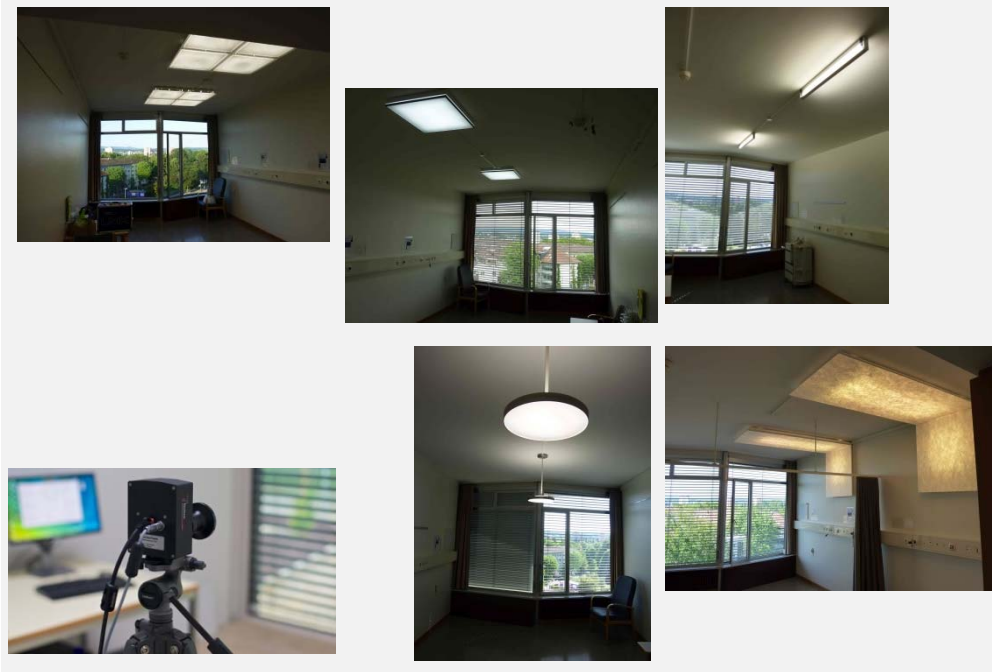
Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Beleuchtungen und ihre nicht-visuellen Wirkungen



Schlussbericht

Dr. Ing. Caroline Hoffmann

Institut für, www.fhnw.ch, info@fhnw.ch
© FHNW

IMPRESSUM

Projektförderung:
Dieser Bericht dokumentiert ein Förderprojekt der Age-Stiftung. Weitere Informationen dazu finden Sie unter www.age-stiftung.ch. Der Bericht ist integraler Bestandteil der Förderung. Die Age-Stiftung legt ihren Fokus auf Wohnen und Älterwerden. Dafür fördert sie Wohn- und Betreuungsangebote in der deutschsprachigen Schweiz mit finanziellen Beiträgen. Sie engagiert sich für inspirierende zukunftsfähige Lösungen und informiert über gute Beispiele.
Age-Stiftung
Kirchgasse 42
CH-8001 Zürich

Partnerorganisationen:
- Universitäre Altersmedizin, Felix Platter-Spital, Basel
- Derungs Licht AG vertreten durch Firma Waldmann Lichttechnik GmbH
- OSRAM AG
- RD Leuchten AG
- TRILUX GmbH & Co. KG

Projektleitung, Bearbeitung und Bericht:
Dr. Ing. Caroline Hoffmann, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, Muttenz
Caroline.Hoffmann@fhnw.ch

Fachliche Beratung (intern):
- Prof. Dr. Achim Geissler, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, Muttenz
- Dipl. Ing. Beate Weickgenannt, Institut Energie am Bau, Muttenz

Fachliche Beratung (extern):
- Prof. Dr. Anna Wirz-Justice, Professor Emeritus, Zentrum für Chronobiologie, Universitäre psychiatrische Kliniken Basel, (CH)
- PD Dr. Mirjam Münch, Charité Universitätsmedizin Berlin (D), Institut für Physiologie, Arbeitsgruppe Schlaf- und Chronomedizin (Leitung: PD Dr. D. Kunz)

Der ausführliche Schlussbericht kann bei der Autorin angefordert werden: caroline.hoffmann@fhnw.ch

Muttenz, 31. August 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Was ist nicht-visuell wirksame Beleuchtung und wissen wir schon alles darüber?	4
2	Vorgehensweise	8
2.1	Messungen	8
2.2	Temperaturmessungen	11
2.3	Nutzerbefragung	11
2.4	Interviews zu Langzeiterfahrungen	11
3	Ergebnisse	12
3.1	Erkenntnisse aus Planung und Betrieb	12
3.2	Erkenntnisse aus den Messungen und Befragungen	13
3.3	Diskussion	22
4	Anhang	24
4.1	Kurzportraits Beleuchtungslösungen mit nicht-visueller Wirkung	24
4.2	Technische Angaben Leuchten	30
4.3	Gemessene Grössen und verwendete Messtechnik	32
4.4	Projektbeispiele mit nicht-visuell wirksamen Beleuchtungsanlagen	34
4.5	Formelzeichen	36
4.6	Bezeichnungen und Abkürzungen	37
4.7	Literatur	39

1 Was ist nicht-visuell wirksame Beleuchtung und wissen wir schon alles darüber?

Wenn es um elektrische Beleuchtung im Bereich 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 im Tagesverlauf den Tag- Nachtrhythmus unterstützen und damit einen gesundheitsfördernden Einfluss haben. Die Beleuchtungen sind damit also auch nicht-visuell wirksam (Begriffserklärung siehe Infobox 1).
Die nicht-visuelle Wirkung des Lichts ist ein integraler Zeitgeber für die menschliche Physis und Psyche. In der Lichtplanung ist Licht daher nicht nur unter dem Aspekt 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, viele der vorhandenen Studien im Bereich nicht-visuell wirksame Beleuchtung konzentrieren sich auf die physiologischen Aspekte und den medizinischen Nutzen. Speziell die Übertragung der Erkenntnisse in die Praxis ist jedoch noch mit einigen Unsicherheiten behaftet. Daher ist es umso wichtiger, die nicht-visuelle Wirkung besser zu verstehen und auch zu untersuchen, wie sie (derzeit) technisch umgesetzt wird. Dies bedeutet zum Beispiel zu messen welche lichttechnischen Eigenschaften diese Beleuchtungen im Tagesverlauf aufweisen. Für die Verwendung der Leuchten im Bauprojekt ist es wiederum von Interesse welche technischen Eigenschaften die Leuchten haben und ob sie zuverlässig funktionieren.
Zentrales Anliegen dieses Projektes ist es zu klären, was sich technisch hinter den nicht-visuell wirksamen Beleuchtungen verbirgt und wie die praktischen Einsatzbedingungen für eine solche Beleuchtung sind. Denn nicht nur der medizinische Nutzen einer solchen Beleuchtung ist entscheidend für ihre Tauglichkeit vor Ort, sondern auch die lichttechnischen Aspekte sind zu beachten. Zu Projektbeginn stellten sich die folgenden Fragen:

- Wie sind die Leuchten programmiert und gibt es Unterschiede in der Programmierung?
- Wie lässt sich die nicht-visuelle Wirkung messen?
- Wie verändern die einzelnen Leuchten die Farbwiedergabe im Raum?
- Werden die Patienten geblendet?
- Erreicht die Beleuchtung die vorgeschriebenen Beleuchtungsstärken?
- Haben die Leuchtmittel eine erhöhte Wärmeabgabe?

- Wie hoch ist der Elektrizitätsbedarf der Beleuchtungslösung?
- Wie hoch sind der Unterhaltsaufwand und die Anschaffungskosten der Beleuchtungslösung?
- Welchen Einfluss haben Installation und Bedienung auf die Anwendungstauglichkeit in der Praxis?

Um diese Fragen zu beantworten sollten idealerweise mehrere Leuchten miteinander verglichen werden und dies möglichst unter realen Bedingungen, also nicht im Labor.
Das Felix Platter-Spital Basel ist ein Zentrum für die stationäre und ambulante Universitäre Altersmedizin. Für dieses Zentrum ist ein Neubau geplant (Fertigstellung: 2018). In den Räumlichkeiten der jetzigen Universitären Altersmedizin gab es die Möglichkeit, innovative Beleuchtungskonzepte für den Neubau auszuprobieren. Es entstand die Idee, neu am Markt erhältliche Beleuchtungslösungen mit nicht-visueller Wirkung im bestehenden Gebäude zu testen und damit die Grundlagen für den Einsatz einer dieser Beleuchtungen im Neubau zu schaffen.
Insgesamt wurden fünf unterschiedliche Beleuchtungslösungen mit nicht-visueller Wirkung messtechnisch untersucht und miteinander verglichen. Jede Beleuchtungslösung war in einem Zweibett-Patientenzimmer an der Universitären Altersmedizin am Felix Platter-Spital in Basel (FPS) installiert. Die baugleichen Räume (**Abb. 1**) gewährleisten eine gute Vergleichbarkeit unter realistischen Einsatzbedingungen.

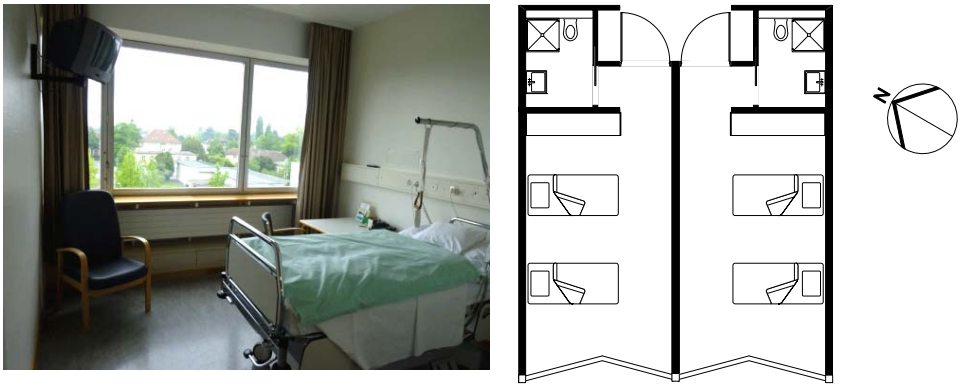


Abb. 1 links: Typisches Zweibettzimmer; rechts: Plan von zwei Zweibettzimmern am FPS. Die Zimmer befinden sich auf dem 6. und 7. OG

Jede der untersuchten Beleuchtungslösungen (**Abb. 3**) besteht aus 2, 4 oder 8 Leuchten. Alle Leuchten werden mit LED als Leuchtmittel betrieben. Es nahmen vier Firmen mit den folgenden Leuchten teil:

- "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

Ziel des Projektes ist es also, den Fokus auf die praktischen Seiten beim Einsatz einer nicht-visuell wirksamen Beleuchtung zu richten. Die Analyse der Leuchten beinhaltet als Schwerpunkt lichttechnische Messungen zum Tagesverlauf der Beleuchtung. Einen weiteren Baustein der Studie bilden Befragungen zur Nutzerzufriedenheit mit der Beleuchtung und mit der Bedienung. Ergänzt werden die eigenen Messungen und Befragungen durch Interviews zu Langzeiterfahrungen in anderen Alten- und Pflegeheimen, die über eine nicht-visuell wirksame Beleuchtungsanlage verfügen. Physiologische Messungen am Patienten sind nicht Gegenstand dieses Projektes.

Infobox 1: Was ist die nicht-visuelle Wirkung von Licht?

Der Tag-Nacht-Rhythmus des Menschen wird durch äussere Zeitgeber wie Bewegung und Essen, aber vor allem durch (Tages-)Licht beeinflusst. Gerade im Spital ist davon auszugehen, dass einige dieser äusseren Zeitgeber durch den anderen 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.
Doch was bedeutet dieser Begriff? Licht dient zur Aufnahme von visuellen Reizen und unterstützt daher 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 (circa <*lat.*>: ungefähr; dies <*lat.*>: Tag) Rhythmus verändern. Die für das Sehen verantwortlichen Photorezeptoren im Auge sind die Zapfen (Tagsehen) und Stäbchen (Nachtsehen). Einer weiteren Rezeptorart werden nichtvisuelle Funktionen zugeschrieben [1]. Diese Zellen 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 drei Rezeptor-Systeme 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-Wachzyklus, einen Einfluss haben, aber nicht unmittelbar mit dem Sehen zusammenhängen. Die nicht-visuellen Lichtwirkungen variieren mit der Tageszeit und der Quantität bzw. der Qualität einer Beleuchtung. Bei einer elektrischen Beleuchtung wird dies technisch umgesetzt, indem sich die Farbtemperatur und eventuell die Beleuchtungsstärke im Verlauf des Tages verändern.

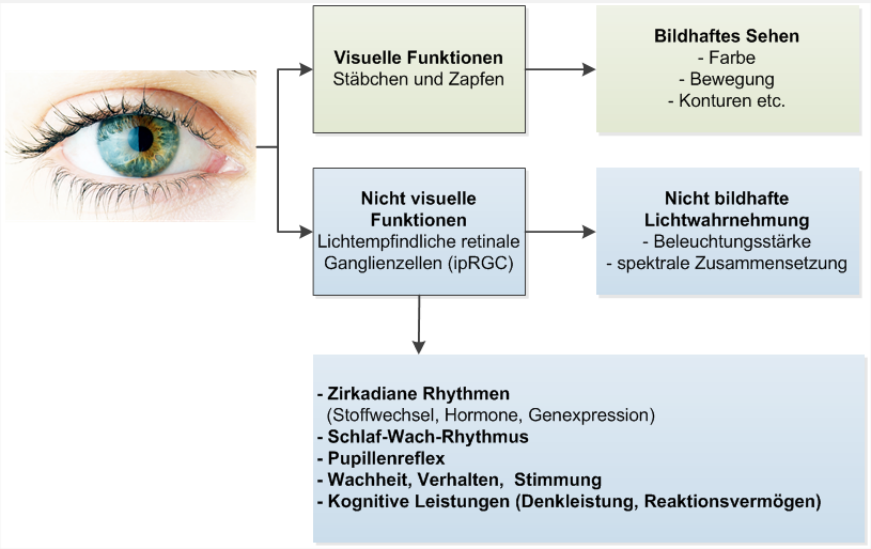


Abb. 2 Schematische Darstellung der wesentlichen visuellen und nicht visuellen Funktionen beim Menschen (inhaltlich entnommen aus [3])

"Vivaa"
Firma Derungs/Waldmann

"Vanera"
Firma Derungs/Waldmann

"Mira LED"
Firma OSRAM AG

"RD Spezial"
Firma RD Leuchten AG

"BelvisioAct D"
Firma TRILUX GmbH & Co KG

Leuchte Bestand
kein programmierter Tageverlauf

Abb. 3 Neu installierte Leuchten und bestehende Leuchte

2 Vorgehensweise

Im Rahmen des Projektes werden fünf unterschiedliche Beleuchtungssysteme analysiert, die allesamt eine nicht-visuelle Wirkung aufweisen. Der Vergleich wird zum einen durch lichttechnische Messungen angestellt, zum anderen über eine Befragung der Ärzte, Pflegefachkräfte und Therapeuten mittels Fragebogen. Ergänzt wird die Untersuchung durch Interviews zu Langzeiterfahrungen in anderen Alten- und Pflegeheimen, die über eine nicht-visuell wirksame Beleuchtungsanlage verfügen. Einen Überblick über den zeitlichen Ablauf gibt **Abb. 4**.

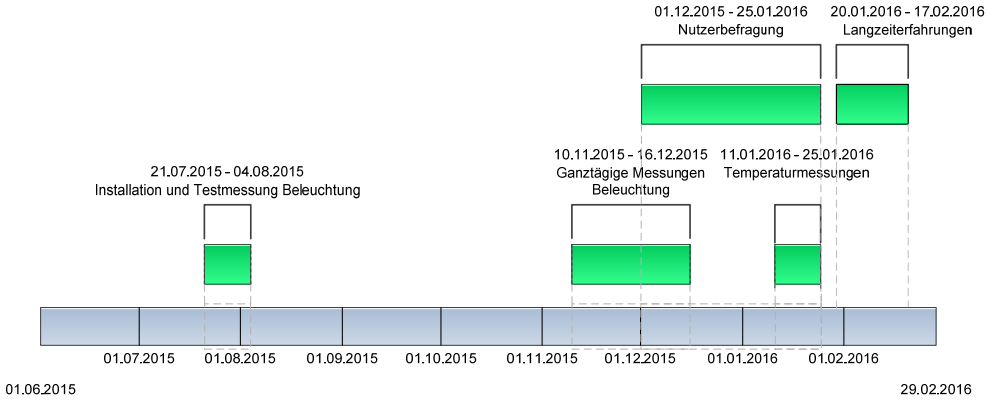


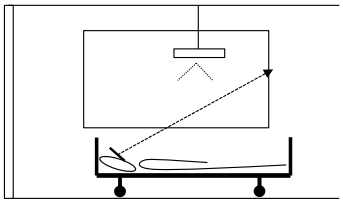
Abb. 4 Zeitverlauf Installation, Messungen und Befragungen

2.1 Messungen

Bei den tageweisen Messungen werden lichttechnische Grössen, wie Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte, ähnlichste Farbtemperatur und Blendung stündlich aufgezeichnet. Weiter wird die nicht-visuelle Wirkung der Beleuchtung im Tagesverlauf durch die Messung geeigneter Grössen ermittelt. Die gemessenen Positionen geben den Blickwinkel der Patienten und den der Pflege wieder (**Abb. 5**). Aus dieser Position werden die lichttechnischen Grössen auf der vertikalen Ebene der Augenhornhaut (corneal nicht retinal) erfasst.

Die Programmierung der Leuchten beruht auf den Einstellungen der Hersteller und wurde im Projektverlauf nicht verändert. Neben dem Tagesverlauf gibt es eine spezielle Einstellung für Pflegetätigkeiten. Sie ist in der Regel etwas heller als das sonstige Beleuchtungsniveau.
Angaben zu den technischen Eigenschaften und zur Bedienung der Leuchten finden sich im Abschnitt 4.2.

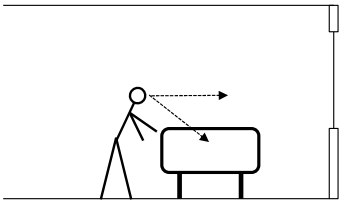
Blickwinkel Patient



Position Messgerät:
- Ebene Augenhornhaut
- Blickachse: 25° nach oben (Blickrichtung Wand / Decke)
- Höhe: 110 cm [4]

Ausgewertete Region:
Reflexionsnormal an Wand

Blickwinkel Pflege



Position Messgerät:
- Ebene Augenhornhaut Pflegeperson
- Blickachse: 30° nach unten
- Höhe: 150 cm (Annahme leicht gebeugte Haltung)

Ausgewertete Region:
Reflexionsnormal auf 85 cm Höhe

Abb. 5 Die häufigsten Messpositionen für die lichttechnischen Messungen

Messung und Bewertung nicht-visuelle Wirkung von Licht

Die nicht-visuelle Wirkung der Beleuchtung wird immer auf Basis von spektralen Daten (380-780 nm) gemessen. Allerdings gibt es Unterschiede hinsichtlich der weitergehenden Berechnung. Im vorliegenden Forschungsprojekt arbeiten wir mit zwei Bewertungssystematiken, die in der Infobox 2 erläutert werden.

1. Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht $a_{ms\,v}$ (-)
2. Effektive Bestrahlungsstärke bezogen auf die Photorezeptoren des menschlichen Auges $E_{e,sc}$, $E_{e,mc}$, $E_{e,lc}$, $E_{e,z}$ und $E_{e,r}$

Eine abschliessende Beurteilung der programmierten Tagesverläufe der elektrischen Beleuchtung ist nur mit Einschränkungen möglich. Dies liegt daran, dass die Forschung im 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 im Ergebnisteil der programmierte Verlauf der elektrischen Beleuchtung mit definierten Zeitpunkten im Verlauf des Tages verglichen.

Berücksichtigung Alterung des Auges

Wie andere Organe auch, verändert sich das Auge im Alter. Bezogen auf die Auswertungen der Messungen in diesem Projekt sind speziell zwei Bereiche von der Alterung des Auges betroffen. Diese sind das Beleuchtungsstärkeniveau und die nicht-visuelle Wirkung von Licht. Das Beleuchtungsstärkeniveau für Ältere muss um bestimmte, normativ vorgegebene, Faktoren erhöht werden [5]. Die gemessene nicht-visuelle Wirkung von

Infobox 2: Wie kann die nicht-visuelle Wirkung gemessen werden?

Ein erster, älterer Bewertungsvorschlag für die nicht-visuelle Wirkung setzt beim Melatonin an. Dieses Hormon hat als Hauptfunktion die Auslösung körpereigener Prozesse, die nachts stattfinden. Beim Menschen ist die bekannteste Funktion die Einleitung von Schlaf und das Senken der Körpertemperatur [8]. Melatonin hat - wie viele andere Hormone auch - einen circadianen Zeitverlauf. Es weist nachts einen hohen Spiegel 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 [9]. Im natürlichen Verlauf hat das Tageslicht die Funktion einer Feinjustierung dieser circadianen Rhythmik. Sind wir nachts Licht ausgesetzt, wird die Melatoninproduktion unterdrückt. Den Vorgang der Feinjustierung und den der Melatoninsuppression kann man sich - vereinfacht - wie folgt vorstellen:
Ob Licht vorhanden ist oder nicht, "erfährt" die Zirbeldrüse *(<lat.>*: glandula pinealis) über Photorezeptoren in der Netzhaut des Auges. Nehmen die Photorezeptoren Lichtreize wahr, übermitteln sie dies an die suprachiasmatischen Kerne (SCN), die im Hypothalamus (einem Teil des Zwischenhirns) liegen. Die SCN spielen eine wichtige Rolle für die Regulation der inneren Uhr. Von ihnen aus gelangt die Information über das Licht über weitere Stationen schließlich bis zur Zirbeldrüse, die daraufhin je nach gemeldetem Status entweder vermehrt Melatonin ausschüttet oder weniger freisetzt. Die Rückkopplung an die SCN erfolgt über Melatoninrezeptoren, die Informationen über die Menge des zirkulierenden Melatonins geben [8]. Der Wechsel von Licht und Melatonin ist eine wichtige Zeitgeberfunktion für die Synchronisierung.
Besonders wirksam für die Melatoninsuppression beim Menschen hat sich zunächst kurzwelliges Licht mit einem hohen Blauanteil erwiesen [10], [11]. Um nun das Licht und seine spektrale Zusammensetzung in Bezug auf das Melatonin bewerten zu können, wurde ein Aktionsspektrum für die Melatoninsuppression festgelegt. Das Aktionsspektrum basiert auf Werten für die Melatoninsuppression nachts bei einzelnen Wellenlängen, welche die Neurologen G. C. Brainard und K. Thapan in ihren Forschungsarbeiten [10], [11] gemessen hatten. In diese Werte wurde eine mittlere Kurve gelegt und im kurzwelligen Bereich durch die Transmissionskurve des menschlichen Auges vervollständigt [12]. Die Kurve [$s_{ms}(\lambda)$] hat ihr Maximum bei 450 nm und 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. Die Forschung zeigt, dass polychromatisches Licht sogar noch wirksamer bei der Melatoninsuppression sein kann als monochromatisches Licht (479 nm) [13]. Der wichtigste Punkt der Kritik ist aber, dass neuere Erkenntnisse zeigen, dass sich die nicht-visuelle Wirkung von Licht nicht ausschliesslich auf die Melatoninproduktion reduzieren lässt [14].
Der Faktor, nach dem bewertet wird heisst Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht $a_{ms\,v}$ [6], teilweise findet man in der älteren Literatur auch den Begriff "circadianer Wirkungsfaktor" [12].

Der zweite, aktuellere Bewertungsvorschlag 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 [15]. Obwohl sie von den Aspekten der Wahrnehmung getrennt sind, nehmen auch diese Prozesse ihren Anfang im Auge. Eine zentrale Rolle spielen dabei intrinsisch fotosensitive Photozellen in der Netzhaut des Auges (engl. intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGC), die kein bildhaftes Sehen vermitteln, sondern ausschliesslich der Lichtdetektion dienen [1]. Das Photopigment der ipRGC ist das 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 (Pp.): Photopsin (sc), als Pp. für die Blau-Zapfen, Photopsin (mc) als Pp. bei den Grün-Zapfen, Photopsin (lc) als Pp. bei den Rot-Zapfen und Rhodopsin als Pp. bei den Stäbchen. Die Betrachtung des nicht-visuellen Photorezeptor-Systems schliesst also alle fünf Photopigmente mit ein. Die spektrale Empfindlichkeit der Rezeptoren unterscheidet sich und weist ihr Maximum an unterschiedlichen Stellen im Bereich der sichtbaren Wellenlängen auf [7]. 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 [15]. Um die Grösse des Reizes auf die Rezeptoren bewerten zu können, wird bezogen auf das Photopigment die wirksame Bestrahlungsstärke $E_{e,\alpha}$ ($E_{e,sc}$, $E_{e,mc}$, $E_{e,lc}$, $E_{e,z}$ und $E_{e,r}$) ausgegeben [7]. Dazu werden die gemessenen Werte der Bestrahlungsstärke (380-780 nm) mit der Wichtungsfunktion für das entsprechende Photopigment bewertet.
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 [7]. Es kann höchstens gesagt werden, dass die ausgewerteten Grössen einen wichtigen Einfluss auf die nicht-visuellen Reaktionen haben.

Licht reduziert sich um definierte Faktoren. Die im Ergebnisteil ausgewiesenen Werte sind immer mit den entsprechenden Faktoren für Personen > 70 Jahre gem. [6] und [7] reduziert.

Messung von Blendung

Blendung wird durch Flächen zu hoher Leuchtdichte oder durch zu große Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld eines Beobachters hervorgerufen. Wird Blendung als merkbar/unangenehm bis störend empfunden, spricht man von psychologischer Blendung [16], die durch das UGR-Verfahren gemäss [16] und [17] bestimmt werden kann (UGR engl. Unified Glare Rating = Vereinheitlichtes Blendungsbewertungsverfahren). Geringe Werte von < 10 bedeuten "keine Blendung", Werte von > 28 bedeuten "untolerierbare Blendung" [18]. Für Bettenzimmer sollte der UGR nicht höher als 19 sein [4]. Dies entspricht einer "unangenehmen Blendung" [18]. Da beim UGR-Wert auch die Position des Betrachters berücksichtigt wird, ist der Blendwert keine Eigenschaft einer Leuchte an sich, sondern immer in Bezug auf eine bestimmte Beobachterposition zu sehen. Entwickelt wurde das UGR-Verfahren für Arbeitsplätze [16] und hier für eine stehende oder sitzenden Beobachterposition. Ist in Krankenzimmern, für die der UGR-Wert auch gilt, eine Deckenleuchte installiert, ist die Leuchte durch die liegende Position des Patienten immer im Blickfeld, was in der Regel zu einer Überschreitung der Anforderungen führt.

2.2 Temperaturmessungen

Da bei der Planung des Projektes nicht bekannt war, mit welchen Leuchtmitteln die Leuchten ausgestattet sind, wurde über die Messung der Raumtemperatur untersucht, ob die Leuchten Wärme abgeben.

2.3 Nutzerbefragung

Die schriftliche Nutzerbefragung richtet sich an Pflegefachkräfte, TherapeutInnen sowie Ärzte und Ärztinnen. Es wird um eine Beurteilung der elektrischen Beleuchtung durch die Mitarbeiter und um ein Urteil aus der Perspektive der Patienten gebeten. In der Befragungskonzeption ist es möglich und zulässig, dass eine Person mehrere Leuchten bewertet. Bedingt durch die Belegung der Zimmer ist pro Leuchte die Anzahl der abgegebenen Bewertungen unterschiedlich. "Mira LED": 5; "BelvisioAct D": 5; "RD Spezial": 4; "Vanera" und "Vivaa": 12.

2.4 Interviews zu Langzeiterfahrungen

In den letzten 10 Jahren wurden im Bereich der Altersmedizin und -pflege einige Gebäude mit einer nicht-visuell wirksamen Beleuchtung ausgestattet. Mit sechs Trägerschaften, bzw. Betreibern kamen Interviews per Telefon oder Mail zustande.

3 Ergebnisse

3.1 Erkenntnisse aus Planung und Betrieb

Aus der Installation, dem Betrieb, der Messung der Leuchten und der Nutzerbefragung lassen sich Antworten auf die zu Projektbeginn gestellten Fragen ableiten. Diese werden als praktische Erkenntnisse den detaillierten Mess- und Befragungsresultaten vorangestellt.

Planung

- Einfluss Bedienung auf die Anwendungstauglichkeit
  Der Einfluss der Bedienung auf die Anwendungstauglichkeit in der Praxis ist hoch. Es zeigte sich im Projekt selber und auch in den Interviews zur 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. Weitere Hinweise hierzu finden sich in Kapitel 3.2, ab 20 ff.).
- Blendung der Patienten
  Die Messung der Blendung zeigt, dass die Position der Leuchte an der Decke ungünstig ist und die Patienten durch die Beleuchtung geblendet werden. In der Nutzerbefragung ist die Blendung allerdings nur "selten" bis "manchmal" ein Problem.
  Lichtplanerisch sind Lösungen, bei denen sich die Leuchte ausserhalb des Blickfeldes der Patienten befindet zu bevorzugen.
- Zuverlässigkeit Programmierung allgemein
  Die Leuchten lassen sich entsprechend den Planungsvorgaben bezüglich Farbtemperatur und Helligkeit programmieren. Die gemessenen Tagesverläufe entsprechen den programmierten Verläufen.
- Anschaffungskosten
  Eine Aussage zu den Anschaffungskosten ist schwierig, weil die Kosten je nach Auftragsvolumen differieren können. Wie sich die Kosten im Vergleich zu einer nichtprogrammierbaren LED-Beleuchtung verhalten wurde im Projekt nicht untersucht. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Kosten für eine nichtvisuell wirksame Beleuchtung in der Regel höher sind.

Installation

- Einfluss Installation auf die Anwendungstauglichkeit:
  Der Einfluss der Installation auf die Anwendungstauglichkeit ist eher gering zu bewerten. Die Installation der Leuchten im Projekt war unproblematisch. Die Leuchten sind in der Regel an die Gebäudeleittechnik angeschlossen.

Betrieb

- Keine Störung durch Beleuchtung
  Die Beleuchtung wurde positiv aufgenommen, es trat keine Störung der Patienten durch die Beleuchtung auf.
- Zuverlässigkeit
  Die Leuchten funktionieren im Projekt zuverlässig.
- Wärmeabgabe durch Leuchten
  Die eingesetzten Leuchten waren alle mit LED als Leuchtmittel ausgestattet. Eine Wärmeabgabe durch die Leuchten gab es daher im Projekt nicht.
- Elektrizitätsbedarf
  Die installierte Leistung ist unterschiedlich hoch, daher streut der (berechnete) Strombedarf stark (von 16.9 kWh/(m^2 a) bis 51,8 kWh/(m^2 a)). Damit ist mit der derzeitigen Programmierung der Strombedarf einiger Leuchten hoch. Dieser liesse sich durch einen Beleuchtungsstärkesensor reduzieren.
- Wartungsaufwand
  Während der Projektdauer (ca. 1 Jahr) waren an der Beleuchtung keine Wartungsarbeiten erforderlich. Die Lebensdauer von LED wird von den Herstellern mit 50´000 Stunden angegeben.
- Zuverlässigkeit Programmierung Farbtemperatur
  Die maximale und minimale ähnlichste Farbtemperatur entsprach nicht der Programmierung sondern unterschritt sie jeweils. Es liess sich damit der gesamte Verlauf wie gewünscht programmieren, aber das gesamte Niveau blieb unter den eingestellten Absolutwerten.
- Veränderung Oberflächenfarben
  Der Farbwiedergabeindex hält die normativen Anforderungen ein. Das heisst, dass die Oberflächenfarben im Raum sich durch die Beleuchtung nicht, bzw. kaum verändern.
- Beleuchtungsstärke
  Die vorgeschriebenen Beleuchtungsstärken werden mit der Beleuchtung erreicht. Aus den Interviews zu den Langzeiterfahrungen geht hervor, dass das allgemeine Helligkeitsniveau dann unkritisch ist, wenn es über die Programmierung unkompliziert verändert werden kann.

3.2 Erkenntnisse aus den Messungen und Befragungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messungen und der Nutzerbefragungen am FPS und der Interviews zu den Langzeiterfahrungen zusammengefasst. Bei der daraus resultierenden Beurteilung der jeweiligen Beleuchtungslösung gilt es zu berücksichtigen, dass ein Teil der bewerteten Eigenschaften von der projektspezifischen Programmierung der Leuchte abhängt. Sie könnten bei einem anderen Projekt also verändert werden.

Als Beispiel kann die ähnlichste Farbtemperatur im Tagesverlauf dienen. Systembedingt, d.h. fest ist hingegen das erreichbare Minimum und Maximum der ähnlichsten Farbtemperatur.

Elektrizitätsbedarf (systembedingt und Programmierung)
Bezüglich ihres aus Herstellerangaben berechneten jährlichen Elektrizitätsbedarfs ist die Leuchte "Vivaa" mit 16.9 kWh/(m^2 a) am sparsamsten. Ihr folgen "Vanera" und "BelvisioAct D". Den höchsten Elektrizitätsbedarf haben "Mira LED" mit 51,8 kWh/(m^2 a) und "RD Spezial" mit 42.8 kWh(m^2a). Dieser Bedarf ist sehr hoch. Bei allen Leuchten könnte er durch einen Beleuchtungsstärkesensor reduziert werden.
Die Leuchten-Lichtausbeute beschreibt die Effizienz der Beleuchtung und wird als Quotient aus dem Leuchtenlichtstrom und der aufgenommenen elektrischen Leistung definiert. Auch hier führt "Vivaa" mit 103 lm/W, ihr schliessen sich die Leuchten "BelvisioAct D" (91 lm/W) und "Vanera" (78 lm/W) an.

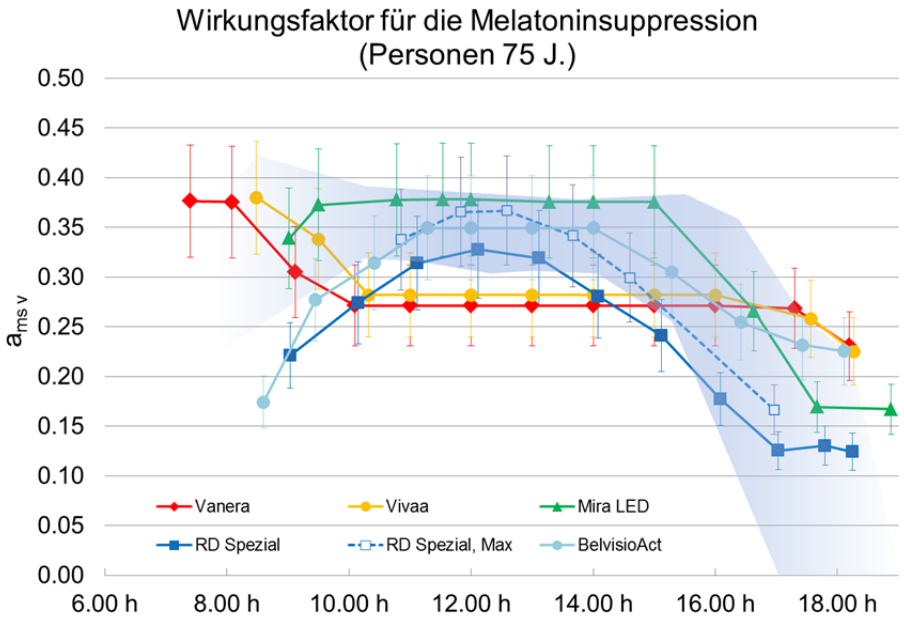
Nicht-visuelle Wirkung (Programmierung)
Messung Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht $a_{ms\,v}$:
Die **Abb. 6** zeigt den Verlauf des $a_{ms\,v}$ -Wertes bei Tageslicht und bei elektrischer Beleuchtung. Der blaue Bereich auf der Grafik zeigt den Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht $a_{ms\,v}$ am Messpunkt "Blickwinkel des Patienten" nur mit Tageslicht (alle Messtage). Die Maximalwerte des dunkelsten und hellsten Messtages liegen zwischen 0.38 und 0.41 (Maximalwert (MW) dunkelster Messtag, mit Standardabweichung Messtag, σ = 0.08, MW hellster Messtag, σ = 0.19). Der $a_{ms\,v}$-Wert aller Leuchten liegt zwischen 0.38 und 0.12. Der Verlauf des Tageslichts weist am Morgen einen eher hohen $a_{ms\,v}$-Wert auf, der bis 10 Uhr ein wenig sinkt dann bis 15 Uhr gleich bleibt (zwischen 0.38 und 0.31) und abends stark abfällt.
Die fünf Leuchten zeigen im Tagesverlauf grob zwei unterschiedliche Verlaufstypen:

Verlauf "1" Höchster Wert morgens, dann konstante Werte zwischen ca. 10:00 Uhr und 16:00 Uhr und abends ein Sinken der Werte ("Vivaa", "Vanera"): Morgens liegt der $a_{ms\,v}$ 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 einem Höhepunkt ("RD Spezial"), oder Plateau mittags ("BelvisioAct D" und "Mira LED"): Bei der Leuchte "BelvisioAct D" dauert das Plateau von 11:17 bis 14 Uhr ($a_{ms\,v}$ bei 0.35) bei der Leuchte "Mira LED" von 9:30 bis 15:00 Uhr ($a_{ms\,v}$ bei 0.38).

Der qualitative Vergleich der elektrischen Beleuchtung mit dem Tageslicht zeigt, dass der Verlauf "1" mit konstanten Werten dem Tageslicht am ähnlichsten ist. Das Niveau des $a_{ms\,v}$ der Leuchten "Vivaa" und "Vanera" wäh-

rend dieser konstanten Periode scheint eher tief. Der 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.



Position Messgerät

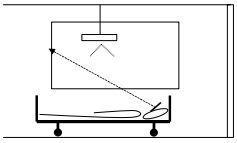


Abb. 6 Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht (Blickwinkel Patient). Die Messpunkte zeigen die elektrische Beleuchtung und die Restbeleuchtung. Der blau markierte Bereich stellt den Bereich der gemessenen Tageslichtverläufe an den fünf Messtagen dar. Als Minderungsfaktor für die Linsentrübung und Pupillengrösse im Abhängigkeit vom Alter wird ein Korrekturfaktor von 0.5 [5] verwendet.
Grösstmögliche Messunsicherheit gemäss Messunsicherheitsanalyse: 15% vom Messwert
Kommentar RD Spezial, Max: Bei der ersten Messung (17.11.2015) wurde versehentlich die Beleuchtung mit einer tief eingestellten Beleuchtungsstärke gemessen ("RD Spezial"). Daher wurden am 16.12.2015 noch einige Messpunkte mit einer hoch eingestellten Beleuchtungsstärke gemessen ("RD Spezial, Max").

<u>Messung effektive Bestrahlungsstärke $E_{e,\alpha}$ bezogen auf die Photorezeptoren des menschlichen Auges:</u>

Zur Interpretation der Verläufe der einzelnen Bestrahlungsstärken ist die Kenntnis der einzelnen Spektren hilfreich (Abbildungen siehe "Kurzportraits, Abschnitt 4).

Die Spektren der Leuchten "Vivaa", "Vanera", "BelvisioAct D" und "Mira LED" sind alle sehr ähnlich. Sie weisen zwei Höhepunkt auf: Einen steil an- und absteigenden Peak jeweils im Bereich von ca. 450 nm (Blauanteil). Nach einem Minimum im Bereich von 470-490 nm folgt die zweite Erhebung, die im Bereich zwischen 490 und 780 nm kontinuierlich an- und absteigt. Ihr Maximum liegt je nach Tageszeit zwischen 560 und 630 nm (Grün-/Gelbanteil). Die Leuchte "RD Spezial" weicht davon ab: Es gibt insgesamt drei Höhepunkte: Zwei steile Peaks 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. Der Bereich zwischen den Peaks ist über eine dritte, kontinuierlich an- und absteigende Erhebung abgedeckt.
Die **Abb. 7** zeigt die Verläufe der effektiven Bestrahlungsstärken nur bei Tageslicht und mit elektrischer Beleuchtung.

- Cyanopische Bestrahlungsstärke (Maximum Aktionsspektrum s_{sc} (λ): 440 nm): In diesem Wellenlängenbereich hat keiner der Spektralverläufe der Leuchten sein Maximum. Entsprechend klein sind die Werte über den Tagesverlauf. Auffallend tief sind die Werte von "RD Spezial, Max". Dies liegt daran, dass das Spektrum von "RD Spezial, Max" im Vergleich zu den anderen Leuchten bei 440 nm nochmals tiefere Werte aufweist.
- Melanopische Bestrahlungsstärke (Maximum Aktionsspektrum $s_z(\lambda)$: 490 nm): Es wäre zu erwarten, dass der Verlauf der $E_{e,z}$-Werte jenem der $a_{ms\,v}$-Werte ähnelt (**Abb. 6**), da es auch hier um die Wirkgrösse Melatonin geht. Dem ist allerdings nicht so. Dies erklärt sich dadurch, dass sich die beiden Wichtungsfunktionen ($s_{ms}(\lambda)$ und $s_z(\lambda)$) aus denen $a_{ms\,v}$ 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 $a_{ms\,v}$-Tagesverläufe der Leuchten zeigt, dass sich bei "Vivaa", "Vanera" und "Mira LED" speziell am Morgen Unterschiede ergeben ($a_{ms\,v}$ = morgens höchster Wert (**Abb. 6**), $E_{e,z}$ = tiefer Wert (**Abb. 7**)).
- Rhodopische Bestrahlungsstärke (Maximum Aktionsspektrum $s_r(\lambda)$: 510 nm): Wie bei den anderen Rezeptoren erreicht auch hier die Leuchte "Vanera" insgesamt die höchsten Werte. Morgens und gegen Abend weisen alle Leuchten eher niedrige Werte auf. Auffallend tief sind die Werte von "RD Spezial, Max". Dies lässt sich mit dem spektralen Verlauf erklären, der im Bereich von 510 nm einen Tiefpunkt aufweist.
- Chloropische Bestrahlungsstärke (Maximum Aktionsspektrum $s_{mc}(\lambda)$: 545 nm): Sinngemäss gilt der Kommentar zur rhodopischen Bestrahlungsstärke.
- Erythropische Bestrahlungsstärke (Maximum Aktionsspektrum $s_{lc}(\lambda)$: 570 nm): Sinngemäss gilt der Kommentar zur rhodopischen Bestrahlungsstärke. Der zweite Höhepunkt (620-625 nm) im Spektrum von "RD Spezial, Max" trifft nicht in den Bewertungsbereich der fünf Wichtungsfunktionen (440 nm-510 nm).

Der Vergleich mit reinem Tageslicht im Patientenzimmer an einem sonnigen Tag zeigt, dass sich hier das Maximum der Bestrahlungsstärken $E_{e,\alpha}$ auf unterschiedlichem Niveau mittags um ca. 13:00 Uhr ergibt. Verglichen mit dem Tageslicht ist der Verlauf von "Vivaa", "Vanera", "BelvisioAct D" und "RD Spezial" eher abweichend mit konstanten Werten zwischen ca.

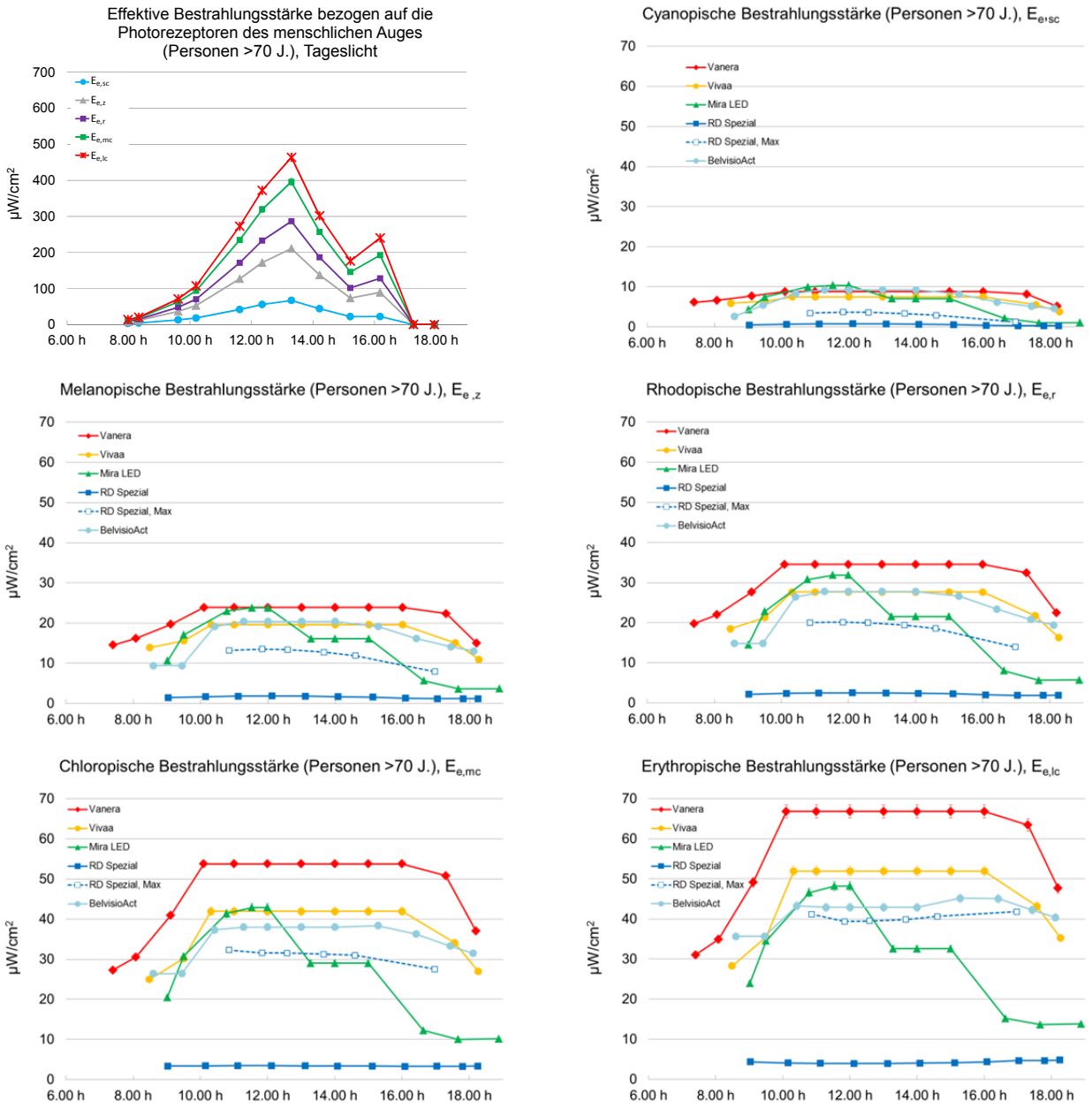


Abb. 7 Messergebnisse effektive Bestrahlungsstärke $E_{e,\alpha}$ bezogen auf die Photorezeptoren des menschlichen Auges (s-Zapfen, m-Zapfen, l-Zapfen, ipRGC und Stäbchen), Blickwinkel Patient. Oben links: Messung nur mit Tageslicht (sonniger Tag, 10.11.2015), andere Grafiken: Messung nur elektrische Beleuchtung mit Restbeleuchtung.
Die Auswertungen werden für Personen >70 Jahre ausgegeben. Gem. [7] werden ausgehend vom 32-jährigen Standardbeobachter die folgenden Minderungsfaktoren 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
Grösstmögliche Messunsicherheit gemäss Messunsicherheitsanalyse: 2.4% vom Messwert
Kommentar RD Spezial, Max: Bei der ersten Messung (17.11.2015) wurde versehentlich die Beleuchtung mit einer tief eingestellten Beleuchtungsstärke gemessen ("RD Spezial"). Daher wurden am 16.12.2015 noch einige Messpunkte mit einer hoch eingestellten Beleuchtungsstärke gemessen ("RD Spezial, Max").

10:00 und 16:00 Uhr. Der Verlauf von "Mira LED" empfindet zumindest ansatzweise einen Höhepunkt mittags nach. Abweichend vom Tageslichtverlauf wird im Spital aber morgens und besonders abends die elektrische Beleuchtung nicht gänzlich reduziert werden. Welche Eigenschaften dieses Licht haben sollte, ist offen.

Eine Aussage darüber, ob sich die nicht-visuelle Wirkung positiv oder negativ auf die Patienten auswirkt, kann aus der Nutzerbefragung FPS nicht abgeleitet werden. 42% der Befragten beantworteten die Frage mit "keine Aussage". Von den übrigen, die eine Antworte geben, meinen zwischen 63 und 100%, es sei keine Wirkung erkennbar.
Bei der Nutzerbefragung Langzeiterfahrungen ist das Urteil (bezogen auf sechs Projekte) gemischt: Bei einem Projekt wird ein positiver Effekt beobachtet, bei drei Projekten sind keine bis wenig überprüfbare Verbesserungen beobachtet worden. In zwei Projekten wird das hohe Helligkeitsniveau als angenehm empfunden.

Helligkeit: Beleuchtungsstärke E_{vert}, E_{horiz} und Leuchtdichte L (Programmierung)

Messung: Die Beleuchtungsstärke wird in Lux (lx) angegeben und ist das Mass für das auf einer Fläche auftretende Licht. Hier wird die vertikale Beleuchtungsstärke gemäss den Messpositionen aus **Abb. 5** ausgewiesen. Bezogen auf die vertikale Beleuchtungsstärke in Krankenzimmern gibt es normativ keine Anforderungen.
Geht man davon aus, dass eine hohe Beleuchtungsstärke tagsüber therapeutisch sinnvoll ist, dann sind die Leuchten "Vanera" (500 lx), "Vivaa" (ca. 380 lx) und "RD Spezial" (ca. 380 lx) am hellsten und damit am wirksamsten.
Die horizontale Beleuchtungsstärke wird auf der Ebene des Bettes erfasst. Die Anforderung an eine "einfache Untersuchung" gemäss DIN 5035-3-2006 300 lx wird von allen Leuchten erfüllt. Für die Patienten selber gibt es Anforderungen an die Lesebeleuchtung. Eine Leseleuchte befindet sich an jedem Patientenbett (war aber nicht Bestandteil der Lichtplanung im Projekt). Gemäss SN EN 12464-1:2013 [17] beträgt die mittlere Beleuchtungsstärke 300 lx auf einer 75° geneigten Leseebene. Korrigiert für Personen ab 75 Jahren gem. [5] sind 660 lx erforderlich. Diese Messung wurde im Projekt nicht vorgenommen.
Die Leuchtdichte L in cd/m^2 ist die einzige fotometrische Grundgrösse, die vom Auge direkt wahrgenommen wird. Auch hier sind die Leuchten "Vanera" (156 cd/m^2), "Vivaa" (ca. 79 cd/m^2) und "RD Spezial" (ca. 79 cd/m^2) am hellsten.

Bei der Nutzerbefragung FPS wird die Leuchte MiraLED von 100% (4 von 4 Antworten) als "zu hell" oder "hell" bewertet. Diese Leuchte wies bei der Messung im Tagesverlauf (E_{vert}) eher geringe Beleuchtungsstärken auf. Bei der Beleuchtungseinstellung für Pflegetätigkeiten wurden bei dieser Leuchte allerdings die höchsten Werte gemessen (E_h ca. 610-940 lx). Auch die Leuchte "Vanera" wird von 92% der Nutzer (11 von 12 Antworten) im Tagesverlauf als "zu hell" oder "hell" bewertet. Aus der Nutzerbefragung Langzeiterfahrungen kann abgeleitet werden, dass das Helligkeitsniveau eher unproblematisch ist, wenn es über die Programmierung verändert werden kann.

Ähnlichste Farbtemperatur

Minimale und maximale ähnlichste Farbtemperatur (systembedingt)

Messung: Um einen Eindruck der Bandbreite jeder Leuchten zu gewinnen wurde die einstellbare minimale und maximale ähnlichste Farbtemperatur gemessen. Besonders bei der maximalen ähnlichsten Farbtemperatur entspricht kein Messergebnis den technischen Angaben. Diese werden immer unterschritten. Die Unterschreitungen liegen zwischen 15 und 21 %. Bei den minimalen ähnlichsten Farbtemperaturen liegen die Unterschreitungen zwischen 4 und 7%. Als mögliche Gründe für diese Abweichungen sind die Abdeckung der Leuchte, technische Einschränkungen und der Reflexionsgrad der Wände anzuführen.

Tagesverlauf (Programmierung)

Messung: Der Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur korreliert mit jenem des Faktors $a_{ms\ v}$. Auch hier ist eine wissenschaftlich fundierte Aussage darüber, wie eine optimale Programmierung aussehen sollte, nicht möglich.

Weiter wurden die gemessenen Tagesverläufe mit den programmierten Verläufen (Ist / Soll) verglichen. Bei fast allen Leuchten (Ausnahme "Mira LED" zwischen 10 und 13 Uhr) entspricht die Programmierung vom Verlauf her den gemessenen Verläufen. Allerdings tritt gerade im Bereich der höheren ähnlichsten Farbtemperaturen eine Unterschreitung der programmierten Farbtemperatur um rund 15% auf.

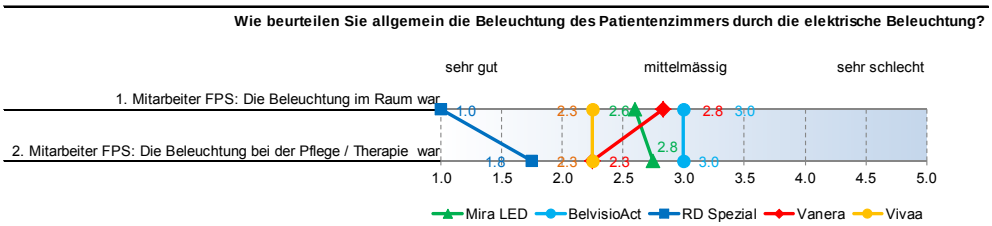
Blendung UGR (Beleuchtungsplanung)

Messung: Alle Leuchten überschreiten aus der Blickposition der Patienten den vorgegebenen Maximalwert für Patientenzimmer (Vorgabe: UGR ≤ 19; Maximale Überschreitung: "Vanera" mit UGR = 29 und minimale Überschreitung; "RD Spezial", Max. mit UGR = 21). Dies liegt an der liegenden Position der Patienten (Blickachse Auge 25°) und daran, dass sich die Leuchte im Blickfeld befindet. Die Rangfolge der einzelnen Leuchten erklärt sich durch die Auswertung der jeweiligen Leuchtdichte der Lichtaustrittsfläche der Leuchte: Die Leuchte mit der höchsten Blendung, "Vanera", weist dort auch die höchste Leuchtdichte auf. Die Leuchte mit der geringsten Blendung, "RD Spezial" (max. Beleuchtungsstärke) hat auch die tiefste Leuchtdichte im Bereich der Lichtaustrittsfläche.
Für den Blickwinkel der Pflege (stehende Position) wird die Vorgabe eingehalten.
In der Nutzerbefragung FPS ist Blendung "selten" bis "manchmal" ein Problem. "Manchmal" oder "häufig" werden nach Auffassung von 42%, bzw. 50% der Befragten die Patienten vom Bett aus durch die Leuchten "Vivaa" (5 von 12 Antworten) und "Vanera" (5 von 10 Antworten) geblendet.
Bei der Nutzerbefragung Langzeiterfahrungen ist Blendung (bis auf ein Projekt) eher unproblematisch.

Farbwiedergabeindex Ra (systembedingt)
Der Farbwiedergabeindex beschreibt die Qualität der Farbwiedergabe einer Lichtquelle. Der ideale Farbwiedergabeindex beträgt 100.
Messung: Die Vorgabe für Patientenzimmer $R_a \geq 80$ [4] wird von allen Leuchten eingehalten. Am besten ist die Leuchte "RD Spezial", mit einem R_a von 90-95. Dies liegt vermutlich an dem zweiten Peak im Rotbereich des Spektrums. Die übrigen Leuchten liegen zwischen $R_a = 80$ und 85. Auch für die Hautfarbe rosa (R13) werden die Vorgaben von allen Leuchten (knapp) erfüllt.

Raumtemperatur
Temperaturmessungen bestätigen, dass die Leuchten die Räume nicht zusätzlich aufheizen.

Bewertung Beleuchtung durch Nutzerbefragungen
Nutzerbefragungen FPS: Der wichtigste Punkt vorweg: eine Störung der Patienten durch die elektrische Beleuchtung trat bei drei Leuchten "Mira LED", "BelvisioAxt D" und "RD Spezial" gemäss 75 - 100 % der Befragten (jeweils 3-4 Antworten) "nie" oder "selten" auf. "Manchmal" traten Störungen durch die Leuchten "Vanera" und "Vivaa" gemäss 63% der Befragten (7 von 11 Antworten), bzw. 40% (4 von 10 Antworten) auf.
Die Beleuchtung der Patientenzimmer wird insgesamt zwischen "sehr gut" ("RD Spezial" und "Vivaa") und "mittelmässig" ("BelvisioAct D") beurteilt (**Abb. 8**). Die Beleuchtung im Raum fanden bei "RD-Spezial" 50% (2 von 4 Antworten) "sehr gut", die Leuchte "BelvisioAct D" fanden 60% "mittelmässig" (3 von 5 Antworten). Von einer grossen Zahl (12 Personen) im Mittel als "gut" bewertet wird die Leuchte "Vivaa". Das Urteil "gut" oder "sehr gut" geben 75% (9 von 12 Antworten) ab.



	Mira LED	BelvisioAct	RD Spezial	Vanera	Vivaa
Anzahl Antworten Frage 1	5	5	4	12	12
Anzahl Antworten Frage 2	4	4	4	12	12

Abb. 8 Mittelwert Beurteilung Beleuchtung Patientenzimmer durch elektrische Beleuchtung. Bei der Auswertung gilt es die z. T. sehr kleine Anzahl der Antworten zu berücksichtigen.

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" ist ein Grund hierfür sicherlich das Touchpanel für die Bedinung (siehe **Tabelle 4**, Kap. 4.2). Bei den anderen Leuchten sind die Gründe nicht ganz klar. Eine Erklärung kann sein, dass der Vergleich zur Be-

standslösung gezogen wird: Dort gibt es einen einzigen Schalter für ein/aus. Es lässt sich die Empfehlung ableiten, dass eine möglichst einfache Lösung vorteilhaft ist.
Auch aus den Nutzerbefragungen Langzeiterfahrungen lässt sich rückschliessen, dass für die Zufriedenheit der Nutzer die Bedienfreundlichkeit wesentlich ist. Dies zeigt sich daran, dass für das Gesamturteil die Leichtigkeit der Handhabung entscheidend ist. Ist z. B. die Steuerung kompliziert wird dies sehr negativ beurteilt und führt dazu, dass die Betreiber das System nicht nochmals wählen würden (2 Projekte). Geduldet wird eine Einregulierungsphase unter der Prämisse, dass diese erfolgreich beendet wird (2 Projekte).
Da ein Teil der Bewertungskriterien der Leuchten von der Programmierung abhängt, sollte diese sorgfältig mit den Nutzern geplant werden.

- Wenige Szenarien (z. B. "nicht-visuell wirksamer Tagesverlauf" und "Pflege")
- Eine spätere Anpassung an Nutzerwünsche ermöglichen und einplanen
- Bedienung so einfach wie möglich
- Bei der Anzahl Szenarien und Beleuchtungsniveaus Nutzer einbeziehen (Pflegepersonal und ev. Bewohner)

Qualitative Bewertung der Beleuchtungslösungen
Für einen Vergleich der Mess- und Untersuchungsergebnisse der fünf Leuchten werden acht lichttechnische Themen definiert, die sich für einen Vergleich eignen (Tabelle 1). Beispielsweise wäre es wenig zielführend eine Rangfolge bezüglich der erreichten Beleuchtungsstärke zu erstellen. Die Themen für den Vergleich sind: 1) Elektrizitätsbedarf, 2) Leuchten-Lichtausbeute, 3) nicht-visuelle Wirkung: Verlauf $a_{ms\ v}$, 4) nicht-visuelle Wirkung: Verlauf Bestrahlungsstärke bezogen auf Photorezeptoren, 5) Blendung, 6) Farbwiedergabe, 7) Nutzerbewertung Beleuchtungssituation (Helligkeit) Kunstlicht und 8) Nutzerbewertung Beleuchtung allgemein.
Innerhalb von jedem Themenbereich wurde jeweils die beste und die schwächste Leuchte ausgewiesen. Die beste Bewertung bekommt einen Punkt. Damit ist die höchste zu erreichende Punktzahl 8. Zwei Leuchten haben – in jeweils unterschiedlichen Bereichen – vier Punkte erreicht (**Abb. 9**).

- Leuchte "Vivaa" im Bereich 1) Elektrizitätsbedarf, 2) Leuchten-Lichtausbeute, 3) nicht-visuelle Wirkung ($a_{ms\ v}$-Wert) und 8) Nutzerbewertung Beleuchtung allgemein (Nutzerbefragung mit 12 Bewertungen)
- Leuchte "RD Spezial" im Bereich 5) Blendung, 6) Farbwiedergabe und 7) Nutzerbewertung Helligkeit und 8) Nutzerbewertung Beleuchtung allgemein (Nutzerbefragung mit 4 Bewertungen)

Tabelle 1 Qualitativer Vergleich der fünf Beleuchtungslösungen hinsichtlich bewertbarer Faktoren. Verwendete Abkürzungen: A = Anzahl Antworten bei Nutzerbefragung, N = Note. Bei Frage 7 entspricht die Note 3 der Bestnote ("gerade richtig"), bei Frage 8 entspricht die Note 1 der Bestnote ("sehr gut")

		Vanera Derungs/ Waldmann	**Vivaa Derungs/ Waldmann**	**Mira LED OSRAM AG**	**RD Spezial RD Leuchten AG**	**BelvisioAct D TRILUX GmbH & Co. KG**
1	Elektrizitätsbedarf		tiefster Bedarf	höchster Bedarf		
2	Leuchten-Lichtausbeute		am höchsten	am tiefsten		
3	Nicht-visuelle Wirkung: Verlauf $a_{ms\,v}$	tageslichtähnlich	tageslichtähnlich			
4	Nicht-visuelle Wirkung: Verlauf Bestrahlungsstärke Photorezeptoren			tageslichtähnlich		
5	Blendung UGR	> UGR-Wert			< UGR-Wert	
6	Farbwiedergabe				> R_a	
7	Nutzerbewertung Beleuchtungssituation (Helligkeit) Kunstlicht im Patientenzimmer Nutzerbefragung	zu hell (12 A, N: 4.3)		zu hell (4 A, N: 4.5)	gerade richtig (4 A, N; 3.3)	gerade richtig (5 A, N: 3.4)
8	Nutzerbewertung Beleuchtung Patientenzimmer allgemein Nutzerbefragung		gut (12 A, N: 2.3)		sehr gut (4 A, N: 1.0)	

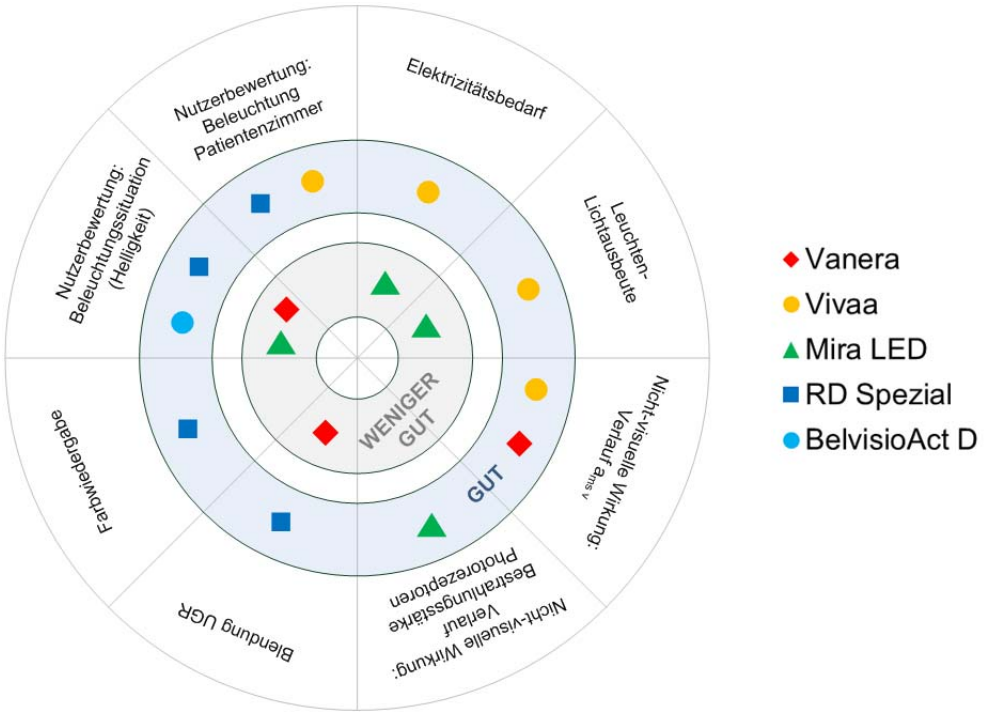


Abb. 9 Zusammenfassung Qualitativer Vergleich der fünf Beleuchtungslösungen hinsichtlich bewertbarer Faktoren

3.3 Diskussion

In diesem Forschungsprojekt ging es darum Beleuchtungen mit nicht-visueller Wirkung von der technisch / praktischen Seite her zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Es ergeben sich Erkenntnisse aus dem Betrieb der Beleuchtungen sowie aus den Messungen und den Befragun-

gen. Im Betrieb der Leuchten zeigt sich, dass die alle zuverlässig funktionieren und gemäss definierten Anforderungen programmierbar sind.
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, die sich deutlich voneinander unterscheiden. Im Idealfall wäre nun eine Aussage darüber wünschenswert, welcher der gemessenen Verläufe für die Patienten am vorteilhaftesten ist. Obwohl es einige Anhaltspunkte gibt, ist nach derzeitiger Kenntnis jedoch ein direkter Rückschluss von den gemessenen Grössen auf die Auswirkungen des Lichts hinsichtlich Gesundheit und Physiologie nicht möglich [7]. Unter der Annahme, dass ein tageslichtähnlicher Verlauf sinnvoll ist, wurde im Projekt ein qualitativer Vergleich gezogen. Als Referenz dient der Tageslichtverlauf an einem sonnigen Tag.

Die nichtvisuelle Wirkung wird anhand von zwei Bewertungsfaktoren ermittelt. Der ältere Faktor, der Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression in der Nacht $a_{ms\,v}$, setzt beim Melatonin an. Der zweite, aktuellere Bewertungsvorschlag wählt einen breiteren Ansatz und bewertet die Grösse des Reizes auf die Rezeptoren im Auge, indem die auf die fünf Photopigmente wirksame Bestrahlungsstärke $E_{e,\alpha}$ ($E_{e,sc}$, $E_{e,mc}$, $E_{e,lc}$, $E_{e,z}$ und $E_{e,r}$) ausgegeben wird.
Die beiden genannten Bewertungsfaktoren können nicht miteinander verglichen werden, da sie unterschiedliche Kenntnisstände in diesem Forschungsbereich repräsentieren. Dies zeigt besonders gut das Beispiel der Melatoninsuppression, für die zwei sich unterscheidende Wirkkurven angenommen werden. Ein Vergleich der elektrischen Beleuchtung mit dem Tageslichtverlauf führt mit beiden Bewertungsfaktoren zu unterschiedlichen Ergebnissen.
Beim Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression $a_{ms\,v}$ 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.

Dass die Überprüfbarkeit der nicht-visuellen Wirkung auf die Patienten schwierig beurteilbar zu sein scheint, geht aus der eigenen Befragung hervor und auch aus den Interviews zu den Langzeiterfahrungen in anderen Projekten. Interessant wären hier die Ergebnisse einer systematischen Literaturstudie zur Wirksamkeit von nicht-visueller Beleuchtung diese ist allerdings nicht Gegenstand dieses Projektes.

Im Sinne der Energieeinsparung wäre es sinnvoll die Leuchten mit Beleuchtungsstärkesensoren auszustatten. Damit ist auch die angesprochene Frage, wie mit einer eventuellen Mittagsruhe der Nutzer umzugehen ist, gelöst: Bei einer normalen Tageslichtversorgung der Räume ist die Beleuchtung mittags ohnehin meist ausgeschaltet.

Auffallend ist, dass alle Leuchten die Blendungsvorgaben überschreiten. Dies liegt am Einsatz von Deckenleuchten. Durch die liegende Position des Patienten ist die Leuchte immer im Blickfeld, was zu einer Überschreitung der Anforderungen führt. Lichtplanerisch spricht dies für Lösungen, bei denen sich die Leuchte ausserhalb des Blickfeldes der Patienten befindet, wie z. B. Wandleuchten.

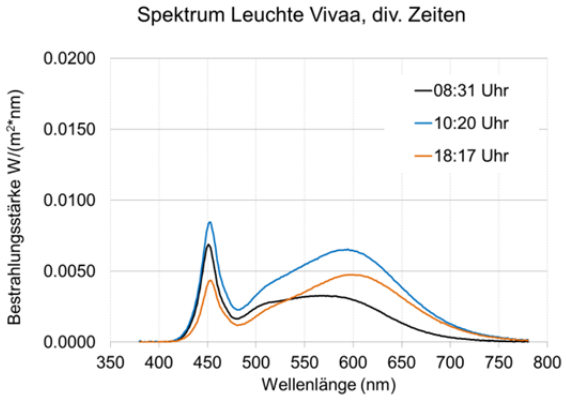
Insgesamt werden die Leuchten im FPS positiv beurteilt. Eine Störung der Patienten durch die elektrische Beleuchtung trat bei drei Leuchten "nie" oder "selten" auf und bei zwei Leuchten "manchmal". Die Beleuchtung der Patientenzimmer wird insgesamt zwischen "sehr gut" und "mittelmässig" beurteilt. Beim praktischen Einsatz spielt die Bedienfreundlichkeit der Beleuchtung eine grosse Rolle. Dies zeigen die Interviews zu Langzeiterfahrungen aus anderen Projekten. Ist die Steuerung leicht handhabbar und lässt sich einfach an die Bedürfnisse anpassen, so fällt das Gesamturteil positiv aus.
Einschränkend muss sowohl zu den Ergebnissen der Befragung als auch zu den Interviews zu Langzeiterfahrungen gesagt werden, dass die Anzahl der Antworten eher klein ist und die Ergebnisse daher allenfalls Tendenzen aufzeigen.

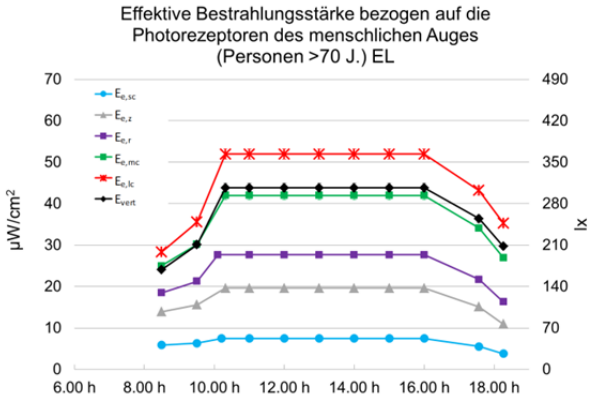
4 Anhang

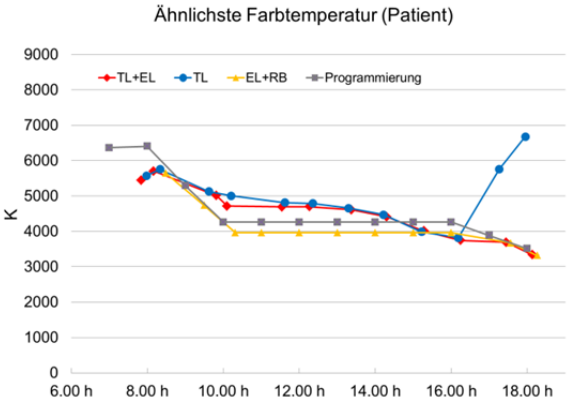
4.1 Kurzportraits Beleuchtungslösungen mit nicht-visueller Wirkung

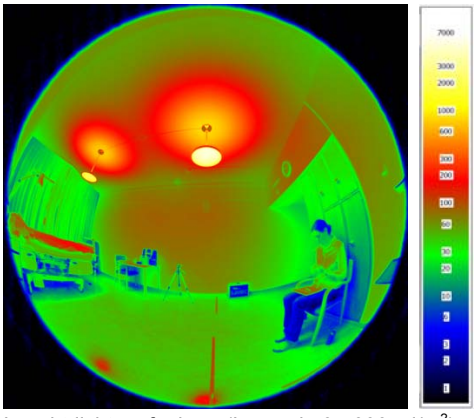
Nachfolgend wird jeder Leuchtentyp mit seinen wesentlichen (gemessenen) Eigenschaften vorgestellt.

Leuchte: Vivaa (Firma Derungs/Waldmann)

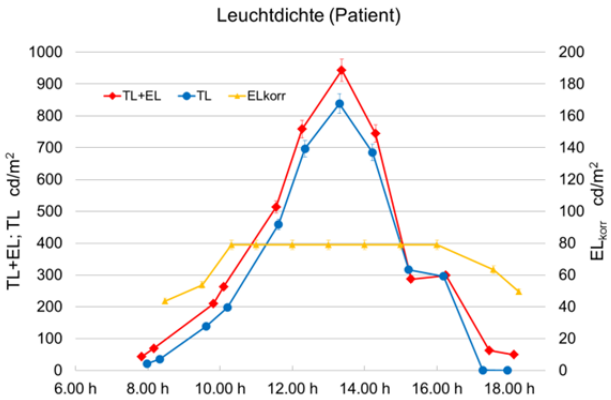


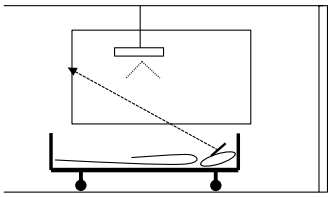






Leuchtdichteaufnahme (Legende 0-7000 cd/m²)

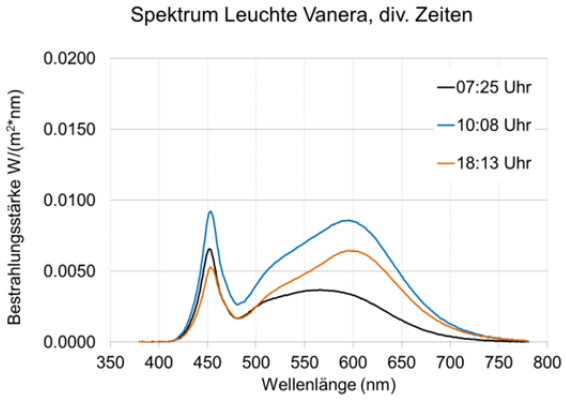


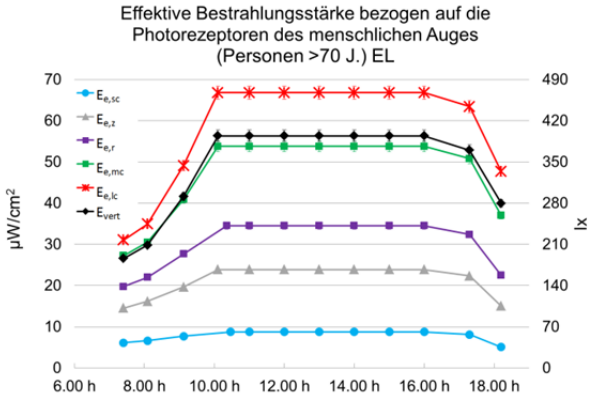


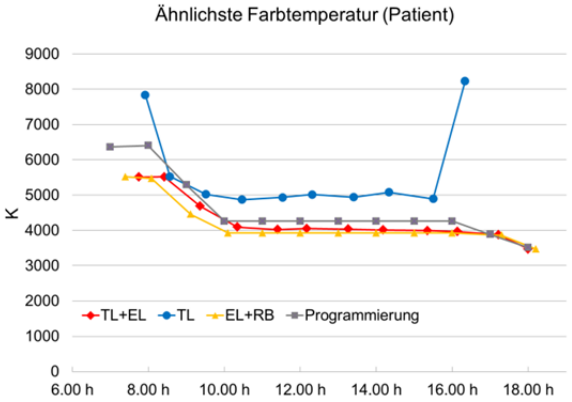
Position Messgerät für alle Messergebnisse dieser Seite

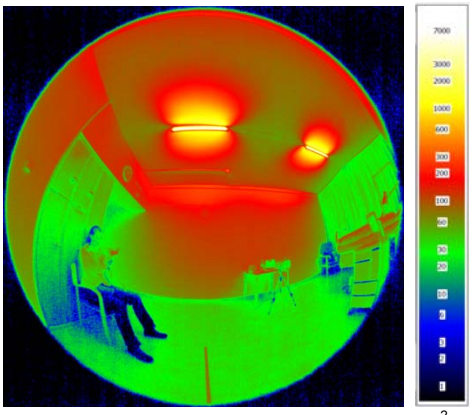
Verwendete Abkürzungen:
EL = Elektrische Beleuchtung
EL_{korr} = korrigierte elektrische Beleuchtung (= Messwert - RB)
TL = Tageslicht,
RB = Restbeleuchtung

Leuchte: Vanera (Firma Derungs/Waldmann)

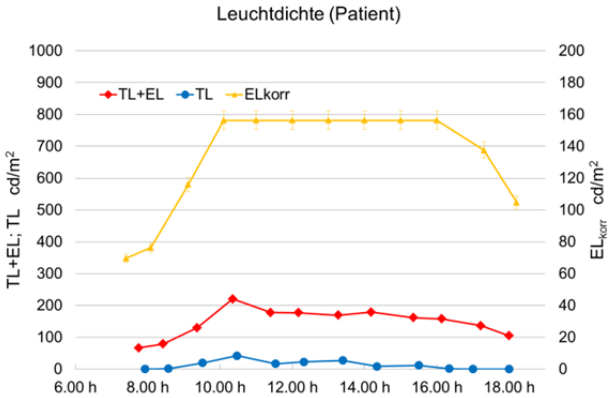


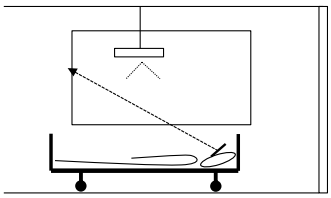






Leuchtdichteaufnahme (Legende 0-7000 cd/m²)

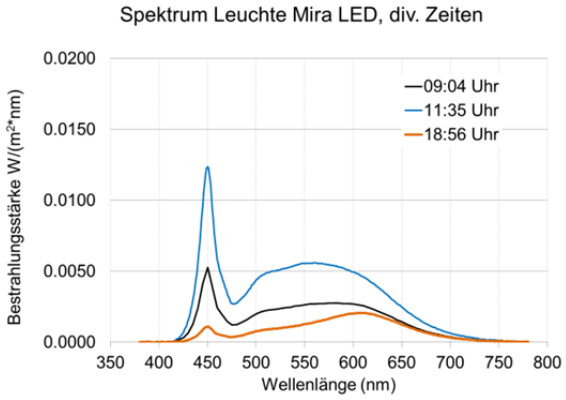


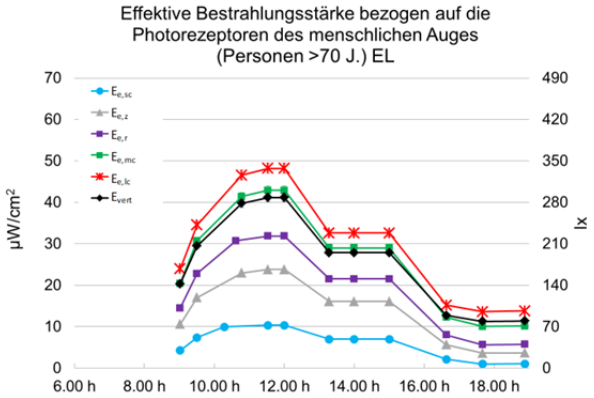


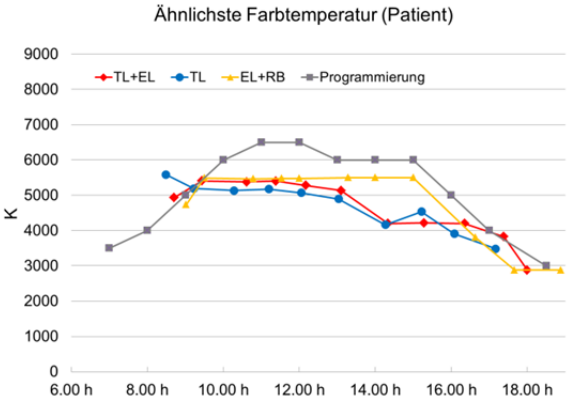
Position Messgerät für alle Messergebnisse dieser Seite

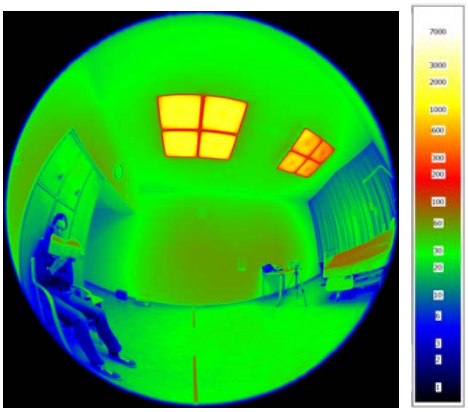
Verwendete Abkürzungen:
EL = Elektrische Beleuchtung
EL_{korr} = korrigierte elektrische Beleuchtung (= Messwert - RB)
TL = Tageslicht,
RB = Restbeleuchtung

Leuchte Mira LED (Firma OSRAM AG)

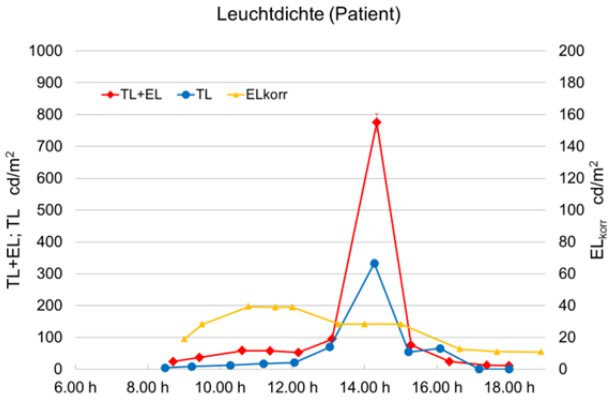


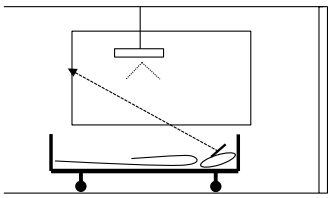






Leuchtdichteaufnahme (Legende 0-7000 cd/m²)

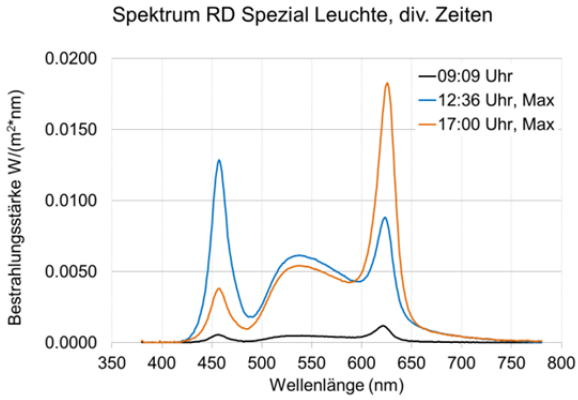


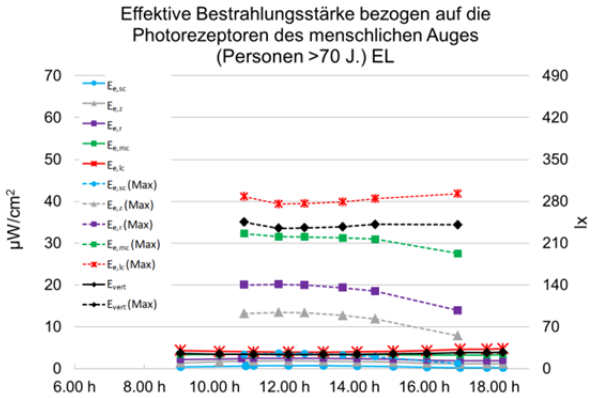


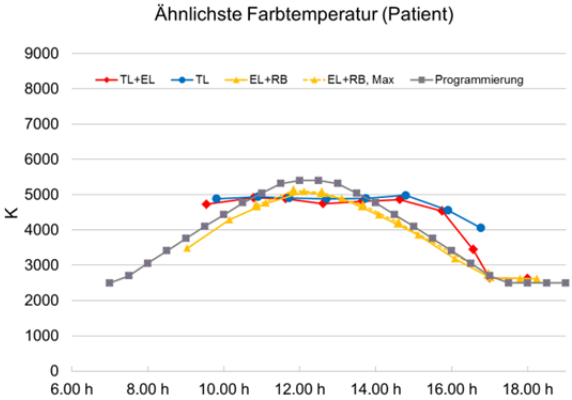
Position Messgerät für alle Messergebnisse dieser Seite

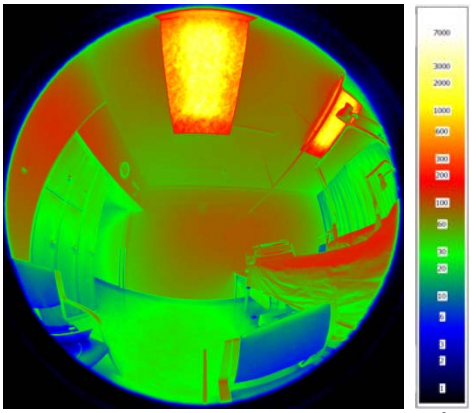
Verwendete Abkürzungen:
EL = Elektrische Beleuchtung
EL_{korr} = korrigierte elektrische Beleuchtung (= Messwert - RB)
TL = Tageslicht,
RB = Restbeleuchtung

Leuchte: RD Spezial (Firma RD Leuchten AG)

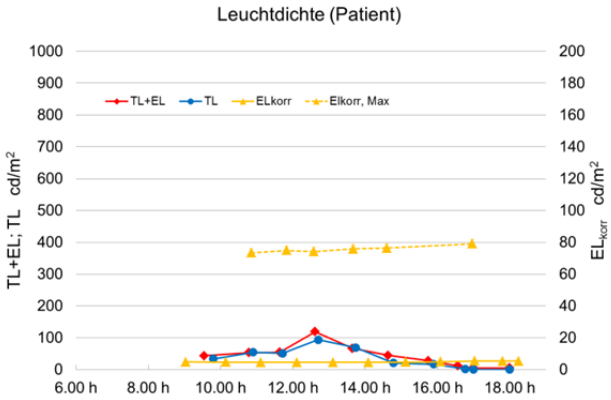


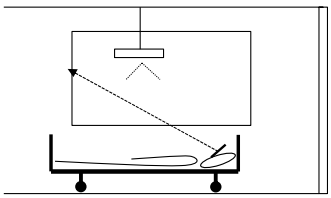






Leuchtdichteaufnahme (Legende 0-7000 cd/m²)

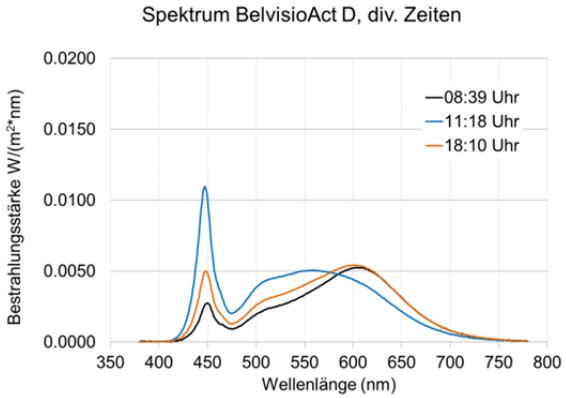


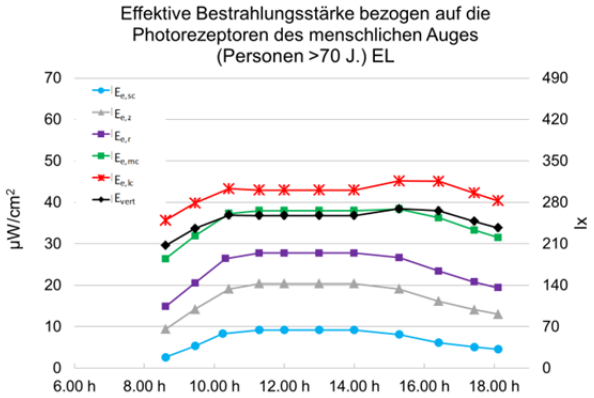


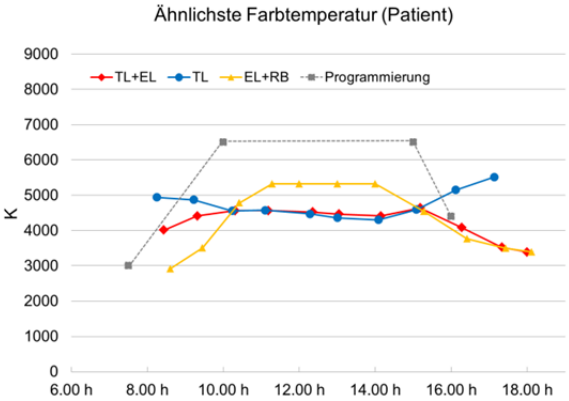
Position Messgerät für alle Messergebnisse dieser Seite

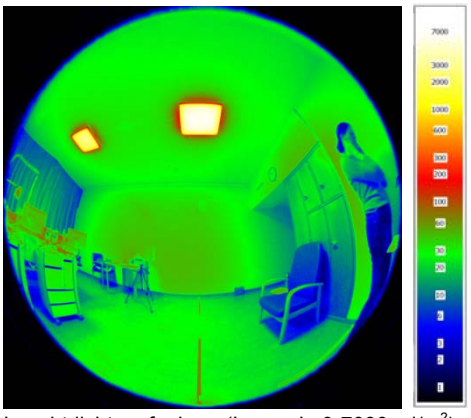
Verwendete Abkürzungen:
EL = Elektrische Beleuchtung
EL_{korr} = korrigierte elektrische Beleuchtung (= Messwert - RB)
TL = Tageslicht,
RB = Restbeleuchtung

Leuchte: BelvisioAct D (Firma TRILUX GmbH & Co KG)

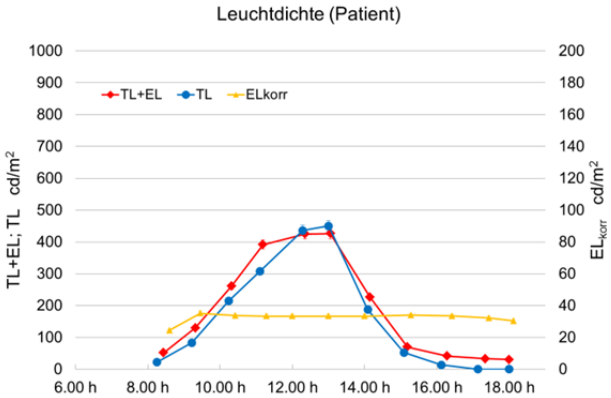


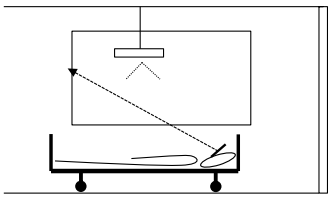






Leuchtdichteaufnahme (Legende 0-7000 cd/m²)





Position Messgerät für alle Messergebnisse dieser Seite

Verwendete Abkürzungen:
EL = Elektrische Beleuchtung
EL_{korr} = korrigierte elektrische Beleuchtung (= Messwert - RB)
TL = Tageslicht,
RB = Restbeleuchtung

4.2 Technische Angaben Leuchten

Tabelle 2 Technische Eigenschaften der eingebauten Leuchten, Nr. 1-13: Angabe pro Leuchte

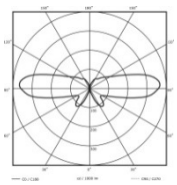
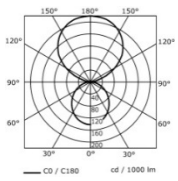
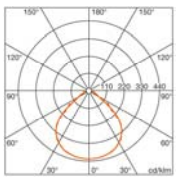
Nr.		**Vanera LED VTL 80 Derungs/ Waldmann**	**Vivaa LED VTL C 400 Derungs/ Waldmann**	**Mira LED tunable white (5LK-118DLGW00T) OSRAM AG**	**RD Spezial RD Leuchten AG**	**BelvisioAct D TRILUX GmbH & Co. KG**
1	Farbwiedergabe R_a	>80	>80	> 80	>90	> 80
2	ähnlichste Farbtemperatur	3´000 K - 6´500 K	3´000 K - 6´500 K	3´000 K - 6´500 K	2700 K- 7000 K	3´000 - 6´500 K
3	Betriebsgerät	Elektronischer Konverter	Elektronischer Konverter	DALI – Traxon e:cue	Lumitech	DALI
4	Anschlusswerte	220-240 V; 50/60 Hz	220-240 V; 50/60 Hz	230 V, 50 Hz	230 V	k. A.
5	Netzschlussleitung	Festanschluss	Festanschluss	Nein	Festanschluss	Festanschluss
6	Leistungsaufnahme, Max.	80 W	64 W	49 W (2 LED Gruppen à 45 W, Farbtemperatur gemischt und gedimmt auf 49 W)	162 W (2 LED Gruppen à 90, bzw. 72 W)	94 W (2 LED Gruppen à 47 W)
7	Veränderung Leistungsaufnahme während des Betriebes?	Ja, bei Dimmung der Leuchte	Ja, bei Dimmung der Leuchte	Ja, bei Dimmung der Leuchte	Ja, bei Dimmung der Leuchte	Ja, bei Dimmung der Leuchte
8	Leuchtenlichtstrom	6´200 lm	6´600 lm	3´610 lm (pro LED Gruppe)	11´200 lm (ca. 30% Minderung durch Flies)	4´300 - 8´600 lm (1- 2 LED Gruppen, je nach Farbtemperatur)
9	LED Lichtstrom		k.a.	3´790	9´000 + 7´000 = 16´000 lm	k.a.
10	Leuchten-Lichtausbeute = Nr. 8 / Nr. 6	78 lm/W	103 lm/W	74 lm/W	69 lm/W	91 lm/W
11	Lampenabdeckung	Prismenprofil (PMMA)	CDP Mikroprismenabdeckung (PMMA)	ELDACON aus PMMA	HDPE Flies	Mikroprismatik CDP
12	LED Lebensdauer	50‘000 h L80 / B50	50‘000h L80/B10	50‘000 h	50‘000 h	L 80 / B10 50‘000 h
13	LVK				k. A.	
14	Leuchten pro Raum	2	2	2	8	2x Wand, 2x Decke

Tabelle 3 Betrieb der Leuchten

	Vanera LED VTL 80 Derungs/ Waldmann	**Vivaa LED VTL C 400 Derungs/ Waldmann**	**Mira LED tunable white (5LK118DLGW00T) OSRAM AG**	**RD Spezial RD Leuchten AG**	**BelvisioAct D TRILUX GmbH & Co. KG**
Beleuchtung dimmbar	ja		ja	ja	ja
Zusammensetzung Leuchte	2 LED unterschiedlicher Farbtemperatur		2 LED unterschiedlicher Farbtemperatur	3 LED unterschiedlicher Farbtemperatur	2 LED unterschiedlicher Farbtemperatur
Mischung Farbtemperatur	LED 3´000 K + LED 6´500 K		LED 3´000 K + LED 6´500 K	LED rot LED blau LED grün	LED 3´000 K + LED 6´500 K
Programmierung Tag	Tagesverlauf fest programmiert		Tagesverlauf fest programmiert	Tagesverlauf fest programmiert	Tagesverlauf fest programmiert
Programmierung Jahr	nicht umgesetzt		nicht umgesetzt	Jahreszeitenabhängig	Jahreszeitenabhängig
Ortsabhängigkeit	k. A.		k. A.	k. A.	per GPS
Verhältnis Direkt- / Indirektanteil	Direkt- / Indirektanteil fix		Direktanteil, fix	Direktanteil, fix	Direktanteil, fix
Beleuchtung schon in anderen Projekten eingesetzt	ja		ja	nein, Prototyp	ja

Tabelle 4 Schalter der Leuchten

Vanera LED VTL 80 / Vivaa LED VTL C 400 Derungs/ Waldmann	**Mira LED tunable white (5LK118DLGW00T) OSRAM AG**	**RD Spezial RD Leuchten AG**	**BelvisioAct D TRILUX GmbH & Co. KG**

4.3 Gemessene Grössen und verwendete Messtechnik

Die gemessenen Grössen und die verwendete Messtechnik zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5 Verwendete Messtechnik und gemessene Grössen

Gerät	**Gemessenen / berechnete Grössen**
Ortsaufgelöste Leuchtdichte / Farbmessung: LMK 5 color	Leuchtdichte
	Blendung (UGR)
	Wirkungsspektrum für die Melatoninsup-pression in der Nacht
Spektrometer: Specbos 1201	Effektive Bestrahlungsstärke bezogen auf die 5 Photorezeptoren des menschlichen Au-ges
	Beleuchtungsstärke, E_{vert}
	Spektrum
	Ähnlichste Farbtemperatur
	Farbwiedergabeindex R_a
Beleuchtungsstärke: LMT Pocket-Lux 2	Beleuchtungsstärke, $E_{horiz.}$
Testo Logger 175-H2	Raumlufttemperatur

Als Reflexionsnormal wurde Löschpapier der Firma Ursus verwendet. Vorgängig wurde dieses mit einem Reflexionsnormal (BN-R98-D2C, Firma Gigaherz-Optik GmbH) messtechnisch verglichen. Diese Untersuchung zeigt, dass ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Messergebnissen des Löschpapiers und jenen des Reflexionsnormals besteht [39].

Ortsaufgelöste Leuchtdichte / Farbmessung

- Kamera: LMK 5 color (2448*2050 Pixel, 14 bit Auflösung)
- Wechselobjektiv: f-8mm fix focus color, s/n: TT8-79517
- Halbraumobjektiv: s/n TTSky-79517-FC-08-04
- Neutralglasgraufilter: (D=2), s/n: TTF496-2
- Software: LabSoft Color Standard, Version 14.1.9
- Messungenauigkeiten (Kalibrierunsicherheit)
- Verwendetes Objektiv ΔL [< 2%]
- Wiederholgenauigkeit
  ΔL [< 0,1%]
  $\Delta x,y$ [< 0,0001]
- Messgenauigkeit
  ΔL [< 3% (für Normlichtart A)]
  $\Delta x,y$ [< 0,0020 (für Normlichtart A)]
  $\Delta x,y$ [< 0,0100 (Testfarbsatz)5]
- Gleichförmigkeit
  ΔL [< 2%]

Beleuchtungsstärke

- LMT Pocket-Lux 2
- V(λ)-Anpassung f_1 < 2.5%
- UV-Empfindlichkeit u < 0.1%
- IR-Empfindlichkeit r < 0.1%
- Räumliche Bewertung f_2 < 1.5%
- Linearitätsfehler f_3 < 0.1% ± 1 Digit
- Fehler des Anzeigegerätes f_4 < 0.55%
- Temperaturkoeffizient α_o < -0.1%/K
- Ermüdung f_5 < 0.1%, gemessen bei 1000 lx
- Moduliertes Licht f_7 < 0.1%
- Abgleichfehler f_{11} < 0.1%
- Gesamtfehler f_{ges} < 7.0 % (Klasse B)
- Untere Grenzfrequenz f_u < 25 Hz
- Obere Grenzfrequenz f_o 100 kHz

Spektrometer

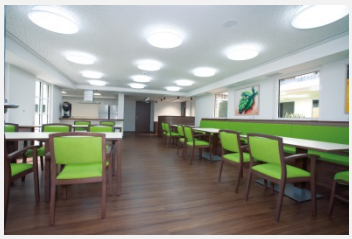
- Specbos 1201
- Spektraler Bereich: 380 nm - 780 nm
- Optische Bandbreite: 5 nm
- Auflösung Wellenlänge: 1 nm
- Messgenauigkeit der Wellenlänge: ± 0.5 nm
- Messbereich Leuchtdichte: 2 - $7*10^4$ cd/m^2
- Messbereich Beleuchtungsstärke: 20 - $5*10^5$ lx
- Messgenauigkeit Leuchtdichte: ± 2% (@ 1000cm/m2 und 2856 K)
- Reproduzierbarkeit Leuchtdichte: ± 1%
- Messgenauigkeit Farbort: ±0.002 x,y (@ 2856 K)
- Reproduzierbarkeit Farbort: ±0.0005 x,y
  Reproduzierbarkeit CCT Farbtemperatur: ±20 K (@ 2856 K)

Temperaturlogger

- Gerätetyp: 175-H2
- Messbereich: -35 bis +55 °C intern
- Genauigkeit: ±0,5 °C (-35 bis +55 °C intern)
- Auflösung: 0,1 °C

4.4 Projektbeispiele mit nicht-visuell wirksamen Beleuchtungsanlagen

Tabelle 6 Projekte im Bereich der Altersmedizin mit nicht-visuell wirksamer Beleuchtung oder speziellem Lichtkonzept grau markiert: Projekte zu denen Langzeiterfahrungen vorliegen.

Institution / Name Bericht	Bild	Beleuchtungskonzept, Baujahr	Eingesetzte Leuchten, Steuerung / Regelung	Literatur
Schillerhöhe, Ulm (D) "Schillerhöhe"	 Quelle: [19]	In den Aufenthaltsräumen und Fluren kann eine wechselnde Beleuchtungsstärke eingestellt werden. Maximale Beleuchtungsstärke Aufenthaltsräume 1000 lx. Baujahr: 2009-2010	Lichtbänder im Flur, Flächenleuchten in Aufenthaltsräume. Manuell an/aus	[19]
Fürstlich Fürstenbergisches Altenpflegeheim, Hüfingen (D) "Hüfingen"	 Quelle: [20]	"Circadianes Licht“ in den Fluren (variable Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke zwischen 200 und 500 lx). In Therapiezone Lichtdecke (ca. 2000 lx) Baujahr: 2007	Dlite Vanera, Derungs Licht AG, Waldmann Lichttechnik GmbH, unterschiedliche Leuchtstofflampen. Steuerung	[20]
Sonnweid das Heim, Wetzikon, (CH) "Sonnweid"	 Quelle www.age-stiftung.ch	Aufenthaltsräume mit variabler Farbtemperatur (2700 K - 6500 K) und Beleuchtungsstärke (100 lx - 1500 lx). Automatische Einstellungsveränderung Baujahr: 2011	Anlage und Steuerung: Firma Zumtobel, unterschiedliche Leuchtstofflampen, Firma Osram	[21], [22]
Pflegeheim St. Katharina, Wien (A)		Lichtfelder im Sozialbereich, Farbtemperatur 3000 K - 7800 K, Beleuchtungsstärke bis max. 3500 lx, 4 unterschiedliche Beleuchtungsszenarien für Studie Baujahr: 2007	CIELOS 3C; Firma Zumtobel: Leuchtstofflampe RGB-System und weisses Licht. Steuerung	[23]
Klinikum rechts der Isar, München (D)		Zwei Patientenzimmer geschlossene Psychiatrie, Farbtemperatur 2700 K - 6500 K, div. Szenarien, ca. 150 bis 600 lx Baujahr: 2011	2 unterschiedliche Leuchtstofflampen, Leuchte Prototyp RZB. Steuerung	[24]
Seniorenzentrum Antonistift, Haus Altenburgblick, Bamberg (D) "Haus Altenburgblick"	 Quelle: SSB	Aufenthaltsräume und Speiseräume, Farbetemperatur (2700 K - 6500 K) und Beleuchtungsstärke (500 - 1000 lx) verändert sich automatisch, weiter gibt es div. Szenen. In Fluren Tagesszene und Nachtszene Baujahr: 2012	Econe Hybrid (Leuchtstofflampen), RZB. Steuerung	[25]
Haus Ruhrgarten, Mühlheim a. d. Ruhr (D) "Ruhrgarten"		Lichtdecke Aufenthaltsbereich, unterschiedliche Farbtemperatur (3000 K - 6000 K) und Beleuchtungsstärke (100 lx - 3600 lx) Baujahr: 2005	2 verschiedene Leuchtstofflampen (Osram). Steuerung	[26]

Institution / Name Bericht	Bild	Beleuchtungskonzept, Baujahr	Eingesetzte Leuchten, Steuerung / Regelung	Lite-ratur
Alters und Pflegeheim Hofmatt, Münchenstein (CH) "Hofmatt"		Dämmerungssimulatoren, Gänge und Aufenthaltsräume: Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur programmierbar, bleibt über den Tag gleich. In Bewohnerzimmer: eigenen Beleuchtung und Nachtlicht ohne Blaulichtanteil. Baujahr: 2012-2015	LED. Steuerung	steht noch aus
Seniorenzentrum "Am Kirschbaumer Hof", Solingen (D) "Kirschbaumer Hof"	 Quelle: [27]	"Circadiane Beleuchtung" in Pflegebereichen, Patientenzimmern, Aufenthaltsbereichen. Veränderbare Farbtemperatur 2700 K - 6500 K und Beleuchtungsstärke Baujahr: 2013	Leuchtstofflampen unterschiedlicher Farbtemperatur, Savio, Phillips. Steuerung	[27]

4.5 Formelzeichen

Wirkungsfaktor für die Melatoninsuppression

$E_{e,\lambda}$	Bestrahlungsstärke
$E_{e,sc}$,	Cyanopische Bestrahlungsstärke
$E_{e,mc}$,	Chloropische Bestrahlungsstärke
$E_{e,lc}$,	Erythropische Bestrahlungsstärke
$E_{e,z}$	Melanopische Bestrahlungsstärke
$E_{e,r}$	Rhodopische Bestrahlungsstärke
E_h	horizontale Beleuchtungsstärke
E_{vert}	vertikale Beleuchtungsstärke
λ	Wellenlänge in nm
L	Leuchtdichte
$s_{ms}(\lambda)$	Wirkkurve für die Melatoninsuppression
σ	Standardabweichung

4.6 Bezeichnungen und Abkürzungen

Ähnlichste Farbtemperatur	Diese Bezeichnung erhalten Lichtquellen, deren Farborte in der Nähe des Planck´schen Kurvenzugs liegen
Beleuchtungsstärke E (lx)	Lichttechnische Größe, welche die Dichte des auf einer Fläche auftreffenden → Lichtstroms beschreibt
Bestrahlungsstärke E_e (W/m²)	physikalische Größe, welche die Dichte des auf einer Fläche auftreffenden → Strahlungsflusses beschreibt
EL	Elektrische Beleuchtung
Farbtemperatur	Der Begriff Farbtemperatur gilt strenggenommen nur für echte Temperaturstrahler, deren Farborte und Temperaturen exakt auf dem Planck´schen Kurvenzug liegen.
Farbwiedergabeindex R_a (-)	Beschreibt die Qualität der Farbwiedergabe von Lichtquellen. Definition [28]: Es handelt sich um eine Vergleichsmessung bei der die Remissionsspektren von acht Testfarben einmal mit einer vorgegebenen Standardlichtquelle ermittelt und dann mit der zu überprüfenden Lampe verglichen wird. Die Abweichungen beider Messungen werden für alle acht Testfarben verglichen. Der ideale Farbwiedergabeindex liegt bei R_a = 100.
FPS	Universitäre Altersmedizin, Felix Platter-Spital, Basel
ipRGC	<*engl.*>: intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, intrinsisch fotosensitive Photozellen in der Netzhaut des Auges
Leuchtdichte L (cd/m²)	Lichttechnische Größe, die die Helligkeit einer Fläche charakterisiert. Sie ist die einzige fotometrische Grundgrösse, die vom Auge direkt wahrgenommen wird
Leuchten-Lichtausbeute	→ Leuchtenlichtstrom / Leistungsaufnahme
Leuchtenlichtstrom	→ Lichtstrom bezogen auf eine Leuchte
Lichtstrom Φ (lm)	Die gesamte von einer Lichtquelle in alle Richtungen ausgehende Strahlungsleistung, bewertet nach der Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges für das Tagsehen V(λ)
LVK	Lichtstärkeverteilungskurve
Melanopsin	Photopigment der ipRGC
Photopsin (lc)	<*engl.*>: long wave cone, Photopigment bei den Rot-Zapfen
Photopsin (mc)	<*engl.*>: midle wave cone, Photopigment bei den Grün-Zapfen
Photopsin (sc)	<*engl.*>: short wave cone, Photopigment bei den Blau-Zapfen
Reflexionsgrad ρ	Stärke der Reflexionsfähigkeit eines Stoffes, Verhältnis des reflektierten → Lichtstroms zu dem auf den Stoff auftreffenden Lichtstrom
Rhodopsin	Photopigment der Stäbchen

RB	Restbeleuchtung
SCN	*<lat.>*: nucleus suprachiasmaticus, suprachiasmatischer Kern
Strahlungsfluss Φ_e (W)	Physikalische Größe zur Charakterisierung der von einem Körper ausgesendeten oder reflektierten Strahlungsleistung
TL	Tageslicht
UGR	*<engl.>*: Unified Glare Rating = vereinheitlichtes Blendungsbewertungsverfahren

4.7 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, and J. Gooley, “The hypothalamic integrator for circadian rhythms,” *Trends Neurosci.*, vol. 28, no. 3, pp. 152–157, 2005.

[3] M. Münch, “Überblick dynamische Beleuchtung - Chronobiologische Beurteilung der Beleuchtungssituation,” *Bull. SEV/VSE*, no. 6, pp. 32–36, 2010.

[4] DIN, *DIN 5035-3:2006: Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 3: Beleuchtung im Gesundheitswesen*. Deutschland, 2006, pp. 1–23.

[5] DIN, *DIN SPEC 67600: 2013-04: Biologisch wirksame Beleuchtung - Planungsempfehlungen*. Deutschland, 2013, pp. 1–68.

[6] 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.

[7] CIE, *CIE TN 003:2015: Technical Note - Report on the first International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photmetry, 2013*. Wien, 2015, pp. 1–35.

[8] C. Cajochen, K. Kräuchi, and A. Wirz-Justive, “Role of Melatonin in the Regulation of Human Circadian Rhythmsand Sleep,” *J. Neuroendocrinol.*, vol. 15, pp. 432–437, 2003.

[9] C. A. Czeilser, 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, and R. E. Kronauer, “Stability, Precision, and Near–24-Hour Period of the Human Circadian Pacemaker,” *Science (80-.).*, vol. 284, pp. 2177–2181, 1999.

[10] G. C. Brainhard and E. Al., “Action Spectrum für Melatonin Regulation in Humans: Evidence fot a Novel Circadian Photoreceptor,” *J. Neurosci.*, vol. 21, no. 16, pp. 6405–6412, 2001.

[11] K. Thapan, “An action Spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod non-cone photoreceptor system in humans,” *J. Physiol.*, vol. 535, no. 1, pp. 261–267, 2001.

[12] D. Gall, “Circadiane Lichtgrössen und deren messtechnische Ermittlung,” in *Handbuch für Beleuchtung*, Ecomed Sicherheit, 2003, p. 22. Erg.–Lfg 12/03.

[13] V. Revell and D. J. Skene, “Light-induced melatonin suppression in humans with polychromatic and monochromatic light,” *Chronibiology Int.*, vol. 24, no. 6, pp. 1125–1137, 2007.

[14] C. Cajochen, “Alterting effects of light,” *Sleep Med. Rev.*, vol. 11, pp. 453–464, 2007.

[15] 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. a Price, I. Provencio, D. J. Skene, and G. C. Brainard, “Measuring and using light in the melanopsin age.,” *Trends Neurosci.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2014.

[16] P. Dehoff, D. Fischer, D. Gall, J. Hesse, and T. Müller, “Das UGR-Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen,” Berlin, 2004.

[17] *SN EN 12464-1:2013: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*. 2003, pp. 1–39.

[18] W. Witting, *Licht. Sehen. Gestalten.* Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2014.

[19] G. Rennertz and P. Steiner, “Innenarchitektur für Menschen mit Demenz - Projektdokumentation,” Ulm.

[20] H. Mollenkopf and S. Heeg, “Gute Praxis: Hüfingen - Therapeutisch wirksames Licht im Pflegeheim,” *DeSS orientiert*, no. 1, pp. 52–57, 2010.

[21] M. Münch and M. Mühlegg, “Viel Licht macht viel Freude,” *Sonnweid das H.*, no. 1, 2014.

[22] NN, “Die künstliche Sonne für die Stube,” *Sonnweid das H.*, no. 1, 2014.

[23] C. Sust, P. Dehoff, D. Lang, and D. Lorenz, “Verbesserte Lebensqualität für demente Bewohner: Das Forschungsprojekt St. Katharina in Wien,” Lemgo, 2012.

[24] B. Dietz, “Nebendiagnose Demenz im Akutkrankenhaus - Einsatzpotentiale innovativer Licht-, Kommunikations- und Planungstechnologien für eine alters- und demenzsensible Architektur. Forschungsbericht,” München, 2012.

[25] C. Lübbehusen, “Circadianes Licht für Senioren - das ‘Haus Altenburgblick’ im Antonistift in Bamberg,” *Licht*, vol. 65, no. 5, pp. 16–18, 2013.

[26] K. Bieske and O. Dierbach, “Evaluation des Einsatzes von tageslichtähnlichem Kunstlicht in der gerontopsychiatrischen Pflege und Betreuung Hochbetagter,” in *Tagung 5. Symposium “Licht und Gesundheit” 23. und 24. Februar 2006*, 2006.

[27] NN, “Projektbericht Seniorenzentrum Solingen, Deutschland,” 2013.

[28] H. Siekmann, “2. CIE-Symposium ‘beleuchtung und Gesundheit,’” in *Handbuch für Beleuchtung*, Ecomed Sicherheit, 2007, p. 38. Erg.–Lfg.