

Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung der nicht-visuellen Wirkungen von Licht und dessen lichttechnische Charakterisierung

Frithjof Barkholdt, Kai Broszio, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik
Einsteinufer 19, 10587 Berlin;
frithjof@barkholdt-lighting.de

Abstract/Zusammenfassung

Die nicht-visuellen Lichtwirkungen (eng. non-image-forming, NIF) bilden ein weites Forschungsfeld, welches in der modernen Gesellschaft aufgrund der langen Aufenthaltsdauern in Innenräumen, zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die Abhängigkeit dieser Effekte von dem dominanten Einfallswinkel des Lichtes auf das menschliche Auge ist ein Forschungsschwerpunkt am Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin. Ziel dieser Arbeit ist es, einen bereits vorhandenen Versuchsraum baulich für einen Probandenversuch im Bereich NIF vorzubereiten und lichttechnisch klar nach den relevanten Normen (bspw. CIE S026 und DIN SPEC 5031-100) und über deren Anforderungen hinausgehend zu charakterisieren.

In dem Versuch sollen zwei Lichtszenen gezeigt werden, die bei fester Blickrichtung die Augen der Probanden aus zwei unterschiedlichen Regionen beleuchten. Dabei soll eine jeweilige vertikale Beleuchtungsstärke von 1000 Lux am Auge erreicht werden. Das Spektrum soll einer typischen Bürosituation entsprechen, dabei eine hohe melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke besitzen, und in beiden Lichtsituation gleich sein.

Realisiert wird dies mit insgesamt 12 LED-Paneelen mit jeweils 3 unterschiedlichen LED-Gruppen (kaltweiß, warmweiß, blau). Die Anordnung im Raum wird mittels einer DIALux-Simulation im Vorfeld ermittelt und anschließend umgesetzt.

Für die Messung der lichttechnischen Eigenschaften wird zunächst mittels eines Spektroradiometers das mit $V(\lambda)$ bewertete Spektrum am Probandensitzplatz aufgenommen. Dabei wird zugleich verifiziert, dass eine Beleuchtungsstärke von 1000 Lux in beiden Lichtsituationen erreicht wird.

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Imenau, Deutschland.



This is an **Open Access** article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike-4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/). (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Anschließend wird ein Leuchtdichtebild sowie Strahldichteaufnahmen melanopisch- und $V'(\lambda)$ -gewichtet, des Raumes erstellt, um eine genaue Dokumentation der Lichtsituation zu ermöglichen. Ergänzt werden diese durch Spotmessungen mit dem Spektroradiometer in aussagekräftigen Raumrichtungen.

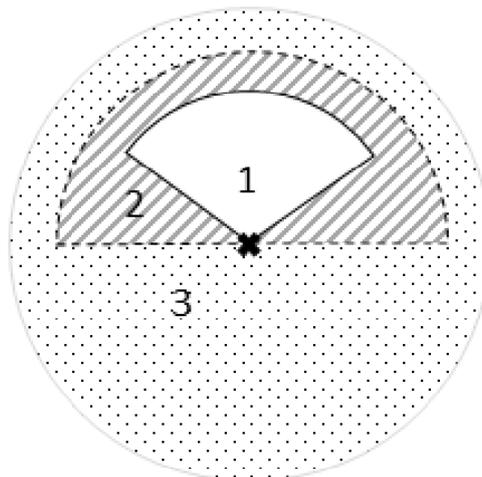
Zur Sicherstellung der zeitlichen Stabilität werden die Messungen wiederholt über eine längere Einschaltphase der LED-Paneele durchgeführt.

Die eingerichteten Lichtszenen zeigen sich über einen mehrstündigen Zeitraum stabil und erfüllen die Anforderungen des Probandenversuchs.

Einleitung

Die Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der NIF-Effekte erfordert zwei unterschiedliche Lichtsituationen, welche zum einen hauptsächlich aus der von Knoop u. a. [3] definierten Region 3 den Probanden beleuchten bzw. eine Haupteinfallrichtung des Lichtes aus Region 1 und 2 realisieren sollen.

Abb. 1: 3 Regionen nach Kai Broszjo



Das Spektrum der beiden Szenen darf sich aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht unterscheiden und sollte eine sehr hohe melanopische Wirksamkeit aufweisen. Da das melanopische Wirkspektrum [4] sein Maximum im bläulichen Bereich des sichtbaren Spektrums hat, sollte die ähnlichste Farbtemperatur sowie die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge E_v für eine maximale melanopische Wirksamkeit möglichst hoch sein. In dem

vorherigen Probandenversuch von Kai Broszio wurde für E_v ein Wert von 1000 lx aus der Hälfte des Halbraumes erreicht (2000 lx insgesamt). Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit diesem Versuch, wird der Zielwert für E_v in beiden Lichtsituationen ebenfalls auf 1000 lx festgelegt.

Eine genaue Analyse und Dokumentierung der realisierten Lichtsituationen ist im Anschluss an die Umsetzung unverzichtbar, um eine Vergleichbarkeit des Probandenversuches sicherzustellen.

Aus diesen Überlegungen folgten für die vorliegende Arbeit zwei Fragestellungen:

1. Wie kann ein Versuchsraum konfiguriert werden, welcher die oben genannten Anforderungen angemessen gut erfüllt?
2. Wie sieht eine vergleichbare Dokumentation der lichttechnischen Verhältnisse für eine Studie im Bereich der NIF aus?

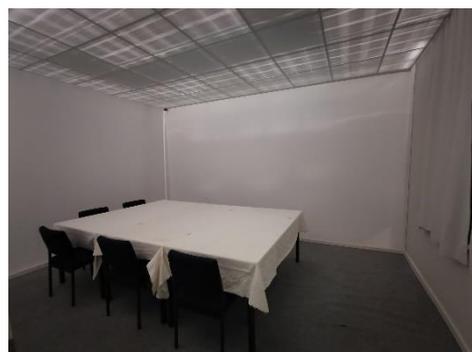
Aufbau und Methodik

Zur Ermittlung einer anforderungsgerechten Konfiguration der 12 zur Verfügung stehenden LED-Leuchten, wurde das Testbüro vermessen und in die Lichtsimulationssoftware DIALux evo eingepflegt.

Abb. 2: Simulation des Büros



Abb. 3: Foto des Büros



Zur Realisierung der beiden Lichtszenen (Beleuchtung der oberen- bzw. unteren Hemisphäre der Retina) wurde sich für eine Aufteilung der LED-Paneele auf zwei Bereiche im Testbüro entschieden. Die Beleuchtung der oberen Hemisphäre, im Folgenden Lichtszene 1 genannt, soll durch in der

Raumdecke angebrachte Paneele gewährleistet werden. Durch die Reflexion des Lichtes auf der Tischdecke, kann somit eine dominante Beleuchtung der oberen Hemisphäre der Retina erreicht werden. Lichtszene 2 soll durch die in der dem Probanden gegenüberliegende Wand angebrachte Paneele die untere Hemisphäre beleuchten. In einer ersten Simulation ordnete der Autor für die Lichtszene 2 drei der LED-Paneele in einer Reihe auf einer Höhe der Unterkante von 2m an. Jedoch sorgten die in dieser Konfiguration vorhandenen hohen Leuchtdichten für zu große Blendungseffekte, sodass die Anzahl der verwendeten Leuchten auf fünf in gleicher Anordnung erhöht wurde. Die sieben verbleibenden Paneele wurden in einer U-Form in der Decke über dem Tisch positioniert. Der Bereich direkt oberhalb des Probandensitzplatzes wurde dabei ausgespart, um die direkte Beleuchtung zu minimieren.

Unter Benutzung der Leuchtendaten wurde anschließend eine Berechnung der vertikalen Beleuchtungsstärken an der Position des Gesichtes des Probanden (in der Simulation durch einen annähernd hautfarbenen Quader repräsentiert) durchgeführt. Aufgrund der zu erwartenden Größenunterschiede der Probanden und unkalkulierbaren Kopfbewegungen, wurde ein Berechnungsbereich von 30cmx30cm mit einer Mittelpunkthöhe von 115cm mittig des Tisches festgelegt. Zusätzlich wurde an dieser Position das Unified Glare Rating (UGR) ermittelt, um eine normüberschreitende Blendung des Probanden auszuschließen.

In einem iterativen Prozess wurde daraufhin für beide Lichtszenen eine Einstellung der drei LED-Kanäle gefunden, welche eine Beleuchtungsstärke von jeweils 1000 Lux erreicht und dabei ein UGR von 19 nicht überschreitet. Da die gewählte Anordnung diese Anforderung mit ausreichend Reserven erfüllte, wurde diese Konfiguration als geeignet befunden und im Testbüro umgesetzt. Die sich ergebenden Lichtsituationen, sind in den folgenden Abbildungen dargestellt und beschrieben.

Tab. 1: Dimmerwerte der beiden Lichtszenen sowie gemessener CRI und $a_{v, mel}$

Lichtszene	480nm [%]	2000K [%]	4000K [%]	CRI	$a_{v, mel}$
1	58	0	80	80,96	1,61
2	73	0	94	79,29	1,63

Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 4: Lichtszene 1



Abb. 5: Lichtszene 2



Die maßgeblichen Größen, die zur Beschreibung einer Lichtsituation für Versuche im Bereich der nicht-visuellen Lichtwirkungen anzugeben sind, werden in der DIN SPEC 5031-100 [4] spezifiziert. Da die Norm derzeit überarbeitet wird, orientiert sich diese Arbeit zudem an über die Norm hinausgehenden Anforderungen, wie sie unter anderem in der CIE 026 [1] und dem Paper „Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects“ [3] formuliert sind. Die folgende Auflistung beinhaltet die wesentlichen Größen, welche für die Beschreibung der Versuchssituation als erforderlich angesehen werden und deren Ergebnisse ausgewertet werden:

1. mittlere melanopisch bewertete Strahldichte der leuchtenden Fläche L_{mel}
2. mittlere Leuchtdichte der leuchtenden Fläche $L_{v,s}$
3. melanopischer Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$
4. Ähnlichste Farbtemperatur (CCT)
5. Allgemeiner Farbwiedergabe Index (CRI)
6. Unified Glare Rating (UGR)
7. vertikale Bestrahlungsstärke am Auge
8. vertikale Beleuchtungsstärke E_v am Auge
9. α -opisch bewertete Bestrahlungsstärke am Auge
10. zeitliche Veränderung der spektralen Verhältnisse
11. räumliche spektrale Unterschiede
12. regional empfangene gewichtete Bestrahlungsstärken

Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt die ermittelten Größen 1-6 sortiert pro Lichtszene. Die Daten zeigen keine relevanten Unterschiede zwischen den beiden Situationen. Die Angaben zum Unified Glare Rating beruhen aus Gründen des unverhältnismäßigen Aufwandes lediglich auf dem simulierten Modell und spiegeln die reale Situation daher nur annähernd wieder.

Tab. 2: Ausgewertete Größen 1-6

	Lichtszene 1	Lichtszene 2
L_{mel} in $[\frac{W}{sr \cdot m^2}]$	5947	5816
$L_{v,s}$ in $[\frac{cd}{m^2}]$	2598	2600
$a_{mel,v}$	1.61	1.63
CCT	6233	6194
CRI	80.96	79.29
UGR	<10	17.3

Quelle: Eigene Darstellung

Die Lichtverhältnisse am Auge schlüsselt Tabelle 3 auf. Ergänzend zur genormten waagerechten Messposition wurde eine zweite, um 15° zur Horizontalen geneigte Position, erfasst. Diese entspricht der zu erwartenden Blickrichtung der lesenden Probanden. Die Abweichungen zwischen den beiden Lichtszenen in der waagerechten Position ist auch hier minimal. In der geneigten Position sind größere Unterschiede feststellbar und die Lichtexposition der Probanden in Lichtszene 2 als höher einzustufen. Die Beleuchtungsstärke liegt etwa 80 lx über dem geforderten Maß, da die Lichteinstellung der Szenen aus Vergleichbarkeitsgründen mit einem fehlerbehafteten Spektroradiometer durchgeführt wurden.

Tab. 3: Auswertung Spektroradiometer-Messung

	Lichtszene 1		Lichtszene 2	
	Waagrecht	15°Neigung	Waagrecht	15°Neigung
Beleuchtungsstärke [lx]	1082.55	855.31	1084.77	987.91
Cyanopisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	75.60	58.69	74.76	67.59
Melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	160.85	125.64	163.57	148.40
Rhodopisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	176.23	137.99	178.22	161.84
Chloropisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	186.86	147.02	188.03	171.02
Erythropisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	190.44	150.36	191.50	174.37
Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	393.55	309.88	397.72	361.78

Quelle: Eigene Darstellung

Die Messkurven der Langzeitmessungen sind in Abb. 6 dargestellt. Die insgesamt etwa 1800 Messungen pro Lichtszene sind auf jeweils 230 Messkurven gemittelt worden. Vor Beginn der Messungen befanden sich die Leuchten über einen langen Zeitraum in einem ausgeschalteten Zustand. Die Ergebnisse der Messungen zeigen eine kontinuierliche Abnahme des Spektrums über die gesamte Messdauer. Zur besseren Visualisierung zeigt daher Abb. 7 das Differenzspektrum der ersten und letzten Messung als repräsentative Entwicklung. Die Abweichungen über den Zeitraum der 2 Stunden zeigen keine deutliche spektrale Veränderung und einen vernachlässigbaren Abfall der gesamten Beleuchtungsstärke

Abb. 6a: Langzeitmessung Lichtszene 1

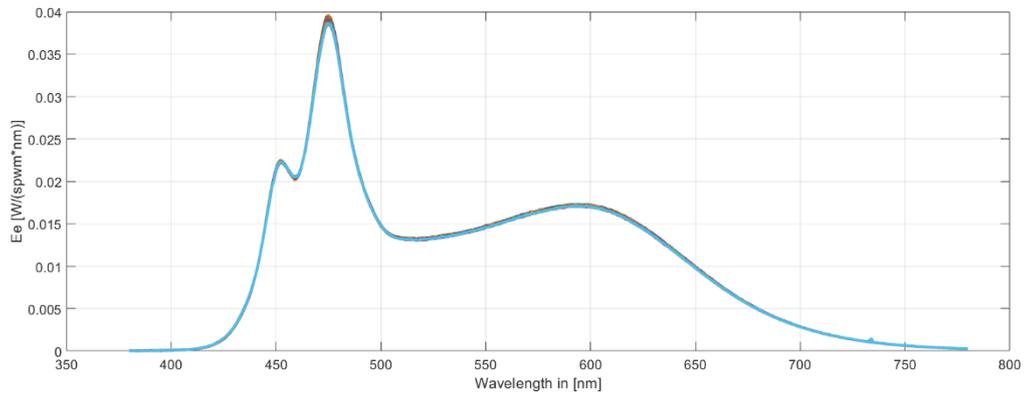


Abb. 6b: Langzeitmessung Lichtszene 2

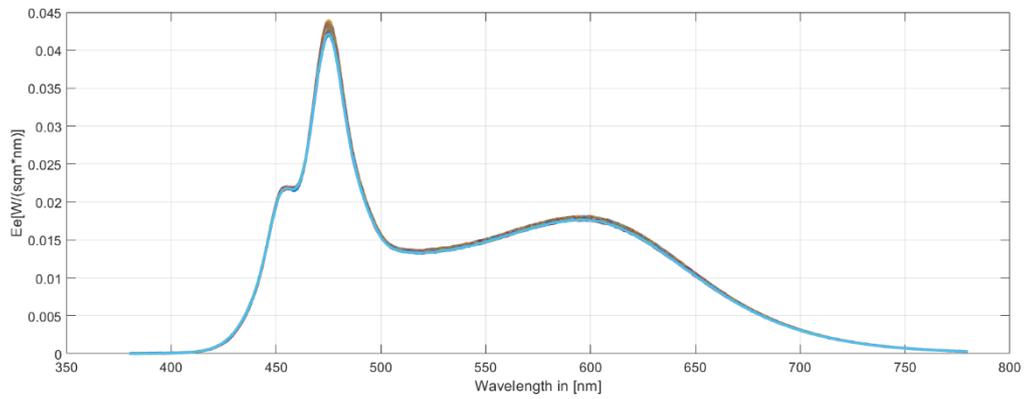


Abb. 7a: Differenzspektrum Lichtszene 1

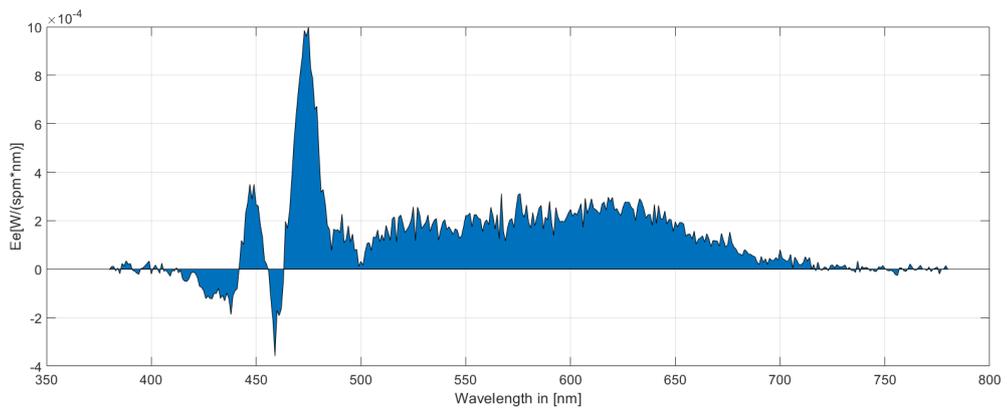


Abb. 7b: Differenzspektrum Lichtszene 2

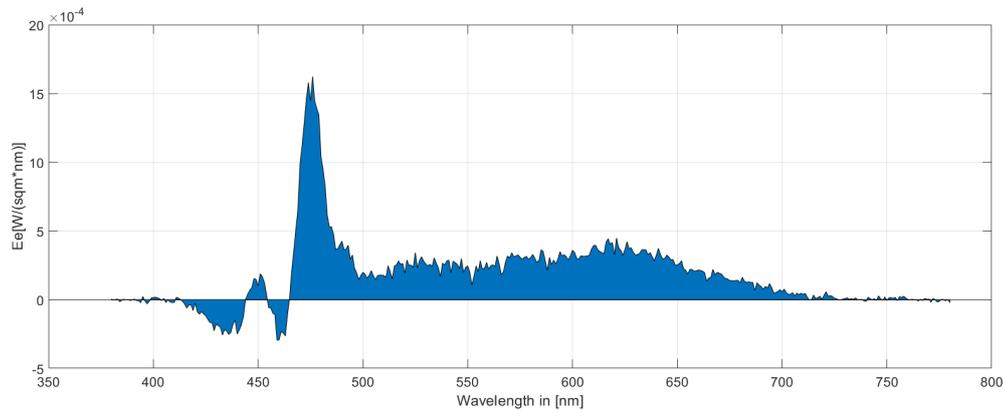


Tabelle 4 zeigt die Verteilung des einfallenden Lichtes auf die drei Regionen. Zu sehen ist eine dominante Beleuchtung der Probanden aus Region 3 in Lichtszene 1. Region 1 und 2 tragen hauptsächlich zur Beleuchtungsstärke in Lichtszene 2 bei.

Tab. 4: Anteile der gewichteten Bestrahlungsstärken am jeweiligen Gesamtwert aus den 3 Regionen in %

	Lichtszene 1		Lichtszene 2	
	E_{mel}	$E_{v,s}$	E_{mel}	$E_{v,s}$
Region 1	7,18	6,9	52,45	52,59
Region 2	30,18	29,86	16,36	16,01
Region 3	62,64	63,24	31,19	31,19

Quelle: Eigene Darstellung

Fazit

Die Auswertung der Messungen zeigt, dass die Anforderungen an den Versuchsraum bei der Konfiguration eingehalten werden konnten. Lichtszene 1 beleuchtet die Probanden vornehmlich aus Region 3, während Lichtszene 2 den geforderten Hauptlichteinfall aus Region 1 und 2 realisiert. Beide Szenen zeichnen sich durch ein sehr ähnliches Spektrum mit einem hohen melanopischen Wirkungsgrad und einer vertikalen Beleuchtungsstärke von über 1000 lux am Auge aus. Als limitierender Faktor einer weiteren Steigerung des melanopischen Wirkungsgrades, stellte sich die

Anforderung an eine adäquate Farbwiedergabe heraus [2]. Die Lichtbedingungen in dem Testbüro sind über einen Versuchszeitraum von zwei Stunden als stabil zu betrachten und die Variation des Spektrums innerhalb des Raumes liegt in einem vertretbaren Rahmen. Eine Einschätzung der subjektiven Blendung sollte in der Durchführung des Versuches von den Probanden eingeholt werden.

Die Dokumentation des Versuchsaufbaus erforderte eine Zusammenstellung verschiedener Anforderungen, die aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Schriften an eine vollständige Dokumentation nicht-visueller Versuche gestellt werden. Ein gesammeltes Template für eine einheitliche Dokumentation wäre wünschenswert.

Referenzen

- [1] CIE (2018): CIE Draft International Standard (DIS 026/E:2018): CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light.
- [2] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (Hg.) (2016): LICHT 2016 : Karlsruhe, 25. - 28. September; Tagungsband - Proceedings ; [22. Gemeinschaftstagung = 22nd Associations' Meeting]: KIT Scientific Publishing.
- [3] Martine Knoop; Kai Broszio; Aicha Diakite; Carolin Liedtke; Matthias Niedling; Inga Rothert et al. (2019): Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects. In: *LEUKOS* 0 (0), S. 1–17. DOI: 10.1080/15502724.2018.1518716.
- [4] SPEC, D. I.N.: 5031-100 (2015): Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik-Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen-Größen. In: *Formelzeichen und Wirkungsspektren*.