Freien vor, im Vergleich zu 500 lx am Arbeitsplatz. War der Proband viel draußen, hat eine erhöhte Beleuchtungsstärke von 1000 lx am Auge wahrscheinlich weniger Einfluss, als wenn er den ganzen Tag in Innenräumen verbracht hat. Die motivierende und aufmerksamkeitssteigernde Wirkung wird daher oft im Winter untersucht, wenn es insgesamt dunkler ist.

Damit sind die wichtigsten Einflussparameter des Lichts erfasst. Doch die Individualität der Menschen führt zu einer großen individuellen Streuung. Das Alter hat aufgrund der zunehmenden Trübung der Linse (Pokorny et al. 1987) voraussichtlich einen großen Einfluss. Ein Senior empfängt deutlich weniger blaues Licht als ein junger Erwachsener oder gar ein Kind. In einer Studie von Smolders waren gestresste Probanden besonders empfänglich für die aktivierende Wirkung des Lichts (Smolders und de Kort 2014). Auch die individuelle Tagesform, die Gesundheit, der Chronotyp, das Geschlecht usw. sollten beim Versuchsdesign berücksichtigt werden. Da beispielsweise die Cortisolkonzentration von der Ernährung beeinflusst wird, bekommen Probanden hier üblicherweise eine standardisierte Mahlzeit. Es können zwar nicht alle Faktoren auf einmal untersucht werden, aber sie müssen kontrolliert und aufgenommen werden.

3. Geplante Versuche zur Wirkung von Licht auf Aufmerksamkeit, Wohlbefinden und Cortisolkonzentration

In einem gemeinsam geplanten Laborversuch der TU Berlin und der TU Dresden soll zunächst der Einfluss des Spektrums auf die Aufmerksamkeit und die Cortisolkonzentration genauer untersucht werden. Den Probanden werden in einer 2-Pi-Geometrie (halbe Ulbrichtkugel) fünf verschiedene Spektren für 90 min gezeigt.

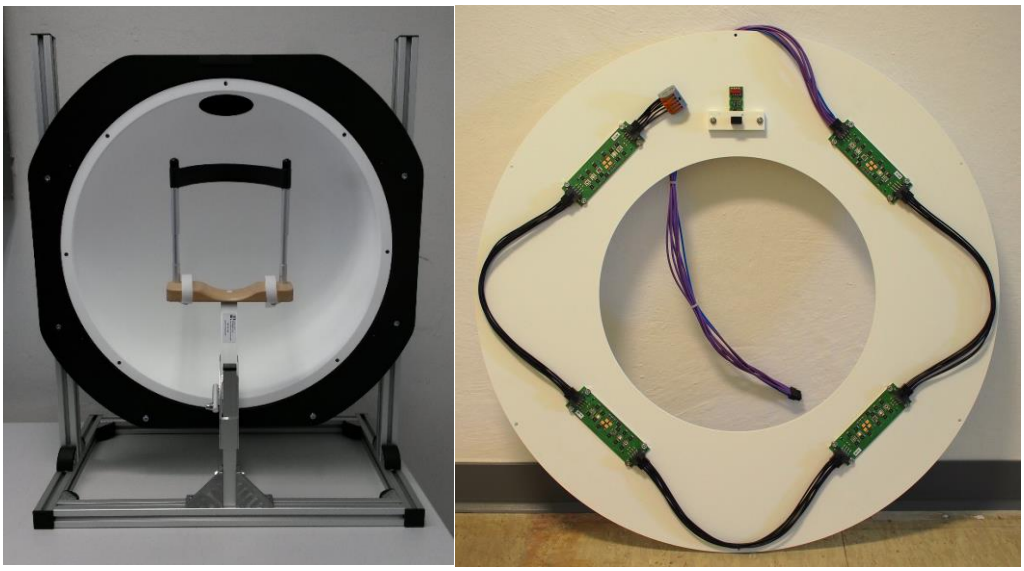
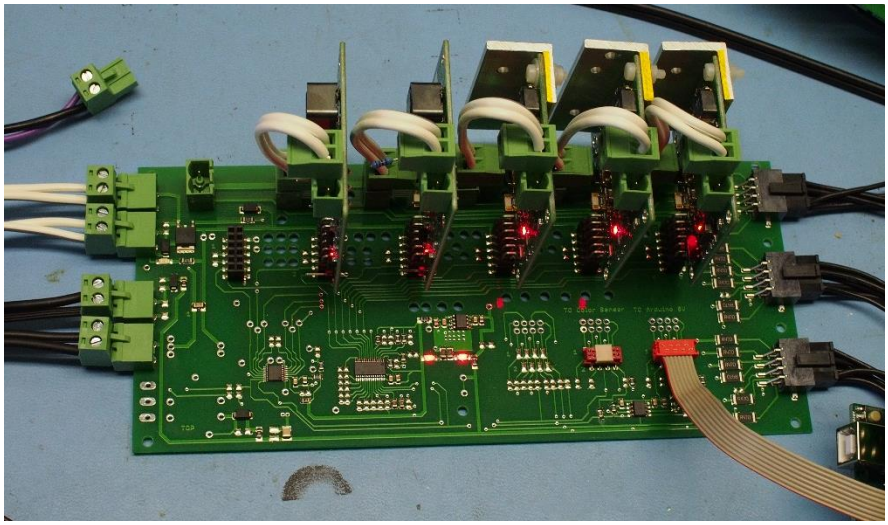


Abbildung 2: Ulrichtkugel ohne Blende (links) und Innenseite der Blende mit LED Platinen und Farbsensor (rechts)



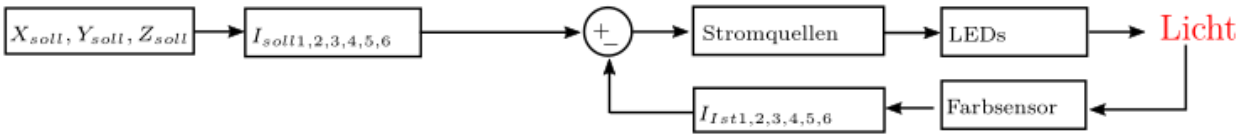


Abbildung 3: oben: Stromquellen der LEDs mit Ansteuerplatine, maximal 3 A/ 80 W pro Kanal bei 6 Kanälen unten: Regelstruktur der Lichtregelung in der Halbkugel

Die Halbkugel hat einen Innendurchmesser von 50 cm und wird durch eine Blende abgeschlossen. In der Blende ist ein Loch von 30 cm Durchmesser, in das der Proband hineinblickt. Auf der Innenseite der Blende sind die LED-Platinen und der Farbsensor montiert. Die LEDs sind an selbstentwickelte Konstantstromquellen angeschlossen, welche eine Stromdimmung von 0 A - 3 A mit 12 Bit Auflösung für die Helligkeitseinstellung durchführen.

Um das gewünschte Spektrum in der Halbkugel während der Lichtexposition zu erzeugen, werden bis zu sechs verschiedene LEDs gemischt. Da sich der emittierte Lichtstrom bei LEDs stark mit der Temperatur ändert und die Versuchsbedingungen über eine lange Zeit konstant gehalten werden müssen, wurde eine Mehrgrößen-Lichtregelung (siehe Abbildung 3) implementiert. Mit einem Farbsensor wird das Licht in der Halbkugel gemessen und anhand der Sollwerte die Ströme der LEDs nachgeregelt. Die Spektren der verwendeten LEDs sind in Abbildung 4 zu sehen.

Es sollen mehrere Fragestellungen mittels dieser Anordnung geprüft werden. Anhand von farbigem Licht (blaue, grüne und rote LEDs mit gleicher Photonendichte) soll ermittelt werden, welche Rezeptortypen für die Wirkung verantwortlich sind. Die Wellenlängen sind dabei so gewählt, dass a) die blaue LED mit λ_{max} ~ 475 nm nahe dem Maximum des ipRGC-Spektrums liegt, b) die grüne LED mit λ_{max} ~ 520 nm die ipRGCs und die grün- und rot-Zapfen anregt, und c) die rote LED mit λ_{max} ~ 660 nm nur noch die grün- und rot-Zapfen, aber nicht mehr die ipRGCs anregt. Die LED-Spektren werden mit den unterschiedlichen Empfindlichkeitskurven der Rezeptortypen gewichtet und anhand dieser Größen wird ein Zusammenhang zur erzielten Wirkung untersucht.

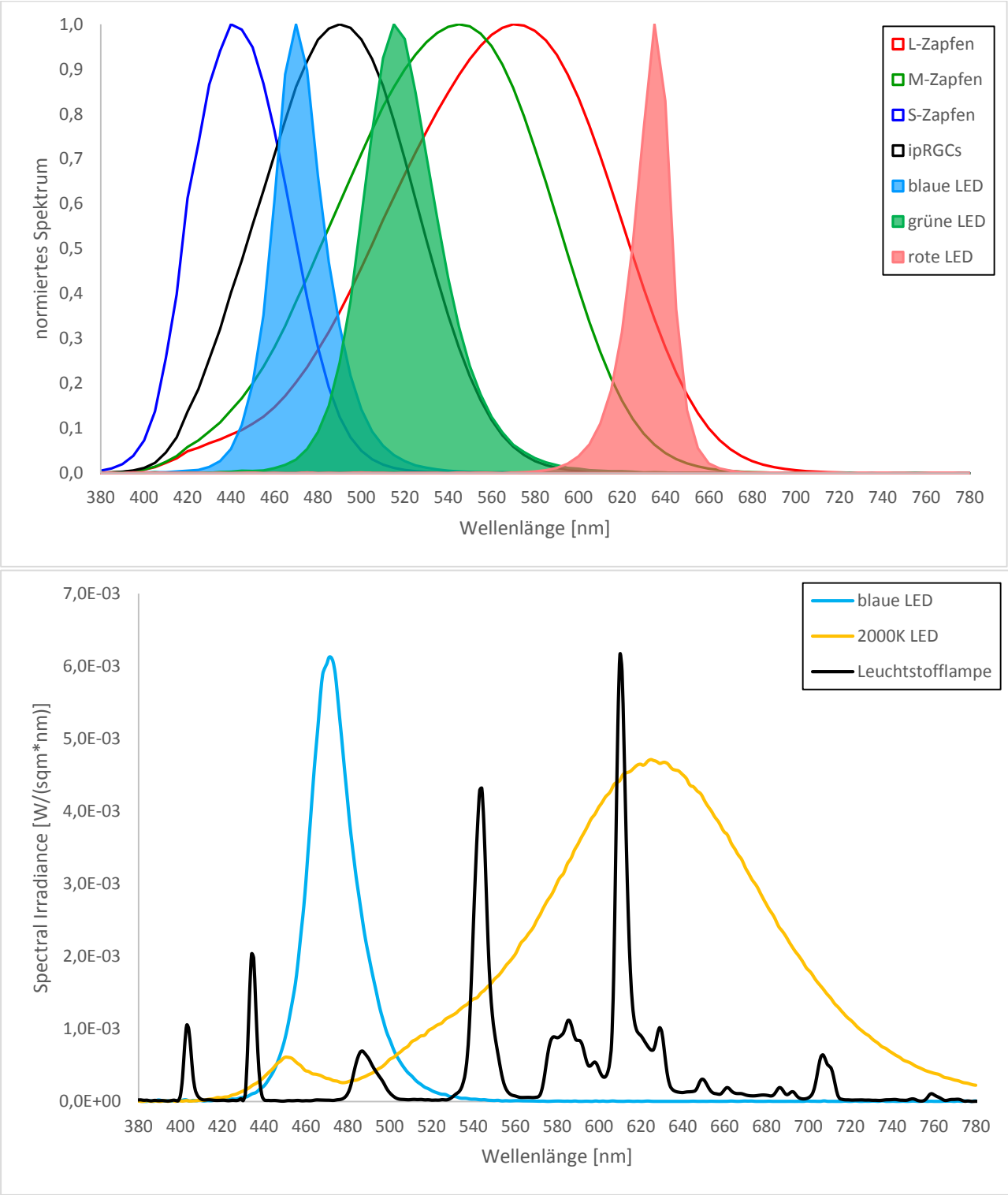


Abbildung 4: Spektren der farbigen LEDs und den Empfindlichkeiten der Rezeptoren (oben) und Spektren der weißen LED und Leuchtstofflampe (unten)

Die Frage der Additivität bzw. Übertragbarkeit auf polychromatisches Licht soll mit einem weißen LED-Spektrum getestet werden. Der Blauanteil der weißen LED (blaue LED + Phosphorbeschichtung) entspricht dabei der Photonendichte der einfarbigen LEDs. Zusätzlich wird ein Leuchtstofflampenspektrum mit gleicher Farbtemperatur und gleicher Photonendichte wie der weißen LED genutzt. Dies soll zeigen, ob die mit LED-Leuchten

gefundenen Ergebnisse auf den anschließenden Feldversuch mit vorhandener Leuchtstofflampenlösung übertragen werden können oder ob Unterschiede wie in Möller (Moeller et al. 2011) bzw. welche Unterschiede zu erwarten sind.

Im Folgenden ist der Versuchsbaluf dargestellt: Nach 10 min Dunkeladaptation folgen 90 min Lichtexposition in der Ulbrichtkugel. Vor, während und nach der Lichtexposition werden ein objektiver Aufmerksamkeitstest (z.B.: D2-Test (Brickenkamp et al. 2010), psychomotor vigilance task PVT (Basner et al. 2011) oder Go/NoGo (Leclercq und Zimmermann 2004)) und ein KSS Fragebogen zur subjektiven Müdigkeit (Karolinska Sleepiness Scale (Åkerstedt und Gillberg 1990)) bearbeitet. Außerdem wird die Beleuchtung am Anfang und am Ende mit einem Fragebogen bewertet. Anschließend folgt eine standardisierte Stressung des Probanden für 15 min. Danach werden innerhalb von 60 min mehrfach Cortisolspeichelproben entnommen. Die Stressung und Probenentnahme erfolgen unter normaler Laborbeleuchtung, die lichttechnisch vermessen wird.

Die Expositionszeit wurde auf konstant 90 min festgelegt, damit in jedem Fall ausreichend lange beleuchtet wird, um eine Wirkung zu erzielen. Außerdem kann so eine zeitliche Abhängigkeit der Aufmerksamkeit untersucht werden. Pro Szene werden 24 gesunde junge Erwachsene untersucht. Die Szenen werden randomisiert dargeboten.

Anhand der Ergebnisse dieses Versuchs wird ein anschließender Laborversuch vorbereitet, in dem zusätzlich zu den Spektren nun auch die Intensitäten systematisch variiert werden. Die zu untersuchenden nicht-visuellen Größen sind Aufmerksamkeitssteigerung (D2-Test, PVT und KSS) und Wohlbefinden (Fragebögen). Der Versuchsraum wird mit der LED-Versuchsleuchte aller Projektpartner ausgestattet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. In dem Versuch sollen verschiedene Altersgruppen von Schülern bis Senioren mit einbezogen werden. Weiterhin soll zwischen gestressten und nicht gestressten Probanden und nach Chronotypen unterschieden werden. Am Ende soll die Frage geklärt werden, wie viel zusätzliche Helligkeit für eine positive Wirkung benötigt wird und wie hoch die dafür benötigten Mehrkosten ausfallen.

Laborversuche stellen meist eine unrealistische Situation für die Probanden dar. Ob die Ergebnisse auch im Feld reproduzierbar sind, soll deshalb am Fall einer Vorlesung im Hörsaal untersucht werden. Die 90 minütige Vorlesung „Grundlagen der Elektrotechnik“ ist eine Erstsemesterveranstaltung an der TU Berlin und wird vom Fachgebietsleiter der Lichttechnik Prof. Dr. Völker gehalten. Sie findet im Wintersemester statt und wird von rund 500 Studenten besucht. Der Hörsaal besitzt eine steuerbare RGB-W-Leuchtstoff-lampenlösung (siehe Abbildung 5), mit der verschiedene Farbtemperaturen und Beleuchtungsniveaus realisiert werden können. Es gibt keine Fenster, sodass Tageslicht-einfluss ausgeschlossen ist. Die Lichtszenen werden in Farbtemperatur und Helligkeit dem Laborversuch angepasst. Das Spektrum unterscheidet sich aufgrund des unterschiedlichen Lampentyps. Der vorangehende Laborversuch zeigt, ob hier ein Einfluss zu erwarten ist. Die Studenten führen die Tests vor, mitten und nach der Vorlesung durch. Für die Aufmerksamkeit wird der D2-Test und KSS, für das Wohlbefinden ein Fragebogen und in Kooperation mit der TU Dresden Cortisolspeichelproben für die Cortisolkonzentration verwendet.

Abbildung 5: Hörsaal an der TU Berlin mit steuerbarer RGB-W-Leuchtstofflampenbeleuchtung

4. Zusammenfassung:

Die genaue Wirkungsweise von Licht auf nicht-visuelle Wirkungen wie Aufmerksamkeitssteigerung und Wohlbefinden ist noch unbekannt. Die hier vorgestellten Versuche sollen im Rahmen des Verbundprojektes NiviL dazu beitragen, die Wirkungsweise vor allem in Bezug auf Spektrum und Lichtdosis besser zu verstehen. Das kontrollierte und vergleichbare Vorgehen aller Projektpartner liefert eine breite Datenbasis, die zusammen mit Daten aus der Literatur genutzt werden soll, um ein Modell für nicht-visuelle Wirkungen zu erstellen. Erst wenn sicher belegt ist, dass eine nicht-visuelle Wirkungen stimulierende Beleuchtung auch wirklich zu positiven Effekten für die Mitarbeiter, Schüler oder Patienten führt und keine negativen Auswirkungen besitzt, kann diese für die Beleuchtungsplanung empfohlen werden.

Literaturverzeichnis

Vornorm DIN SPEC 67600, 04.2013: Biologisch wirksame Beleuchtung - Planungsempfehlungen.

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.

Barkmann, Claus; Wessolowski, Nino; Schulte-Markwort, Michael (2012): Applicability and efficacy of variable light in schools. In: *Physiology & behavior* 105 (3), S. 621–627. DOI: 10.1016/j.physbeh.2011.09.020.

Basner, Mathias; Mollicone, Daniel; Dinges, David F. (2011): Validity and Sensitivity of a Brief Psychomotor Vigilance Test (PVT-B) to Total and Partial Sleep Deprivation. In: *Acta astronautica* 69 (11-12), S. 949–959. DOI: 10.1016/j.actaastro.2011.07.015.

Bieske, K.; Vandahl, C.; Schierz, Ch. (2011): Projekt „Licht und Gesundheit“ -Feldstudie in Industriebetrieben. TU Ilmenau, FG Lichttechnik..

Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.; Greeson, J. M.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M. D. (2001): Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. In: *The Journal of Neuroscience* (21(16)), S. 6405–6412.

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.

Cajochen, Christian; Münch, Mirjam; Kobialka, Szymon; Kräuchi, Kurt; Steiner, Roland; Oelhafen, Peter et al. (2005): High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 90 (3), S. 1311–1316. DOI: 10.1210/jc.2004-0957.

Cajochen, Christian; Zeitzer, Jamie M.; Czeisler, Charles A.; Dijk, Derk-Jan (2000): Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. In: *Behavioural Brain Research* 115 (1), S. 75–83. DOI: 10.1016/S0166-4328(00)00236-9.

Figueiro, M. G.; Hamner, R.; Bierman, A.; Rea, M. S. (2013): Comparisons of three practical field devices used to measure personal light exposures and activity levels. In: *Lighting research & technology (London, England : 2001)* 45 (4), S. 421–434. DOI: 10.1177/1477153512450453.

Glickman, Gena; Hanifin, John P.; Rollag, Mark D.; Wang, Jenny; Cooper, Howard; Brainard, George C. (2003): Inferior Retinal Light Exposure Is More Effective than Superior Retinal Exposure in Suppressing Melatonin in Humans. In: *Journal of biological rhythms* 18 (1), S. 71–79. DOI: 10.1177/0748730402239678.

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.

Jung, Christopher M.; Khalsa, Sat Bir S; Scheer, Frank A J L; Cajochen, Christian; Lockley, Steven W.; Czeisler, Charles A.; Wright, Kenneth P. (2010): Acute effects of bright light exposure on cortisol levels. In: *Journal of biological rhythms* 25 (3), S. 208–216. DOI: 10.1177/0748730410368413.

LACK, Leon; BRAMWELL, Toby; WRIGHT, Helen; KEMP, Kristyn (2007): Morning blue light can advance the melatonin rhythm in mild delayed sleep phase syndrome. In: *Sleep Biol Rhythms* 5 (1). DOI: 10.1111/j.1479-8425.2006.00250.x.

Lasko, T. A.; Kripke, D. F.; Elliot, J. A. (1999): Melatonin Suppression by Illumination of Upper and Lower Visual Fields. In: *Journal of biological rhythms* 14 (2), S. 122–125. DOI: 10.1177/074873099129000506.

Leclercq, M.; Zimmermann, P. (2004): Applied Neuropsychology of Attention: Theory, Diagnosis and Rehabilitation: Taylor & Francis. Online verfügbar unter https://books.google.de/books?id=-iF5AgAAQBAJ.

licht.de (Hg.) (2014): lichtwissen 19 - Wirkung des Lichts auf den Menschen. Fördergemeinschaft Gutes Licht. Frankfurt am Main (licht.wissen, 19). Online verfügbar unter http://www.licht.de/de/service-info/publikationen-und-downloads/heftreihe-lichtwissen/.

Lucas, Robert J.; Peirson, Stuart N.; Berson, David M.; Brown, Timothy M.; Cooper, Howard M.; Czeisler, Charles A. et al. (2014): Measuring and using light in the melanopsin age. In: *Trends in neurosciences* 37 (1), S. 1–9. DOI: 10.1016/j.tins.2013.10.004.

Moeller, Katrin; Grote, Vincent; Keller, Katharina; Lorenz, Dieter; Moser, Maximilian; Khanh, TranQuoc (2011): LED Office Lighting to Promote Performance and Well-Being. In: MichelleM Robertson (Hg.): Ergonomics and Health Aspects of Work with Computers, Bd. 6779: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 68-77. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-21716-6_8.

Phipps-Nelson, Jo; Redman, Jennifer R.; Dijk, Derk-Jan; Rajaratnam, Shantha M W (2003): Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. In: *Sleep* 26 (6), S. 695–700.

Pokorny, J.; Smith, V. C.; Lutze, M. (1987): Aging of the human lens. In: *Applied optics* 26 (8), S. 1437–1440.

Rea, M. S.; Bullough, J. D.; Bierman, A.; Figueiro, M. G. (2006): Implications for White Light Sources of Different Correlated Color Temperatures. In: *CIE Proc. Symp. Lighting & Health Ottawa* (CIE x31:2006), S. 33–38.

Riemersma-van der Lek, Rixt F; Swaab, Dick F.; Twisk, Jos; Hol, Elly M.; Hoogendijk, Witte J G; Van Someren, Eus J W (2008): Effect of bright light and melatonin on cognitive and noncognitive function in elderly residents of group care facilities: a randomized controlled trial. In: *JAMA* 299 (22), S. 2642–2655. DOI: 10.1001/jama.299.22.2642.

Schierz, Ch.; Vandahl, C. (2012): Biologische Wirkung von Licht. Literaturübersicht. TU Ilmenau, FG Lichttechnik.

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.

Smith, Kurt A.; Schoen, Martin W.; Czeisler, Charles A. (2004): Adaptation of human pineal melatonin suppression by recent photic history. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 89 (7), S. 3610–3614. DOI: 10.1210/jc.2003-032100.

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.

Thapan, Kavita; Arendt, Josephine; Skene, Debra J. (2001): An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. In: *The Journal of Physiology* 535 (1), S. 261–267. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00261.x.

Vandewalle, Gilles; Balteau, Evelyne; Phillips, Christophe; Degueldre, Christian; Moreau, Vincent; Sterpenich, Virginie et al. (2006): Daytime Light Exposure Dynamically Enhances Brain Responses. In: *Current Biology* 16 (16), S. 1616–1621.

Wessolowski, Nino; Koenig, Heiko; Schulte-Markwort, Michael; Barkmann, Claus (2014): The effect of variable light on the fidgetiness and social behavior of pupils in school. In: *Journal of Environmental Psychology* 39, S. 101–108. DOI: 10.1016/j.jenvp.2014.05.001.

Zeitzer, Jamie M.; Dijk, Derk-Jan; Kronauer, Richard E.; Brown, Emery N.; Czeisler, Charles A. (2000): Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. In: *The Journal of Physiology* 526 (3), S. 695–702. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2000.00695.x.