

# NICHT-VISUELL WIRKSAME BELEUCHTUNGEN

## MESSTECHNISCHER UND QUALITATIVER VERGLEICH VON FÜNF LICHTLÖSUNGEN

**Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden fünf Beleuchtungssysteme mit nicht-visueller Wirkung miteinander verglichen. Die Leuchten in den Räumen der Universitären Altersmedizin, Felix-Platter Spital Basel, wurden zum einen durch lichttechnische Messungen, zum anderen über eine Befragung der Ärzte, Pflegefachkräfte und Therapeuten analysiert. Interviews zu Langzeiterfahrungen in Alten- und Pflegeheimen, die über eine nicht-visuell wirksame Beleuchtungsanlage verfügen, ergänzen die Untersuchungen. Der folgende Beitrag stellt die Ergebnisse des Forschungsprojektes vor und legt dabei einen Schwerpunkt auf die lichttechnische Messung der nicht-visuellen Wirkung der installierten Leuchten.**

in die Praxis ist jedoch noch mit einigen Unsicherheiten behaftet. Daher ist es umso wichtiger, die nicht-visuelle Wirkung besser zu verstehen und zu untersuchen, wie sie derzeit technisch umgesetzt wird.

Je nach Berufsgruppe gibt es hier unterschiedlichen Wissensbedarf. Für die Lichtplaner ist von Interesse, welche lichttechnischen Eigenschaften diese Beleuchtungen im Tagesverlauf aufweisen und welche technischen Eigenschaften die Leuchten haben. Dem Betreiber eines Seniorenzentrums ist es wichtig, dass die Leuchten im Alltag zuverlässig funktionieren und ihre Bedienung einfach ist.

Genau bei diesen Themen setzt das Forschungsprojekt an, über dessen Ergebnisse hier berichtet wird. Das zentrale Anliegen war es zu klären, was sich technisch hinter den nicht-visuell wirksamen Beleuchtungen verbirgt und wie die praktischen Einsatzbedingungen für eine solche Beleuchtung sind. ►

### 1 BEGRIFFSKLÄRUNG UND FRAGESTELLUNG

**Was ist nicht-visuell wirksame Beleuchtung? Wo wird sie eingesetzt?**

Wenn es um elektrische Beleuchtung in den Bereichen Gesundheit und Seniorenpflege geht, so findet man immer häufiger Werbung mit den Schlagworten »circadiane Beleuchtung«, »human centric lighting«, »visual timing light« und »biodynamisches Licht«. Gemeint sind damit Beleuchtungssysteme, die mit einer Veränderung der Lichtfarbe und des Beleuchtungsniveaus über den Tagesverlauf den Tag- Nacht-Rhythmus der Nutzer unterstützen und so einen gesundheitsfördernden Einfluss haben. Die Beleuchtungen sind also auch nicht-visuell wirksam (siehe Infobox 1).

Neben dem Licht gibt es auch andere Zeitgeber, wie Bewegung und Essen, die den Tag- Nacht-Rhythmus beeinflussen. Gerade im Krankenhaus ist davon auszugehen, dass einige dieser äußeren Zeitgeber durch den in der Regel stark veränderten Tagesablauf gestört werden. Besonders bei älteren Menschen kann dies Schlaflosigkeit nachts und Müdigkeit tagsüber fördern. Ein Zeitgeber, dessen Wirkung aktiv verbessert werden kann, ist die Lichtversorgung im Tagesverlauf. Ist dies nicht über Tageslicht möglich, was immer die erste Priorität sein sollte, so kann elektrische Beleuchtung mit nicht-visueller Wirkung eingesetzt werden.

**Was wissen wir und was noch nicht?**

Die nicht-visuelle Wirkung des Lichts ist ein integraler Zeitgeber für die menschliche Physis und Psyche. In der Planung ist Licht daher nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Beleuchtung und des visuellen Komforts zu betrachten, sondern auch unter den Aspekten der nicht-visuellen Wirksamkeit. Erfreulicherweise nimmt das Wissen in diesem Bereich ständig zu, es gibt zahlreiche Studien, die sich auf die physiologischen Bereiche und den medizinischen Nutzen einer nicht-visuell wirksamen Beleuchtung konzentrieren. Speziell die Übertragung der Erkenntnisse

#### INFOBOX 1:

#### WAS IST DIE NICHT-VISUELLE WIRKUNG VON LICHT?

Licht dient zur Aufnahme von visuellen Reizen und ermöglicht den Sehvorgang. Zusätzlich stellt Licht aber auch den wichtigsten Zeitgeber für die innere Uhr dar und beeinflusst die Körperfunktionen des Menschen, welche sich in einem circadianen Rhythmus verändern (circa (lat.): ungefähr; dies (lat.): Tag).

Die für das Sehen verantwortlichen Photorezeptoren im Auge sind die Zapfen (Tagsehen) und Stäbchen (Nachtsehen). Einer weiteren Photorezeptorart werden nichtvisuelle Funktionen zugeschrieben [1]. Diese intrinsisch fotosensitiven Photozellen (engl. intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGC) kommunizieren unter Beteiligung des Photopigments Melanopsin mit dem restlichen Gehirn, insbesondere mit dem suprachiasmatischen Kern (SCN) des anterioren Hypothalamus. Das Schlaf-Wachverhalten des Menschen wird primär von einem endogenen Taktgeber (»zentrale Uhr«) im SCN gesteuert [2]. Das Zusammenspiel aller Photorezeptoren im Auge und in den beteiligten Hirnregionen steuert die nicht-visuellen und die visuellen Wirkungen von Licht. Kurz gesagt versteht man also unter einer nicht-visuellen Wirkung alle Lichtwirkungen, die auf biologische Vorgänge im menschlichen Körper, wie z. B. den Schlaf-Wach-Zyklus, einen Einfluss haben, aber nicht unmittelbar mit dem Sehen zusammenhängen. Die nicht-visuellen Lichtwirkungen variieren mit der Tageszeit und der Quantität bzw. Qualität einer Beleuchtung. Bei einer elektrischen Beleuchtung wird dies technisch umgesetzt, indem sich die Farbtemperatur und eventuell die Beleuchtungsstärke im Verlauf des Tages verändern.

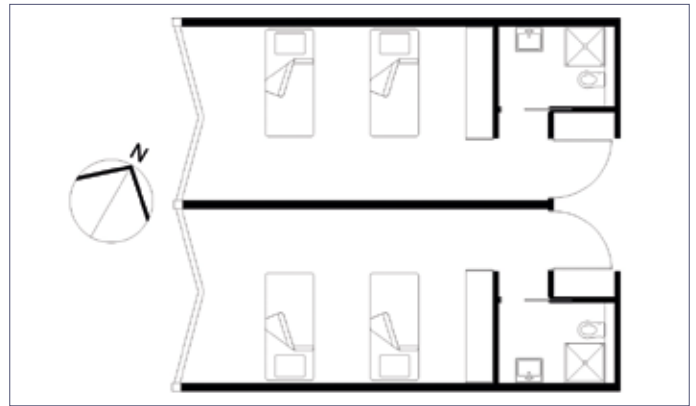


Abb. 1a–b: links: Typisches Zweibettzimmer im Felix-Platter Spital Basel; rechts: Grundriss von zwei Zweibettzimmern. Die Zimmer befinden sich im sechsten und siebten Obergeschoss.

Dies umfasst folgende Fragen:

- Wie lässt sich die nicht-visuelle Wirkung photometrisch bewerten?
- Wie verändern die einzelnen Leuchten die Farbwiedergabe im Raum?
- Wie sind die Leuchten programmiert und gibt es Unterschiede in der Programmierung?
- Erreicht die Beleuchtung die vorgeschriebenen Beleuchtungsstärken?
- Werden die Patienten geblendet?
- Welchen Einfluss haben Installation und Bedienung auf die Anwendungstauglichkeit in der Praxis?
- Wie hoch ist der Elektrizitätsbedarf der Beleuchtung?

## 2 KONZEPTION DER STUDIE

Um die Fragen zu beantworten, sollen verschiedene Leuchtenmodelle unter möglichst realen Bedingungen miteinander verglichen werden.

Das Felix-Platter-Spital Basel ist ein Zentrum für die stationäre und ambulante Universitäre Altersmedizin. Für dieses Zentrum wird derzeit ein Neubau erstellt (Fertigstellung: 2018). In den Räumlichkeiten der jetzigen Universitären Altersmedizin bestand die Möglichkeit, innovative, am Markt verfügbare Leuchten für den Neubau auszuprobieren. Insgesamt wurden für die Dauer von Juli 2015 bis Februar 2016 fünf Zweibett-Patientenzimmer mit jeweils einer nicht-visuell wirksamen Beleuchtungslösung ausgestattet und im Zeitraum November bis Dezember 2015 tageweise messtechnisch untersucht. Die baugleichen Räume (Abb. 1a – b) gewährleisteten eine gute Vergleichbarkeit unter realistischen Einsatzbedingungen. Die Beleuchtungen bestehen aus jeweils zwei, vier oder acht Leuchten mit LEDs als Leuchtmittel. Die Programmierung der Leuchten im Tagesverlauf beruht auf den Einstellungen der Hersteller. Gemessen wurden diverse lichttechnische Größen, je-

Abb. 2a: Position der Messgeräte für Messungen aus dem Blickwinkel des Patienten

- Messung auf vertikaler Ebene der Augenhornhaut (corneal) des Patienten
- Blickachse: 25° nach oben (Blickrichtung Wand/Decke)
- Höhe: 110 cm [9]
- ausgewertete Region: Reflexionsnormal an der Wand

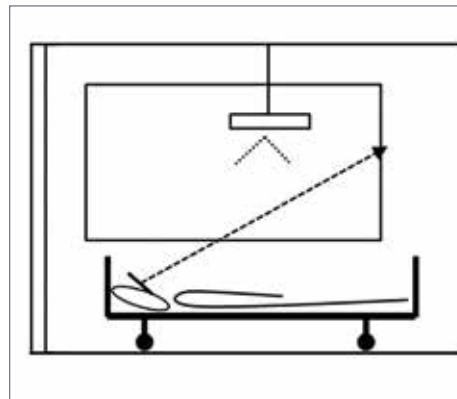
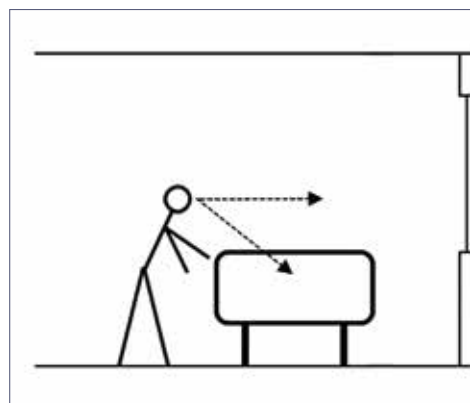


Abb. 2b: Position der Messgeräte für Messungen aus dem Blickwinkel des Pflegepersonals:

- Messung auf vertikaler Ebene der Augenhornhaut (corneal) der Pflegeperson
- Blickachse: 30° nach unten
- Höhe: 150 cm (Annahme leicht gebeugte Haltung)
- ausgewertete Region: Reflexionsnormal auf 85 cm Höhe



weils aus dem Blickwinkel der Patienten und der Pflege (Abb. 2a und 2b).

Die Abbildungen 3a – e zeigen die in den Zimmern installierten Beleuchtungssysteme und ihre Spektren zu verschiedenen Tageszeiten:

- »Vanera« und »Vivaa«: Derungs Licht AG, (CH), vertreten durch Firma Waldmann Lichttechnik GmbH, (CH)
- »Mira LED«: Osram AG, (CH)
- »RD Spezial«: RD Leuchten AG, (CH)
- »BelvisioAct D«: Trilux GmbH & Co. KG, (CH)

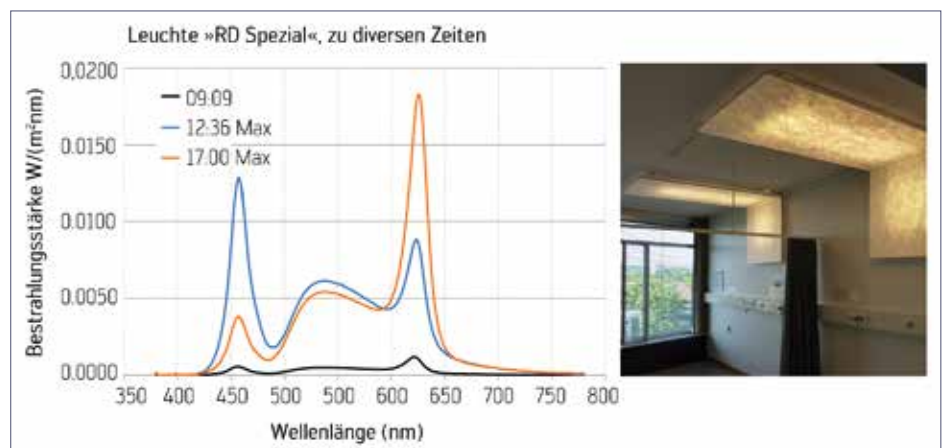
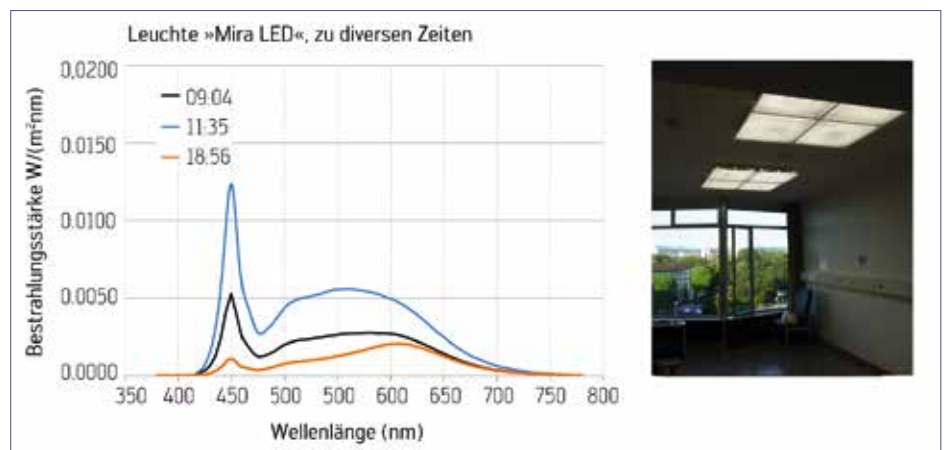
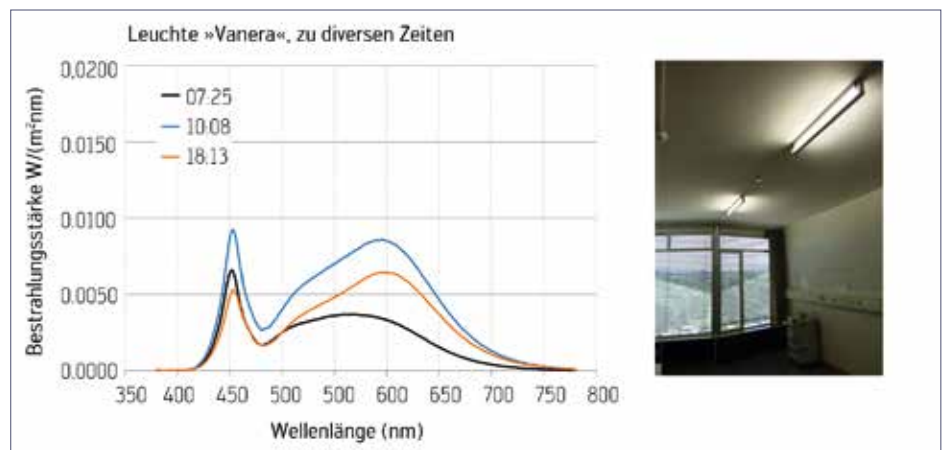
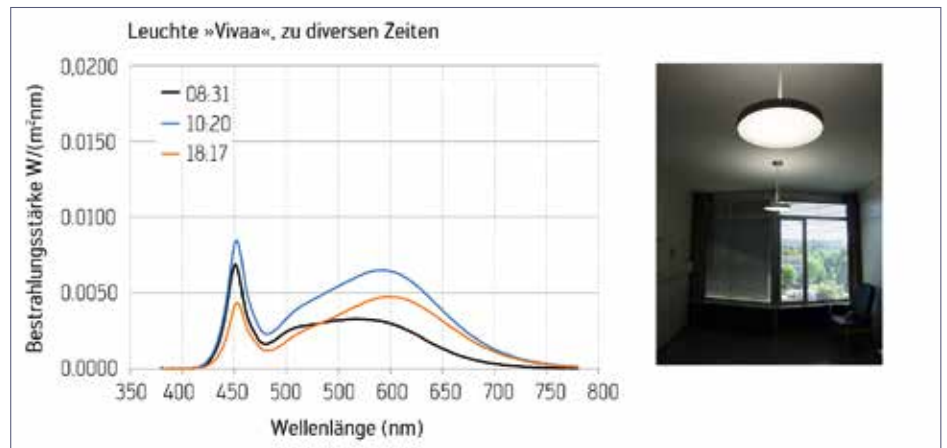
Pro Leuchte erfolgte eine eintägige Messung im Zeitraum vom 10.11. bis zum 16.12.2015. Zum Einsatz kamen drei Messgeräte für folgende Größen:

- mit dem Messgerät »LMK 5 color« gemessene Größen:
  - ortsaufgelöste Leuchtdichte
  - ortsaufgelöste Blendung (UGR)
  - ortsaufgelöstes Wirkungsspektrum für die Melatonin-suppression in der Nacht
- mit dem Messgerät »Specbos 1201« gemessene Größen:
  - effektive Bestrahlungsstärke bezogen auf die fünf Photorezeptoren des menschlichen Auges
  - vertikale Beleuchtungsstärke,  $E_{\text{vert}}$
  - Spektrum
  - Ähnlichste Farbtemperatur
  - Farbwiedergabeindex  $R_a$
- mit dem Messgerät »LMT Pocket-Lux 2« gemessene Größen:
  - horizontale Beleuchtungsstärke,  $E_{\text{horiz}}$

Zusätzlich zu den lichttechnischen Messungen erfolgte eine Befragung der Ärzte, Pflegefachkräfte und Therapeuten mittels Fragebogen. Bedingt durch die Belegung der Zimmer ist pro Leuchte die Anzahl der abgegebenen Bewertungen unterschiedlich: »Vanera« und »Vivaa«: zwölf; »Mira LED«: fünf; »RD Spezial«: vier; »BelvisioAct D«: fünf.

Interviews zu Langzeiterfahrungen in sechs anderen Alten- und Pflegeheimen, die über nicht-visuell wirksame Beleuchtungsanlagen verfügen, ergänzen die Untersuchung. ▶

Abb. 3a – d: Spektren der Leuchten »Vivaa«, »Vanera«, »Mira LED« und »RD Spezial« zu diskreten Zeitpunkten im Tagesverlauf





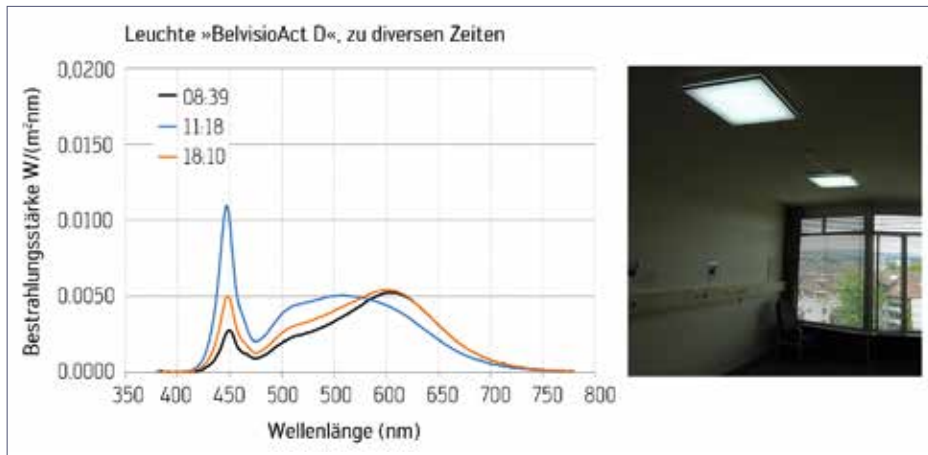


Abb. 3e (links): Spektrum der Leuchte »BelvisioAct D« zu diskreten Zeitpunkten im Tagesverlauf

Abb. 3f: Blick in ein Patientenzimmer mit Bestandsleuchte ohne programmierbaren Tagesverlauf



### 3 MESSERGEBNISSE

#### 3.1 Messung und Bewertung der nicht-visuellen Wirkung

Die nicht-visuelle Wirkung der Beleuchtung wird immer auf Basis von spektralen Daten (380 – 780 nm) gemessen. Allerdings gibt es Unterschiede hinsichtlich der weiteren Berechnung. Es wird mit zwei Bewertungsmethoden gearbeitet (siehe Infobox 2):

1. Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht  $a_{msv}$
  2. Effektive Bestrahlungsstärke, bezogen auf die Photorezeptoren des menschlichen Auges  $E_{e,sc}$ ,  $E_{e,mc}$ ,  $E_{e,lc}$ ,  $E_{e,z}$  und  $E_{e,r}$
- Bei beiden Methoden wird die Alterung des Auges über bestimmte Minderungsfaktoren für die nicht-visuelle Wirkung berücksichtigt.

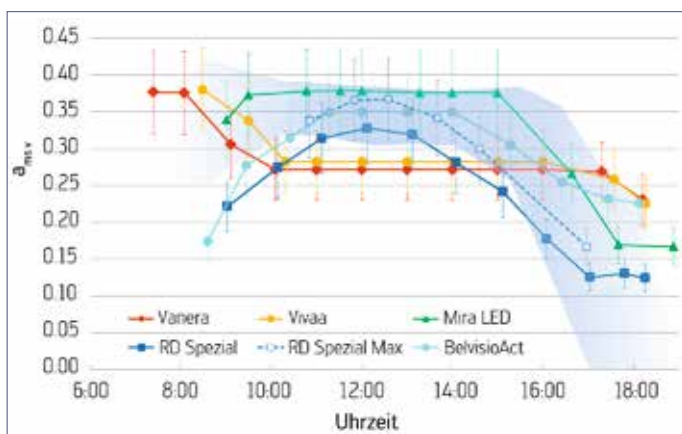


Abb. 4: Wirkfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht (Blickwinkel Patient, Personen älter 75 Jahre). Der blau markierte Bereich entspricht den gemessenen Tageslichtverläufen an den fünf Messstagen (Maximalwert dunkelster Messtag, mit Standardabweichung Messtag,  $\sigma = 0.08$ , Maximalwert hellster Messtag,  $\sigma = 0.19$ ). Die Messpunkte zeigen die elektrische Beleuchtung. Als Minderungsfaktor für die Linsentrübung und Pupillengröße in Abhängigkeit vom Alter wird ein Korrekturfaktor von 0.5 [5] verwendet. Größtmögliche Messunsicherheit gemäß Messunsicherheitsanalyse: 15% vom Messwert.  
Kommentar: Bei der ersten Messung der Leuchte »RD Spezial« (17.11.2015) wurde versehentlich bei einer niedrig eingestellten Beleuchtungsstärke gemessen. Daher wurden am 16.12.2015 noch einige Messpunkte mit einer hohen Beleuchtungsstärke erfasst (»RD Spezial, Max«).

Die ausgewiesenen Werte sind immer mit den entsprechenden Faktoren für Personen älter als 70 Jahre gemäß [3] und [4] reduziert. Eine abschließende Beurteilung der programmierten Tagesverläufe der elektrischen Beleuchtung ist nur mit Einschränkungen möglich. Dies liegt daran, dass der Forschungsstand auf dem Gebiet der nicht-visuellen Wirkungen derzeit dynamisch ist. Speziell für die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis besteht noch Erprobungsbedarf [5]. Unter der Prämisse, dass ein tageslichtähnlicher Verlauf sinnvoll ist, kann ein qualitativer Vergleich gezogen werden. Dazu wird der programmierte Verlauf der elektrischen Beleuchtung mit definierten Zeitpunkten im Verlauf des Tages verglichen.

#### 3.1.1 Messung Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression

Abb. 4 zeigt den Verlauf des  $a_{msv}$ -Wertes bei Tageslicht und bei elektrischer Beleuchtung. Der blau Bereich im Hintergrund der Grafik zeigt den Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht  $a_{msv}$  am Messpunkt »Blickwinkel des Patienten« nur mit Tageslicht (alle Messtage). Die Maximalwerte des dunkelsten und hellsten Messtages liegen zwischen 0.38 und 0.41. Das Tageslicht weist am Morgen einen eher hohen  $a_{msv}$ -Wert auf, der bis 10:00 Uhr ein wenig sinkt und dann bis 15:00 Uhr gleich bleibt (zwischen 0.31 und 0.38). Abends fällt der Wert stark ab.

Der  $a_{msv}$ -Wert der Leuchten liegt zwischen 0.12 und 0.38. Die Leuchtentypen zeigen im Tagesverlauf grob zwei unterschiedliche Verlaufstypen:

- Verlauf »1«: Höchster Wert morgens, dann zwischen ca. 10:00 und 16:00 Uhr konstante Werte sowie abends ein Absinken (»Vivaa«, »Vanera«): Morgens liegt der  $a_{msv}$  bei 0.38 und im konstanten Bereich bei 0.28 bzw. 0.27. Abends verringert sich der Wert auf 0.23.
- Verlauf »2«: Kurvenförmiger Verlauf mit tiefen Werten morgens und abends, sowie mittags einem Höhepunkt (»RD Spezial«) oder einem Plateau (»BelvisioAct D« und »Mira LED«): Bei der Leuchte »BelvisioAct D« dauert das Plateau von 11:15 bis 14:00 Uhr ( $a_{msv}$  bei 0.35) bei der Leuchte »Mira LED« von 9:30 bis 15:00 Uhr ( $a_{msv}$  bei 0.38). Der Verlauf »1« entspricht eher dem des Tageslichts. Der  $a_{msv}$ -Wert der Leuchten »Vivaa« und »Vanera« ist im konstanten Bereich (10:00 bis 16:00 Uhr) aber niedriger als bei Tageslicht. Verlauf »1« ist also dann sinnvoll, wenn ein tageslichtähnlicher Verlauf der Aktivierung gewünscht ist. Der Verlauf »2« scheint eher eine Aktivierung mittags unterstützen zu wollen. Dies könnte einer Ruhephase der Patienten über Mittag – falls diese gewünscht ist – entgegenstehen. ▶

## INFOBOX 2:

## WIE KANN DIE NICHT-VISUELLE WIRKUNG GEMESSEN WERDEN?

**Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht  $a_{msv}$** 

Die erste, ältere Bewertungsmethode für die nicht-visuelle Wirkung setzt beim Melatonin an und heißt Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht  $a_{msv}$  [3].

Hauptfunktion des Hormons Melatonin ist das Auslösen körpereigener Prozesse während der Nacht. Beim Menschen ist die bekannteste Funktion die Einleitung von Schlaf und das Senken der Körpertemperatur [10]. Melatonin hat – wie viele andere Hormone auch – einen circadianen Zeitverlauf. Es weist nachts einen hohen und tagsüber einen niedrigen Spiegel auf.

Ganz ohne Zeitgeber wie Licht stellt sich eine eigene circadiane Rhythmik ein, die in der Regel etwas länger als ein Tag ist [11]. Der natürliche Verlauf des Tageslichts übernimmt die Funktion einer Feinjustierung dieser circadianen Rhythmik. Sind wir nachts Licht ausgesetzt, wird die Melatoninproduktion unterdrückt. Als besonders wirksam für die Melatoninsuppression beim Menschen hat sich kurzwelliges Licht mit einem hohen Blauanteil erwiesen [12], [13].

Um nun das Licht und seine spektrale Zusammensetzung in Bezug auf das Melatonin bewerten zu können, wurde ein Aktionsspektrum für die Melatoninsuppression festgelegt. Dieses Aktionsspektrum basiert auf gemessenen Werten für die nächtliche Melatoninsuppression bei einzelnen Wellenlängen [12], [13]. Durch diese Werte wurde eine mittlere Kurve gelegt und teilweise ergänzt. Ihr Maximum hat diese Kurve bei 450 nm [14]. Die Kurve  $[s_{ms}(\lambda)]$  soll eine vergleichende Bewertung der melatoninunterdrückenden Wirkung verschiedener Lichtquellen ermöglichen. Sie gibt also einen Hinweis, ob die Strahlung einen großen Blauanteil enthält.

Kritisch anzumerken ist, dass dieses Aktionsspektrum strenggenommen nur für die Nacht gilt, da die Messungen zur Melatoninsuppression nachts und mit monochromatischem Licht stattfanden. Die Ergebnisse lassen sich nicht ohne weiteres auf polychromatisches Licht und die Tagzeiten übertragen. Der wichtigste Punkt der Kritik ist aber, dass neuere Erkenntnisse zeigen, dass sich die nicht-visuelle Wirkung von Licht nicht nur auf die Melatoninproduktion reduzieren lässt [15].

**Effektive Bestrahlungsstärke, bezogen auf die Photorezeptoren des menschlichen Auges**

Die zweite, aktuellere Bewertungsmethode für die nicht-visuelle Wirkung des Lichts wählt einen breiteren Ansatz. Für die nicht-visuellen Prozesse wurden in der Zwischenzeit ergänzend zur Melatoninsuppression weitere Wirkmechanismen festgestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Wirkung von Licht auf alle circadianen, nervlichen, hormonellen und neurologischen Vorgänge je nach Situation, zeitlichem Verlauf und gegenseitigem Einfluss unterscheidet [16]. Obwohl sie von den Aspekten der Wahrnehmung getrennt sind, nehmen auch diese Prozesse ihren Anfang im Auge. Eine zentrale Rolle spielen dabei intrinsisch fotosensitive Photorezeptoren in der Netzhaut des Auges (ipRGC), die kein bildhaftes Sehen vermitteln,

sondern ausschließlich der Lichtdetektion dienen [1]. Das Photopigment der ipRGC ist Melanopsin. Auf zellulärer Ebene findet eine Interaktion mit den Zapfen und Stäbchen statt, sodass diese mit ihren zugehörigen Photopigmenten sowohl am visuellen, als auch am nicht-visuellen System beteiligt sind.

Zapfen und Stäbchen enthalten zusammen vier Photopigmente:

- Photopsin (sc), als Photopigment für die Blau-Zapfen,
- Photopsin (mc) als Photopigment bei den Grün-Zapfen,
- Photopsin (lc) als Photopigment bei den Rot-Zapfen und
- Rhodopsin als Photopigment bei den Stäbchen.

Zusammen mit dem Melanopsin umfasst die Betrachtung des nicht-visuellen Photorezeptor-Systems also fünf Photopigmente.

Die spektrale Empfindlichkeit aller Rezeptoren unterscheidet sich und weist ihr Maximum bei unterschiedlichen Wellenlängen im Bereich der sichtbaren Strahlung auf [4]. Die spektrale Zusammensetzung des Lichtes spielt also eine wichtige Rolle. Je nach Situation, Lichtmenge, Dauer der Exposition etc. kann sich die Größe des Einflusses der einzelnen Rezeptoren ändern [16].

Um die Größe des Reizes auf die Rezeptoren bewerten zu können, wird – bezogen auf das jeweilige Photopigment – die wirksame Bestrahlungsstärke  $E_{e,\alpha}$  (Cyanopische Bestrahlungsstärke  $E_{e,sc}$ ; Chloropische Bestrahlungsstärke  $E_{e,mc}$ ; Erythropische Bestrahlungsstärke  $E_{e,lc}$ ; Melanopische Bestrahlungsstärke  $E_{e,z}$ ; Rhodopische Bestrahlungsstärke  $E_{e,r}$ ) ausgegeben [4]. Dazu werden die gemessenen Werte der Bestrahlungsstärke (380–780 nm) mit der Wirkungsfunktion für das entsprechende Photopigment bewertet (siehe Abb.). Nach derzeitiger Kenntnis ist ein direkter Rückschluss von den gewichteten Bestrahlungsstärken  $E_{e,\alpha}$  auf die Auswirkungen des Lichts hinsichtlich Gesundheit und Physiologie nicht möglich [4]. Es kann höchstens gesagt werden, dass die ausgewerteten Größen einen wichtigen Einfluss auf die nicht-visuellen Reaktionen haben.

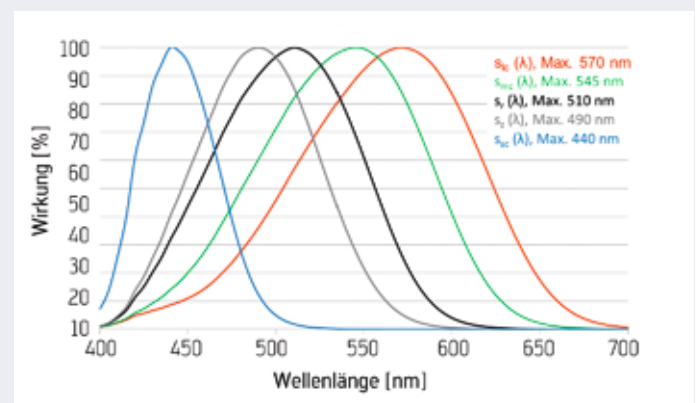


Abb.: Wirkungsspektren für die fünf Photopigmente des menschlichen Auges. Datenquelle [4]

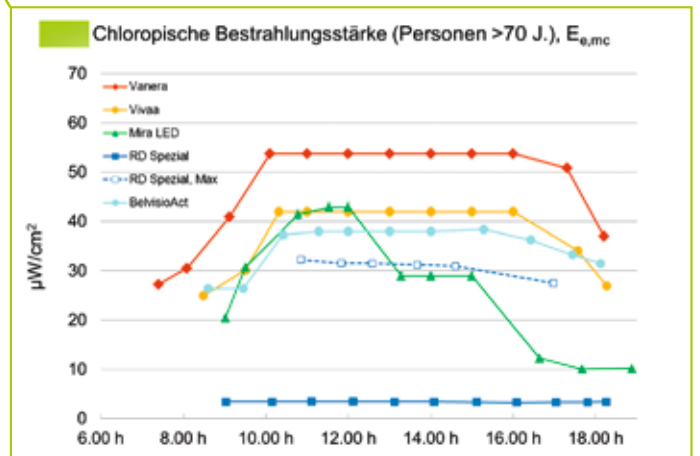
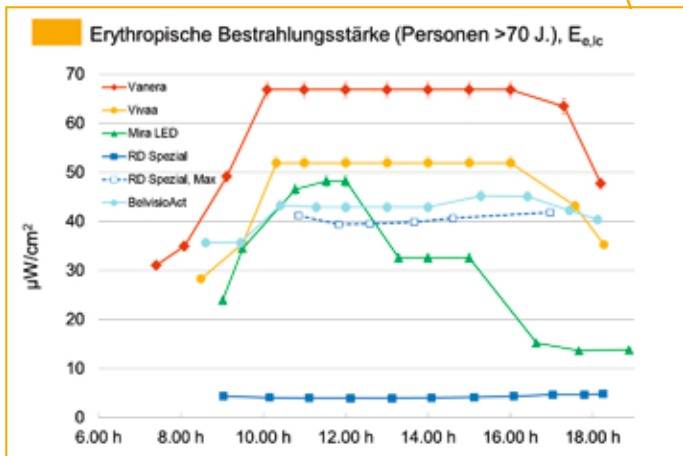
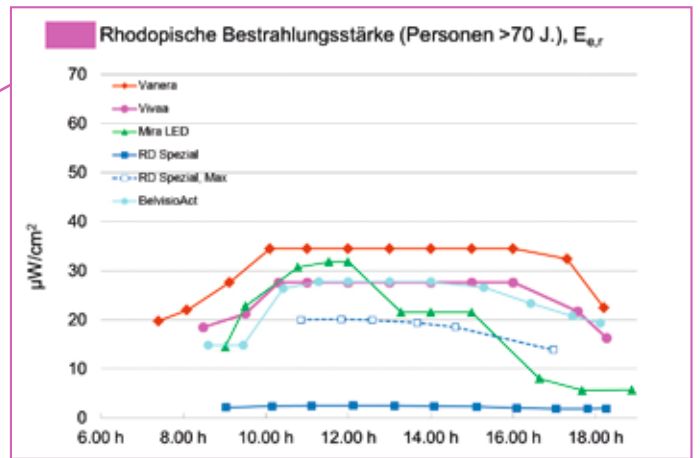
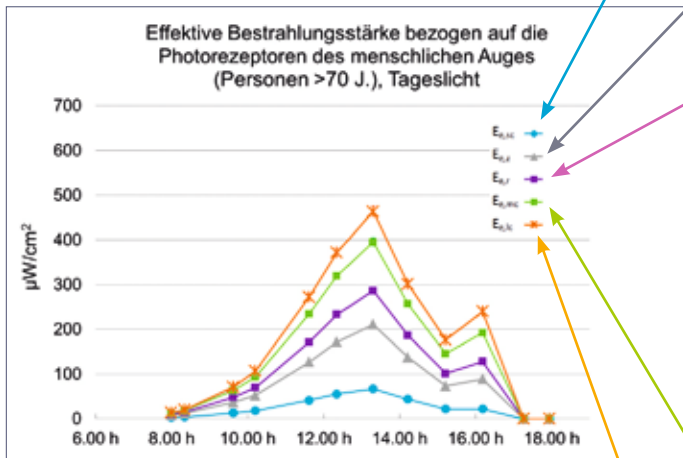
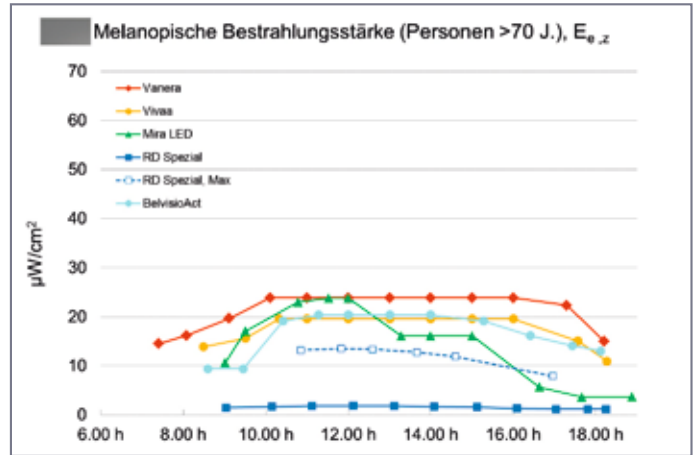
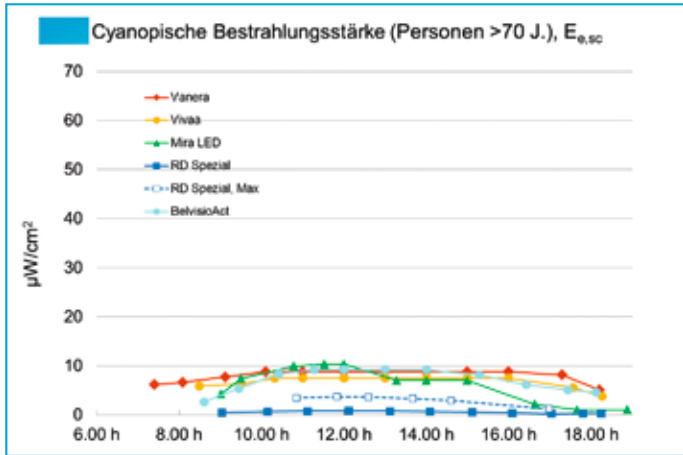


Abb. 5a – f: Messergebnisse effektive Bestrahlungsstärke  $E_{e,\alpha}$  bezogen auf die Photorezeptoren des Auges (s-Zapfen, m-Zapfen, l-Zapfen, ipRGC und Stäbchen), Blickwinkel Patient

Mitte links: Messung nur mit Tageslicht (sonniger Tag, 10.11.2015)

andere Grafiken: Messung nur elektrische Beleuchtung

Die Auswertungen werden für Personen älter 70 Jahre ausgegeben. Gemäß [4]

wurden ausgehend vom 32-jährigen Standardbeobachter die folgenden Minderungs-faktoren verwendet:  $E_{e,sc} = 0.38$ ,  $E_{e,mc} = 0.73$ ,  $E_{e,lc} = 0.79$ ,  $E_{e,z} = 0.57$ ,

$E_{e,r} = 0.63$ . Die größtmögliche Messunsicherheit gemäß Messunsicherheitsanalyse betrug 2.4% vom Messwert.

Kommentar: Bei der ersten Messung der Leuchte »RD Spezial« (17.11.2015) wurde versehentlich bei einer niedrig eingestellten Beleuchtungsstärke gemessen. Daher wurden am 16.12.2015 noch einige Messpunkte mit einer hohen Beleuchtungsstärke erfasst (»RD Spezial, Max«).

### 3.1.2 Messung effektive Bestrahlungsstärke $E_{e,\alpha}$ bezogen auf die Photorezeptoren des menschlichen Auges

Als Referenz zeigt Abb. 5 links in der Mitte den Verlauf der Bestrahlungsstärke  $E_{e,\alpha}$  für Tageslicht an einem sonnigen Tag. Hier hat die Bestrahlungsstärke  $E_{e,\alpha}$ , bezogen auf alle Photorezeptoren, ihr Maximum auf unterschiedlichem Niveau mittags um circa 13:00 Uhr.

Im Vergleich dazu ist der  $E_{e,\alpha}$ -Verlauf, bezogen auf alle Photorezeptoren, für die Leuchten »Vivaa«, »Vanera«, »RD Spezial« und »BelvisioAct D« anders. Dies liegt an den konstanten Werten zwischen circa 10:00 und 16:00 Uhr. Der Verlauf für »Mira LED« empfindet zumindest ansatzweise einen Höhepunkt mittags nach. Abweichend vom Tageslichtverlauf kann im Spital aber morgens und besonders abends die elektrische

Beleuchtung nicht gänzlich reduziert werden. Welche Eigenschaften dieses Licht haben sollte, ist offen.

Zur Interpretation der Verläufe der einzelnen Bestrahlungsstärken mit elektrischer Beleuchtung (Abb. 5) ist die Kenntnis der einzelnen Spektren der Leuchten hilfreich (Abb. 3a – 3e).

Die (tageszeitabhängigen) Spektren der Leuchten »Vivaa«, »Vanera«, »BelvisioAct D« und »Mira LED« sind sich sehr ähnlich: Sie weisen alle eine ausgeprägte Spitze im Bereich von circa 450 nm (Blauanteil) auf. Zwischen 470 und 490 nm ist die Bestrahlungsstärke niedrig, während sie zwischen 490 und 780 nm noch einmal kontinuierlich an- und absteigt. Je nach Tageszeit variiert die Wellenlänge dieses zweiten Peaks zwischen 560 und 630 nm (Grün-/Gelbanteil). Die Leuchte »RD Spezial« entspricht nicht diesem Profil. Bei ihr gibt es drei Höhepunkte. Zwei Spitzen bei 460 nm (Blauanteil) und bei 630 nm (Rotanteil). Je nach Tageszeit ist das Maximum im kurzwelligen (mittags) oder im langwelligen Bereich (später Nachmittag) höher. Im Abschnitt zwischen diesen beiden Spitzen liegt eine dritte, kontinuierlich an- und absteigende Erhebung.

Wenn der Höhepunkt eines Leuchtenspektrums mit dem Maximum des Aktionspektrums der Bestrahlungsstärke eines Photorezeptors zusammentrifft (siehe Abb. in Infobox 2), dann resultiert für diesen Photorezeptor ein großer Reiz, d. h. hohe Werte. Dies ist beispielsweise bei der erythropischen Bestrahlungsstärke  $E_{e,lc}$  (Maximum Aktionspektrum  $s_{lc}(\lambda)$ : 570 nm) und der Leuchte »Vanera« der Fall. Bei der cyanopischen Bestrahlungsstärke  $E_{e,sc}$  (Maximum Aktionspektrum  $s_{sc}(\lambda)$ : 440 nm) hat keine der Leuchten ein Maximum in ihrem Spektralverlauf. Entsprechend klein sind die Werte über den Tagesverlauf. Bei der melanopischen Bestrahlungsstärke (Maximum Aktionspektrum  $s_z(\lambda)$ : 490 nm) wäre zu erwarten, dass der Verlauf der  $E_{e,z}$ -Werte jenem der  $a_{msv}$ -Werte ähnelt (Abb. 4), schließlich geht es auch hier um die Wirkgröße Melatonin. Dem ist allerdings nicht so. Dies erklärt sich dadurch, dass sich die beiden Wichtungsfunktionen  $s_{ms}(\lambda)$  und  $s_z(\lambda)$ , aus denen  $a_{msv}$  und  $E_{e,z}$  gebildet werden, hinsichtlich Maximum und Verlauf stark unterscheiden (Maximum  $s_{ms}(\lambda) = 450$  nm, asymmetrischer Verlauf). Der Vergleich der  $E_{e,z}$ -Tagesverläufe und der  $a_{msv}$ -Tagesverläufe der Leuchten zeigt, dass sich bei »Vivaa«, »Vanera« und »Mira LED« speziell am Morgen Unterschiede ergeben ( $a_{msv}$  morgens höchster Wert (Abb. 4),  $E_{e,z}$  tiefer Wert (Abb. 5)).

### 3.1.3 Diskussion Messung nicht-visuelle Wirkung

Bei den Messungen der lichttechnischen Größen war speziell die messtechnische Erfassung der nicht-visuellen Wirkung von Interesse. Es liegen nun für fünf unterschiedliche Leuchten Tagesverläufe verschiedener lichttechnischer Größen vor. Da sie sich deutlich voneinander unterscheiden, stellt sich die Frage, welcher der gemessenen Verläufe für die Patienten am vorteilhaftesten ist.

Obwohl es einige Anhaltspunkte gibt, ist nach derzeitigem Kenntnisstand kein direkter Rückschluss von den gemessenen Größen auf die Wirkungen des Lichts hinsichtlich Gesundheit und Physiologie möglich [4]. Unter der Annahme, dass ein tageslichtähnlicher Verlauf sinnvoll ist, wird im Projekt ein qualitativer Vergleich gezogen. Als Referenz dient der Tageslichtverlauf an einem sonnigen Tag.

Die nichtvisuelle Wirkung wird anhand von zwei Bewertungsmethoden ermittelt (siehe Infobox 2). Die beiden Bewertungsmethoden können

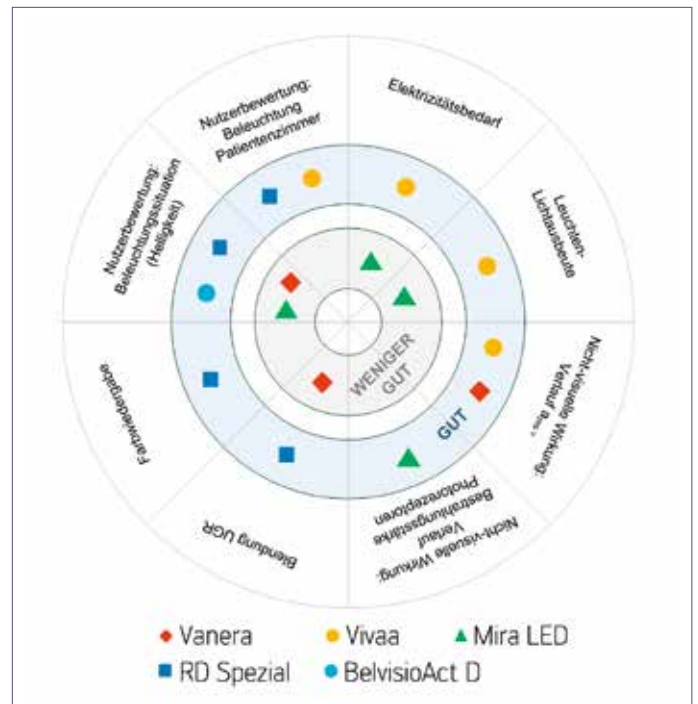


Abb. 6: Zusammenfassung qualitativer Vergleich der fünf Beleuchtungslösungen hinsichtlich bewertbarer Faktoren

nicht miteinander verglichen werden, da sie unterschiedliche Kenntnisstände in diesem Forschungsbereich repräsentieren. Dies zeigt besonders gut das Beispiel der Melatoninsuppression, für die in der Literatur zwei unterschiedliche Wichtungsfunktionen zu finden sind. Ein Vergleich der elektrischen Beleuchtung mit dem Tageslichtverlauf führt mit beiden Bewertungsfaktoren zu unterschiedlichen Ergebnissen. Beim Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression  $a_{msv}$  erscheint der Verlauf der Leuchten »Vivaa« und »Vanera« sinnvoll. Bezogen auf die Bestrahlungsstärken  $E_{e,\alpha}$  ( $E_{e,sc}$ ,  $E_{e,mc}$ ,  $E_{e,lc}$ ,  $E_{e,z}$  und  $E_{e,r}$ ), die wissenschaftlich aktueller sind, scheint der Verlauf von »Mira LED« am tageslichtähnlichsten. Eine Antwort auf die Frage, was für eine Eigenschaft die elektrische Beleuchtung abends und morgens haben sollte, also welche Rezeptoren mit den zugehörigen Photopigmenten speziell angesprochen werden sollten, bleibt derzeit noch offen.

### 3.2 Weitere Messergebnisse

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse aus den Messungen kurz zusammengefasst.

- *Hohe Zuverlässigkeit bei der Programmierung der ähnlichsten Farbtemperatur und Helligkeit*

Im Tagesverlauf lassen sich fast alle Leuchten entsprechend den Planungsvorgaben bezüglich Farbtemperatur und Helligkeit programmieren (Ausnahme »Mira LED« zwischen 10:00 und 13:00 Uhr). Das gesamte Niveau der ähnlichsten Farbtemperatur blieb aber etwas unter den eingestellten Absolutwerten. Die maximale und minimale ähnlichste Farbtemperatur entspricht bei keiner Leuchte der Programmierung, sondern ist zwischen 15... 21% bzw. 4... 7% niedriger. Als mögliche Gründe dafür kommen die Abdeckung der Leuchte, technische Einschränkungen und der Reflexionsgrad der Wände in Betracht. ►



- *keine signifikante Veränderung der Farbwiedergabe im Raum*  
Der gemessene Farbwiedergabeindex hält die normativen Anforderungen für Patientenzimmer  $R_a \geq 80$  [4] ein. Auch für den speziellen Farbwiedergabeindex  $R_{f\beta}$  (Hautfarbe) werden die Vorgaben von allen Leuchten (knapp) erfüllt.
- *Beleuchtungsstärke wird eingehalten*  
Die vorgeschriebenen Beleuchtungsstärken für Patientenzimmer (300 lx für »einfache Untersuchung« gem. DIN 5035-3:2006) werden mit der Beleuchtung auf der Ebene Bett erreicht.
- *Gemessene Blendung der Patienten (UGR)*  
Auffallend ist, dass alle Leuchten die normativen Blendungsvorgaben für Spitalzimmer (UGR  $\leq 19$ , [9]) überschreiten. Die Messung zeigt, dass die Position der Leuchte an der Decke ungünstig ist und die Patienten durch die Beleuchtung geblendet werden. Durch die liegende Position der Patienten ist die Leuchte immer im Blickfeld, was zu einer Überschreitung der Anforderungen führt. Lichtplanerisch sind Lösungen, bei denen sich die Leuchte außerhalb des Blickfeldes der Patienten befindet, zu bevorzugen.

## 4 WAS SAGEN DIE NUTZER ZUR BELEUCHTUNG?

### 4.1 Nutzerbefragungen zu den Leuchten

Der wichtigste Punkt vorweg: »Nie« oder »selten« trat eine Störung der Patienten durch die elektrische Beleuchtung bei den drei Leuchten »Mira LED«, »BelvisioAct D« und »RD Spezial« auf (entspricht 75 ... 100% der Befragten, jeweils drei von vier Antworten). »Manchmal« traten Störungen durch die Leuchten »Vanera« und »Vivaa« auf (entspricht 63% der Befragten, sieben von elf Antworten; bzw. 40%, vier von zehn Antworten).

Blendung ist – etwas im Widerspruch zu den Messergebnissen/Normwerten – »selten« bis »manchmal« ein Problem. »Manchmal« oder »häufig« werden nach Auffassung von 42% bzw. 50% der Befragten die Patienten im Bett durch die Leuchten »Vivaa« (fünf von zwölf Antworten) und »Vanera« (fünf von zehn Antworten) geblendet.

Die Beleuchtung der Patientenzimmer wird insgesamt zwischen »sehr gut« (»RD Spezial« und »Vivaa«) und »mittelmäßig« (»BelvisioAct D«) beurteilt. Die Beleuchtung im Raum fanden bei »RD-Spezial« 50% (zwei von vier Antworten) »sehr gut«, die Leuchte »BelvisioAct D« bewerteten 60% »mittelmäßig« (drei von fünf Antworten). Von einer großen Zahl (zwölf Personen) im Mittel als »gut« bewertet wird die Leuchte »Vivaa«. Das Urteil »gut« oder »sehr gut« geben 75% (neun von zwölf Antworten) ab.

Die Beleuchtung funktioniert in allen Räumen »immer« oder »meistens«, also zuverlässig. Dies beinhaltet zwischen 75% und 100% der Antworten. Die Bedienung selber wird eher als »mittelmäßig« beurteilt. Bei der Leuchte »BelvisioAct D« könnte das Touchpanel vielleicht ein Grund dafür sein. Bei den anderen Leuchten sind die Ursachen nicht ganz klar. Eventuell wird der Vergleich zur Bestandslösung gezogen: Dort gibt es einen einzigen Ein/Aus-Schalter. Es lässt sich die Empfehlung ableiten, dass eine möglichst einfache Lösung vorteilhaft ist.

### 4.2 Nutzerbefragung Langzeiterfahrungen in anderen Projekten

Aus den sechs Interviews lässt sich rückschließen, dass für die Zufriedenheit der Nutzer die Bedienfreundlichkeit der Beleuchtung wesentlich

ist. Dies zeigt sich daran, dass für das Gesamturteil die Leichtigkeit der Handhabung entscheidend ist. Ist zum Beispiel die Steuerung kompliziert, wird dies sehr negativ beurteilt und führt dazu, dass die Betreiber das System nicht nochmals wählen würden (zwei Projekte). Geduldet wird eine Einregulierungsphase mit Korrekturen der Programmierung unter der Prämisse, dass diese erfolgreich beendet wird (zwei Projekte). Das allgemeine (geplante) Helligkeitsniveau ist für das Gesamturteil dann unkritisch, wenn es über die Programmierung unkompliziert verändert werden kann.

## 5 HAT ALLES FUNKTIONIERT?

Aus dem Betrieb der Leuchten zwischen Juli 2015 bis Februar 2016 können einige Rückschlüsse gezogen werden:

- *Der Einfluss des Bedienkonzepts auf die Anwendungstauglichkeit ist hoch.*

Es zeigte sich im Projekt selbst und auch in den Interviews zu Langzeiterfahrungen, dass eine einfache Bedienung für eine positive Nutzerbewertung sehr wichtig ist. Beleuchtungssysteme mit einer komplizierten Bedienung und Steuerung werden eher negativ beurteilt. Die Interviews zu den Langzeiterfahrungen zeigen auch, dass sich eine frühe Einbindung der Nutzer bei der Planung bewährt hat.

- *Große Zuverlässigkeit in der Funktion und geringer Wartungsaufwand*  
Die Leuchten funktionierten während der Projektdauer zuverlässig, es gab keine Ausfälle oder Störungen, weder hinsichtlich der Programmierung noch der Leuchten selbst. An der Beleuchtung waren keine Wartungsarbeiten erforderlich. Die Lebensdauer von LEDs wird von den Herstellern mit 50.000 Stunden angegeben.

- *Energiebedarf*

Die installierte Leistung ist unterschiedlich hoch, daher streut der berechnete Strombedarf stark von 16,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) bis 51,8 kWh/(m<sup>2</sup>a). Bei der derzeitigen Programmierung ist der Strombedarf einiger Leuchten hoch. Dieser ließe sich durch einen Beleuchtungsstärkesensor reduzieren.

## 6 QUALITATIVE BEWERTUNG DER BELEUCHTUNGSLÖSUNGEN

Für einen Vergleich der Mess- und Untersuchungsergebnisse der fünf Leuchten werden folgende acht lichttechnische Themen definiert, die sich für einen Vergleich eignen:

- 1) Energiebedarf
- 2) Leuchten-Lichtausbeute
- 3) nicht-visuelle Wirkung: Verlauf  $a_{msv}$
- 4) nicht-visuelle Wirkung: Verlauf Bestrahlungsstärke bezogen auf Photorezeptoren
- 5) Blendung
- 6) Farbwiedergabe
- 7) Nutzerbewertung Beleuchtungssituation (Helligkeit) Kunstlicht
- 8) Nutzerbewertung Beleuchtung allgemein

Innerhalb jedes Themenbereiches wurde jeweils die beste Leuchte ermittelt und mit einem Punkt bewertet. Damit liegt die höchste zu erreichende Punktzahl bei 8. Zwei Leuchten haben – in jeweils unterschiedlichen Bereichen – vier Punkte erreicht (Abb. 7).

- Leuchte »Vivaa« in den Bereichen 1, 2, 3 und 8 (Nutzerbefragung mit zwölf Bewertungen)
- Leuchte »RD Spezial« in den Bereichen 5, 6, 7 und 8 (Nutzerbefragung mit vier Bewertungen)



## 7 LITERATUR

- [1] D. M. Berson, F. A. Dunn, and M. Takao: Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock, *Science* (80- ), vol. 295, no. 1070–1073, 2002.
- [2] B. Saper, Clifford, J. Lu, T. C. Chou, J. Gooley: The hypothalamic integrator for circadian rhythms, *Trends Neurosci.*, vol. 28, no. 3, pp. 152–157, 2005.
- [3] DIN, DIN V 5031-100 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. 2009, pp. 1–16.
- [4] CIE, CIE TN 003:2015: Technical Note – Report on the first International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013. Wien, 2015, pp. 1–35.
- [5] DIN, DIN SPEC 67600: 2013-04: Biologisch wirksame Beleuchtung – Planungsempfehlungen. Deutschland, 2013, pp. 1–68.
- [6] P. Dehoff, D. Fischer, D. Gall, J. Hesse, T. Müller: Das UGR-Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen, Berlin, 2004.
- [7] SN EN 12464-1:2013: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. 2003, pp. 1–39.
- [8] W. Witting: Licht. Sehen. Gestalten., Birkhäuser Verlag, 2014.
- [9] DIN, DIN 5035-3:2006: Beleuchtung mit künstlichem Licht – Teil 3: Beleuchtung im Gesundheitswesen. Deutschland, 2006, pp. 1–23.
- [10] C. Cajochen, K. Kräuchi, A. Wirz-Justice: Role of Melatonin in the Regulation of Human Circadian Rhythms and Sleep, *Journal Neuroendocrinology.*, vol. 15, pp. 432–437, 2003.
- [11] C. A. Czeisler, J. F. Duffy, T. L. Shanahan, E. N. Brown, J. F. Mitchell, D. W. Rimmer, J. M. Ronda, E. J. Silva, J. S. Allan, J. S. Emens, D. Derk-Jan, R. E. Kronauer: Stability, Precision, and Near-24-Hour-Period of the Human Circadian Pacemaker, *Science* (80- ), vol. 284, pp. 2177–2181, 1999.
- [12] G. C. Brainard, et al.: Action Spectrum für Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, *Journal Neuroscience.*, vol. 21, no. 16, pp. 6405–6412, 2001.
- [13] K. Thapan: An action Spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod non-cone photoreceptor system in humans, *Journal Physiology.*, vol. 535, no. 1, pp. 261–267, 2001.
- [14] D. Gall: Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung, in *Handbuch für Beleuchtung*, Ecomed Sicherheit, 2003, p. 22. Erg.-Lfg 12/03.
- [15] C. Cajochen: Alerting effects of light, *Sleep Med. Rev.*, vol. 11, pp. 453–464, 2007.
- [16] R. J. Lucas, S. N. Peirson, D. M. Berson, T. M. Brown, H. M. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O'Hagan, L. L. Price, I. Provencio, D. J. Skene, G. C. Brainard: Measuring and using light in the melanopsin age., *Trends Neuroscience.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2014. ■

*Weitere Informationen:*

*Autorin: Dr.-Ing. Caroline Hoffmann, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, Muttenz (CH), [www.fhnw.ch/habg/iebau](http://www.fhnw.ch/habg/iebau)*

*Folgende Partner waren am Projekt beteiligt: Universitäre Altersmedizin, Felix Platter-Spital, Basel (CH); Derungs Licht AG, vertreten durch Waldmann Lichttechnik GmbH; Osram AG; RD Leuchten AG; Trilux GmbH & Co. KG*

*Projektförderung: Das Projekt ist gefördert worden von der Age-Stiftung, Kirchgasse 42, 8001 Zürich (CH)*

*Dank für externe fachliche Beratung geht an:*

*Prof. Dr. Anna Wirz-Justice, Zentrum für Chronobiologie, Universitäre Psychiatrische Kliniken Basel (CH)*

*PD Dr. Mirjam Münch, Charité Universitätsmedizin, Institut für Physiologie, Berlin*

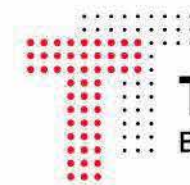
*Weitere Informationen und eine Kurzfassung des Schlussberichtes finden sich unter: [www.age-stiftung.ch/foerderprojekt/circadiane-beleuchtung-beleuchtungssysteme-im-vergleich](http://www.age-stiftung.ch/foerderprojekt/circadiane-beleuchtung-beleuchtungssysteme-im-vergleich)*

Anzeige

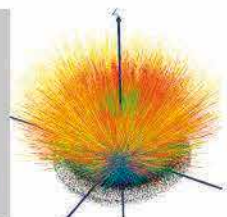
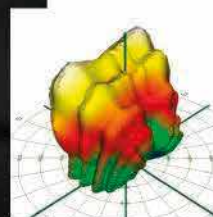
- Bildauflösende CCD-Messtechnik
- Vollständige Beschreibung der Lichtausstrahlungscharakteristik durch Strahlendaten und LVK
- Unterstützung aller gängigen Formate (LDT, IES, RAY, DIS, ...)
- Messobjektgrößen: bis 50mm; 300 mm; 2000 mm (modellabhängig)
- Messung in Gebrauchslage möglich (Typ-C Goniometer)
- Kompakte Bauweise

801  
**RIGO**

**NAHFELD  
GONIOPHOTOMETER**



**TechnoTeam**  
Bildverarbeitung GmbH



Werner-von-Siemens-Straße 5 | D-98693 Ilmenau  
Tel. +49 (0) 3677 - 46 24 0 | Fax +49 (0) 3677 - 46 24 10  
[www.TechnoTeam.de](http://www.TechnoTeam.de) | [info@TechnoTeam.de](mailto:info@TechnoTeam.de)