

# EINE LED-LEUCHE FÜR DIE FORSCHUNG

## LEUCHTENENTWICKLUNG FÜR DAS NIVIL-PROJEKT

**Im BMBF-Verbundprojekt »NivIL – Nicht-visuelle Wirkungen von Licht« werden u.a. Effekte der ipRGC-Zellen (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells) auf verschiedene nicht-visuelle Wirkungen untersucht und dabei deren Zusammenspiel mit den Stäbchen und Zapfen betrachtet. In fünf NivIL-Teilprojekten wird gezielt der ipRGC-Pfad stimuliert und dessen Einfluss auf verschiedene kognitive und biologische Parameter überprüft. Der folgende Beitrag zeigt, wie eine dafür notwendige Leuchte entwickelt und umgesetzt wurde.**

### AKTUELLER WISSENSSTAND ZU DEN NICHT-VISUELLEN WIRKUNGEN VON LICHT

Bei der Erforschung der Wirkung von Licht auf den menschlichen Organismus nehmen Lichtlösungen zur gezielten Beeinflussung der sogenannten nicht-visuellen Wirkungen einen immer größeren Stellenwert ein (Human Centric Lighting). Das heißt, der Fokus bei der Entwicklung und Anwendung einer Beleuchtungsanlage liegt nicht mehr nur auf visuellen Aspekten, vielmehr sollen auch komplexe Zusammenhänge zwischen der Beleuchtung und dem Wohlbefinden des Nutzers berücksichtigt werden. Diese Optimierung der Beleuchtung erfolgt über eine dynamische Anpassung des Helligkeitsniveaus, resultierend in variierenden Hornhautbeleuchtungsstärken, und einer Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur (CCT), resultierend in variierenden Anteilen der kurzwelligeren Strahlung. Es wird davon ausgegangen, dass ein erhöhter Anteil kurzwelliger Strahlung im Spektrum der Leuchte (hohe CCT) und hohe Hornhautbeleuchtungsstärken unter anderem die Leistungsfähigkeit und Aufmerksamkeit am Tag positiv beeinflussen [1, 2, 3]. Am Abend hingegen sollen der kurzwellige Strahlungsanteil (geringere CCT) und die Hornhautbeleuchtungsstärke reduziert werden, um den circadianen Rhythmus des Menschen nicht zu destabilisieren [4, 5].

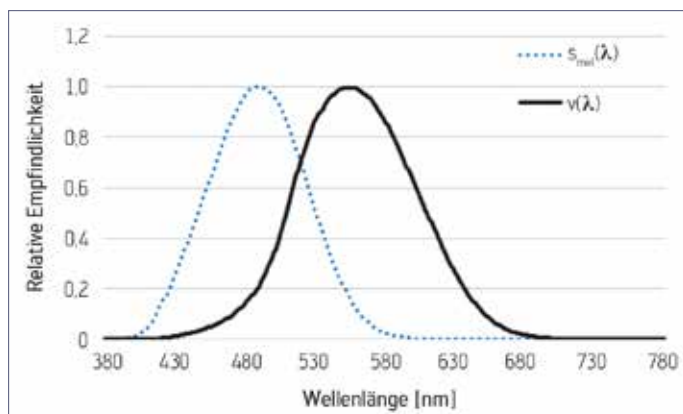


Abb. 1: Melanopisches Wirkungsspektrum  $s_{mel}$  im Vergleich zur spektralen Hellempfindlichkeit  $V(\lambda)$

Als ein physiologischer Mechanismus, zumindest für die letztgenannte Wirkung, werden die 2001 nachgewiesenen ipRGC-Zellen (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells) verantwortlich gemacht. Diese in der Netzhaut befindlichen lichtempfindlichen Ganglienzellen besitzen ihr Empfindlichkeitsmaximum im Bereich von 480 – 490 nm ( $s_{mel}$  – Wirkungsspektrum [6], Abb. 1) und liegen somit im kurzwelligen Bereich sichtbarer Strahlung.

Bei entsprechender Stimulierung dieser Zellen am Abend und in der Nacht kann die Produktion des Hormons Melatonin gehemmt werden. Melatonin wird im allgemeinen Sprachgebrauch auch gerne als Schlafhormon bezeichnet. Seine verzögerte oder/und reduzierte Ausschüttung infolge von überschweiliger Lichtexposition am Abend kann zu einer vorübergehenden circadianen Desynchronisation führen, was wiederum unerwünschte Auswirkungen auf die Arbeitsleistung am nächsten Tag haben kann [7].

Inwieweit eine Stimulierung dieser Zellen jedoch zu einer verbesserten Leistungsfähigkeit am Tag beiträgt, ist bisher nicht hinreichend geklärt. Eine höhere CCT der Lichtquelle lässt hierbei nur bedingt Rückschlüsse auf die Stimulierung der ipRGC-Zellen (auch als melanopische Wirkung bezeichnet) zu. Vielmehr kann der melanopisch wirksame Strahlungsanteil auch bei gleicher CCT der Lichtquelle deutlich variieren (differierender  $a_{mel}$  bei gleicher CCT, [8]). Der melanopische Wirkungsfaktor  $a_{mel}$  beschreibt das Verhältnis eben dieser melanopisch wirksamen Strahlung zur  $V(\lambda)$ -bewerteten lichttechnischen Strahlungsgröße (Gl. 1, [6]).

$$a_{mel} = \frac{\int_{380}^{780} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} X_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (1)$$

Zudem ist das Zusammenspiel der ipRGC-Zellen mit den Stäbchen und Zapfen in Bezug auf die verschiedenen nicht-visuellen Wirkungen noch lange nicht hinreichend verstanden, wobei jedoch von einer Interaktion ausgegangen wird [9, 10]. Spezifische Aussagen zum Einfluss dieser Zellen auf verschiedene kognitive Parameter können also noch nicht getroffen werden.

### FORSCHUNGSARBEIT BRAUCHT SPEZIELLE LEUCHE

Um diese Wissenslücke zu schließen und den Einfluss der ipRGC-Zellen auf verschiedene nicht-visuelle Wirkungen gezielt zu untersuchen, werden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes »NivIL – Nicht-visuelle Wirkungen von Licht« diverse Untersuchungen durchgeführt. Das Konsortium des Projektes besteht aus sechs Verbundpartnern: Technische Universität Berlin, Charité Berlin, Universitätsklinikum Dresden, Deutsche Sporthochschule Köln, Eberhard Karls Universität Tübingen und das Universitätsklinikum Erlangen. Jeder der Partner führt spezifische Teiluntersuchungen durch. In fünf dieser Teilprojekte wird gezielt der ipRGC-Pfad stimuliert und dessen Einfluss auf verschiedene kognitive und biologische Parameter überprüft. Im Rahmen des Projektes werden

entsprechende Leuchten benötigt, die dies ermöglichen. Für die Leuchten wurden folgende Spezifikationen und Anforderungen formuliert:

- $a_{mel}$  separat kontrollierbar: Die spektrale Verteilung der Leuchte muss eine gezielte und frei einstellbare Stimulierung der ipRGC-Zellen ermöglichen, um den Einfluss dieses Rezeptortyps auf verschiedene kognitive und biologische Parameter bei Kontrolle aller weiteren Einflussgrößen zu untersuchen.
- $a_{mel}$  möglichst klein: Dieser definierte kurzwellige Strahlungsanteil muss auf ein Minimum reduzierbar sein.
- Um bei mittleren und hohen Farbtemperaturen ( $> 4000$  K) auch hohe Hornhautbeleuchtungsstärken zu erzielen, sind hohe Leuchtenlichtströme nötig. Hierfür wurden rechnerisch  $8000$  lm pro Leuchte für die relevanten ähnlichsten Farbtemperaturen bestimmt. Zudem sollte die Leuchte dimmbar sein.
- Um positive Effekte nicht durch subjektive Abneigungen gegenüber der Beleuchtung zu überlagern, muss eine hohe Akzeptanz der Nutzer gegenüber der Beleuchtungsanlage gewährleistet sein. Dies stellt neben den hohen wissenschaftlichen Anforderungen auch hohe Anforderungen an weitere Gütekriterien (Farbwiedergabe, Leuchtdichtegleichmäßigkeit der leuchtenden Fläche, begrenzte Blendung durch möglichst große leuchtende Flächen, weißes Licht).

## IST SO EINE LEUCHE BEREITS VERFÜGBAR?

### Aspekt spektrale Verteilung

In einem nächsten Schritt wurde überprüft, ob am Markt erhältliche Leuchten den wissenschaftlichen Anforderungen des Projektes genügen. Typische Leuchten mit einstellbaren ähnlichsten Farbtemperaturen werden zumeist im Bereich von  $3000$  K bis  $6500$  K angeboten. Die Einstellung erfolgt dabei durch Mischung zweier in der Leuchte eingesetzter phosphorkonvertierten Weißlicht-LEDs mit den genannten Farbtemperaturen (Grenze des einstellbaren Bereiches). Vergleicht man jedoch die spektrale Zusammensetzung von Weißlicht-LEDs mit der spektralen Empfindlichkeitskurve der ipRGC-Zellen, so zeigt sich gerade im Bereich der maximalen Empfindlichkeit der photosensitiven Ganglienzellen ein Minimum der spektralen Verteilung bei der Mehrheit der LEDs (Abb. 2). Eine gezielte und frei einstellbare Stimulierung dieser Zellen ist demnach nur eingeschränkt in den Grenzen der verwendeten LEDs möglich, was für die Versuchsanforderung nicht ausreichend ist.

### Aspekt kurzwellige Strahlung

Eine weitere Anforderung an die Leuchte für das Forschungsprojekt ist ein einstellbarer, möglichst geringer melanopisch wirksamer Strahlungsanteil ( $a_{mel}$  möglichst klein). Auch hierbei erweisen sich gängige Marktösungen als unzureichend. Trotz der Differenz der Peakwellenlänge der LEDs (hier bei etwa bei  $450$  nm) und dem Empfindlichkeitsmaximum der photosensitiven Ganglienzellen ist selbst bei den warmweißen LEDs mit einer CCT von  $3000$  K ein für die Versuchsanforderungen noch zu hoher Anteil kurzwelliger Strahlung im Spektrum enthalten ( $a_{mel} = 0,44$ , vgl. Tabelle 1).

### Pflichtenheft für die neue Leuchte

Es zeigt sich, dass marktübliche HCL-Lösungen den im Rahmen des NivlL-Projektes formulierten Anforderungen nicht vollumfänglich gerecht werden. Um dem Abhilfe zu schaffen, wurden unter Leitung

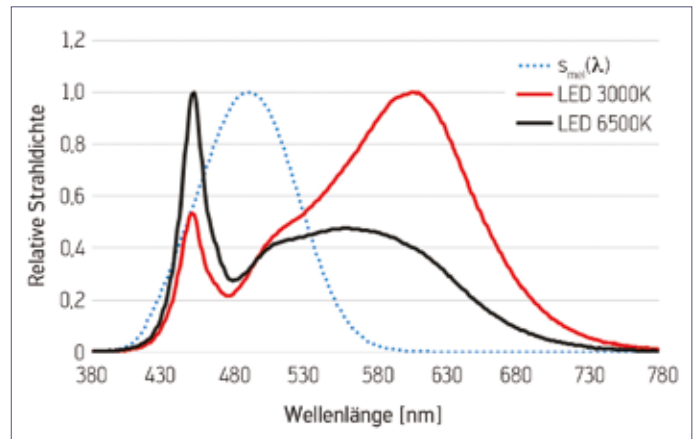


Abb. 2: LED-Spektren der NivlL-Versuchsleuchte im Vergleich zum melanopischen Wirkungsspektrum

des Fachgebietes Lichttechnik der Technischen Universität Berlin im Rahmen des Projektes verschiedene technische Anforderungen an die Versuchsleuchte konzipiert und in einem Lastenheft festgehalten:

- Um die ipRGC-Zellen gezielt zu stimulieren und den Grad der Stimulierung ( $a_{mel}$ ) dabei frei einstellen zu können, soll eine blaue LED mit einer Peakwellenlänge von circa  $480$  nm verwendet werden (vgl. Abb. 3)
- Um eine minimale Stimulierung der ipRGC-Zellen zu ermöglichen und damit den Anteil der melanopisch wirksamen Strahlung so weit wie möglich zu reduzieren (blaue LED aus), soll eine warmweiße LED mit einer CCT von  $2000$  K eingesetzt werden (vgl. Abb. 3). Der  $a_{mel}$  dieser LED liegt mit  $0,23$  deutlich unter den  $a_{mel}$ -Werten der am Markt verfügbaren Leuchten mit warmweißen LED mit  $3000$  K ( $a_{mel} = 0,44$ , s.o.) oder einer Glühlampe ( $a_{mel} = 0,449$ , [6]).
- Um den geforderten Lichtstrom für hohe Farbtemperaturen zu erreichen, wurden für jeden LED-Typ entsprechende Mindestlichtströme kalkuliert.
- Um bei Einstellung des jeweiligen melanopisch wirksamen Strahlungsanteils und damit der ähnlichsten Farbtemperatur einen Farbort nahe des Planckschen Kurvenzuges zu realisieren, muss eine zusätzliche Stützstelle für die Farbmischung integriert werden. Hierfür wurde eine Weißlicht-Diode mit einer CCT von  $4000$  K festgelegt (vgl. Abb. 3) ▶

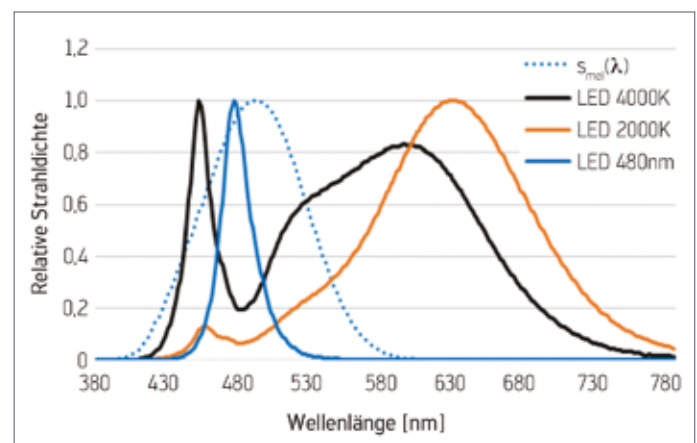


Abb. 3: LED-Spektren der NivlL-Versuchsleuchte im Vergleich zum melanopischen Wirkungsspektrum

**OPTIMIERUNG DER SPEKTRALEN EINSTELLUNG**

Durch Mischung der blauen LED und der LED mit einer CCT von 2000 K ist es theoretisch möglich, den Anteil der ipRGC-wirksamen Strahlung ( $a_{mel}$ ) über die blaue LED frei einzustellen und bei alleiniger Darbietung der 2000-K-LED auf ein Minimum zu reduzieren. Allerdings wird die gleichzeitige Darbietung dieser beiden LEDs bei ungünstigem Mischverhältnis von einer deutlich sichtbaren Abweichung des einstellbaren Farbortes vom Planckschen Kurvenzug begleitet und somit die Qualität der Beleuchtung beeinträchtigt. Ein durch Mischung dieser beiden LEDs entstehender neuer Farbort liegt auf der Verbindungslinie dieser Farborte teilweise unterhalb der Juddschen Geraden und somit außerhalb des festgelegten Bereiches der ähnlichsten Farbtemperatur ([11], vgl. schwarze Linie in Abb. 4). Dies äußert sich auch in einem sichtbaren Farbstich der Beleuchtung.

Eine solche Reduzierung der Beleuchtungsqualität ist jedoch im Rahmen des Projektes nicht zulässig. Gerade für langfristig angelegte Untersuchungen ist eine hohe Akzeptanz der Beleuchtungsanlage unabdingbar. Um dies zu erreichen, wurde als zusätzliche Anforderung an die Versuchsleuchte die LED mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 4000 K als Stützstelle für die Farbmischung aufgenommen (vgl. rote Linie in Abb. 4). Somit ist es möglich, eine ähnlichste Farbtemperatur im Bereich von 2000 K bis 4000 K durch Mischung der beiden phosphorkonvertierten Weißlicht-LEDs zu realisieren und dabei einen Farbort nahe des Planckschen Kurvenzuges abzubilden. Höhere Farbtemperaturen werden durch Mischung der 4000-K-LED mit der schmalbandigen blauen LED mit der Peakwellenlänge von 480 nm erzielt. Bei Bedarf kann die blaue LED auch bei Farbtemperaturen kleiner 4000 K zugemischt werden, um den  $a_{mel}$  auch bei geringeren Farbtemperaturen zu erhöhen. Die in Abb. 4 eingezeichneten Geraden spannen einen Farbraum auf, der jeden theoretisch einstellbaren Farbort der Leuchte einschließt. Die Farborte bewegen sich im niedrigeren CCT-Bereich fast ausschließlich unterhalb des Planckschen Kurvenzuges, was als weißes Licht bewertet wird [12].

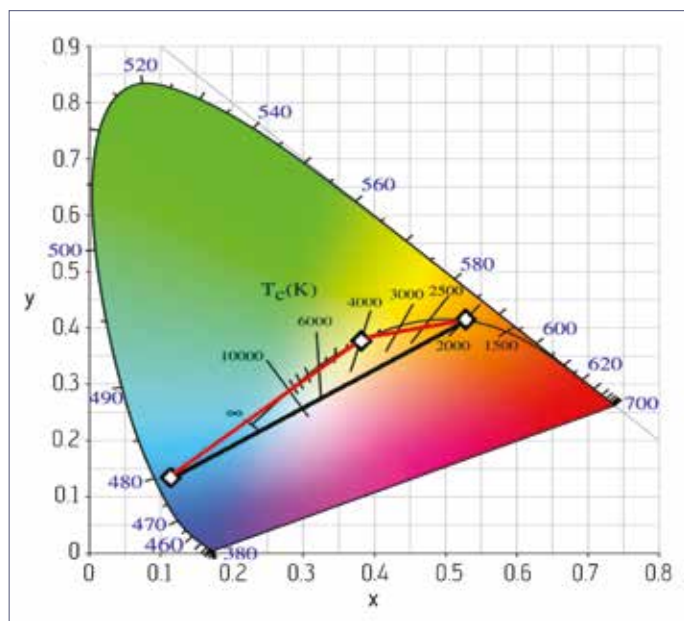


Abb. 4: LED-Spektren der NivIL-Versuchsleuchte im Vergleich zum melanopischen Wirkungsspektrum

Die durch die Verwendung dieser drei LED-Typen einstellbare CCT liegt im Bereich von 2000 K bis etwa 20000 K, wobei das Maximum nur als theoretischer Wert zu betrachten ist. Grenzen in der praktischen Anwendung werden durch die genannte Einschränkung des Farbtones (Abweichung von der definierten ähnlichsten Farbtemperatur) und die Farbwiedergabe gesetzt. Bedingt durch den frei einstellbaren Anteil der blauen LED ändert sich bei hohen Blauanteilen im Spektrum das Verhältnis dieses Strahlungsanteils zum phosphorkonvertierten langwelligeren Strahlungsanteil der weißen LEDs. Der Anteil der kurzwelligeren Strahlung wird dann überproportional hoch im Vergleich zu mittleren und langen Wellenlängen. Dies führt zu einer Reduzierung des Farbwiedergabeindex  $R_a$  bei sehr hohen ähnlichsten Farbtemperaturen. Bei einer CCT von 20000 K liegt der  $R_a$  nur noch bei 53. Da eine solche Beeinträchtigung der Beleuchtungsqualität im Rahmen des Projektes nicht gewünscht ist, wurden Grenzen für die ähnlichste Farbtemperatur in Abhängigkeit der Farbwiedergabe bestimmt ( $R_a > 80$  und  $R_g > 70$ , vgl. unten). Die resultierenden Settings mit einer CCT von 6600 K und 8500 K erreichen einen  $a_{mel}$  von respektive 1,07 und 1,27 (vgl. Tabelle 1).

	minimaler $a_{mel}$	maximaler $a_{mel}$ $R_a > 80$	maximaler $a_{mel}$ $R_g > 80$
typische, am Markt verfügbare Lösung	0,44 (bei 3100 K)	0,81 (bei 6500 K)	
für NivIL spezifizierte Lösung	0,23 (bei 2000 K)	1,07 (bei 6600 K)	1,27 (bei 8500 K)

Tab 1: Vergleich des melanopischen Wirkungsfaktors  $a_{mel}$  marktüblicher Beleuchtungslösungen und der NivIL-Projektleuchte

**DAS ERGEBNIS**

Der einstellbare Bereich des melanopischen Wirkungsfaktors  $a_{mel}$  vergrößert sich gegenüber dem typischer kommerzieller Lösungen deutlich. Die erreichten Werte für  $a_{mel}$  liegen unter Berücksichtigung visueller Güteermere und in Abhängigkeit der eingestellten CCT nah an der theoretischen physikalischen Einstellgrenze [8].

Folgende maximale Lichtströme werden zudem pro LED-Kanal erreicht:

- LED mit 4000 K – 7600 lm
- LED mit 2000 K – 5000 lm
- LED mit 480 nm Peakwellenlänge – 1950 lm

Der maximale Leuchtenlichtstrom bei voller Aussteuerung beträgt somit circa 14500 lm. Dies ist jedoch nur ein theoretischer Wert, da die Mischung aller drei Kanäle aufgrund des gewünschten Farbortes nicht zulässig ist. Der maximale Lichtstrom bei einer CCT von 8500 K beträgt immer noch 8500 lm. Die Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte der leuchtenden Fläche beträgt 0,85 (baulich bedingter Abfall am Rand der Abdeckung wird dabei nicht berücksichtigt). Die Leuchte wurde als Deckenanbauleuchte (625x625 mm) mit diffuser Abdeckung realisiert (Abb. 5). Die Umsetzung der Anforderungen wurde von der Firma RIDI-Leuchten GmbH übernommen.

In den nächsten zwei Jahren werden die Effekte dieser Beleuchtung nun in verschiedenen Studien mit unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien untersucht. Dabei werden alle im Rahmen des NivIL-Projektes erhobenen Daten aufeinander abgestimmt (gemeinsames Set abhängiger und



Abb. 5: NivIL-Versuchsleuchte mit den verwendeten LEDs

Abb. 6: Anordnung der verschiedenen LED-Typen

unabhängiger Variablen für alle Projektpartner) und in einer gemeinsamen Datenbank gesammelt. Dadurch wird eine sehr breite Datenbasis mit vergleichbaren Daten erarbeitet. Diese wird genutzt, um nicht-visuelle Effekte unterschiedlicher Untersuchungen und Ausrichtungen miteinander zu vergleichen und mögliche Interaktionen aufzudecken. Es sollen möglichst allgemeingültige Aussagen zu den Effekten der biologisch wirksamen Beleuchtung abgeleitet und modelliert werden.

#### LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Cajochen, C. (2007): Alerting effects of light. In: Sleep medicine reviews 11 (6), S. 453–464.
  - [2] Smolders, K.; de Kort, Y. (2014): Bright light and mental fatigue: Effects on alertness, vitality, performance and physiological arousal. Journal of Environmental Psychology 39, S. 77–91.
  - [3] Keis, O. et al. (2014): Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance. In: Trends in Neuroscience and Education 3 (3–4), S. 86–92.
  - [4] licht.de (2014), licht.wissen 19 Wirkung des Lichts auf den Menschen, Fördergemeinschaft Gutes Licht, ISBN 978-3-926193-97-1
  - [5] Münch, M. Y. et al. (2006): Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men, American Journal of Physiology – Regulatory Integrative and Comparative Physiology, vol. 290, no. 5, p. R1421–R1428
  - [6] DIN SPEC 5031-100 (2015): Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, melano-
- pische Wirkung des Lichts auf den Mensch – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren, Deutsches Institut für Normung
- [7] Münch, M. Y. (2015): Die Untersuchung von chronobiologischen Aspekten nicht-visueller Lichtwirkungen beim Menschen, Habilitationsschrift, Freie Universität Berlin
  - [8] Knoche, S. (2016): Optimierte Spektren für Human Centric Lighting – Theoretische Grenzen. In: LICHT 2016 – Tagungsband, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V., ISBN 9783731505648
  - [9] Lucas R. J. et al. (2014), Measuring an using light in the melanopsin age, Trends in Neurosciences, Vol 37, No.1, 2014
  - [10] LiTG-Publikation 32 (2015), Über die nicht-visuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft, ISBN 978-3-927787-52-0
  - [11] Wyszecki, G., Stiles, W.S. (1967). Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulas, John Wiley & Sons, Inc.
  - [12] Rea, M. S., & Freyssinier, J. P. (2013). White lighting. Color Research & Application, 38(2), 82–92 ■

Autoren: Dipl.-Ing. Mathias Niedling, Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker, Dr. Martine Knoop, M. Sc. Inga Rothert, Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin, [www.li.tu-berlin.de](http://www.li.tu-berlin.de)

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des NivIL-Projektes (Kennziffer 13N13398).

Anzeige

## RIGO 801 LEUCHTEN

- SSL Messungen konform zu LM-79-08, EN 13032-4, CIE S 025
- Messobjekt stationär, Type-C Konfiguration
- Messobjekte bis 2000 mm / 50 kg
- Kompakte Bauweise durch Nahfeldmessprinzip
- Goniospektrometrische Messungen
- Bildaufgelöste Leuchtdichte- und Farbmessung
- Messung von Strahlendaten



**TechnoTeam**  
Bildverarbeitung GmbH

**GONIO  
PHOTO  
METER**