



Nicht-visuelle und nachhaltige Lichtplanung: Probleme und Lösungsansätze

*Johannes Weninger
Bartenbach GmbH, research & development
Österreich, 6071 Aldrans, Rinner Straße 14*

Zusammenfassung

Mit den in der DIN/TS 67600 angeführten ergänzenden Kriterien für die Lichtplanung im Hinblick auf nicht-visuelle Wirkungen von Licht stehen Planenden nun erstmals wissenschaftlich konsolidierte Zielgrößen zur Verfügung. Gesundheitliche Planungsaspekte können dadurch nun auch auf breiterer Basis eine umfassende Berücksichtigung finden. Trotz dieser positiven Entwicklung ergeben sich durch die formulierten Vorgaben jedoch speziell in Bezug zu klima- und umweltpolitischen Zielsetzungen neue Herausforderungen für Planende, welche die langfristige Umsetzbarkeit und Annahme nicht-visueller Lichtplanungen maßgeblich beeinträchtigen können.

Nachfolgend werden die Einflüsse der neuen nicht-visuellen Zielgrößen auf die Nachhaltigkeitsaspekte Energieverbrauch und Anlagendimensionierung in Bezug zu typischen Büroanwendungen kritisch reflektiert. Auf Basis von Untersuchungsergebnissen eigener Studien werden in Folge theoretische Potenziale abgeleitet, welche nicht nur zur Wahrung von Nachhaltigkeitsaspekten, sondern auch zur Sicherstellung nutzerbezogener Zielgrößen herangezogen werden können.

1 Einführung

Die LED kann heute als maßgeblich prägendes Element für die gesamte Beleuchtungsindustrie angesehen werden. Ihren Markterfolg verdankt sie dabei neben ihrer Langlebigkeit und Effizienz auch ihrem reduzierten Formfaktor, welcher die Umsetzung fundamental neuer Beleuchtungskonzepte ermöglichte. So können heute beispielsweise auf Basis ihrer kompakten Bauform miniaturisierte, architekturintegrierte Beleuchtungen umgesetzt werden, welche die erreichbaren Beleuchtungsstärken von Beleuchtungen mit herkömmlichen Leuchtmitteln auch bei reduziertem energetischem Verbrauch bei Weitem übertreffen. Zudem wurde es durch die Ansteuerungsmöglichkeit der LED-Technologie erstmals möglich, das emittierte Lichtspektrum gezielt zu verändern. Die diesbezüglich erzielte Digitalisierung der Beleuchtung bildet heute im Zusammenhang mit der Etablierung von Lichtsteuersystemen und der Integration von Sensortechnologien die Grundlage der integrativen Beleuchtung (ISO/CIE, 2022).

Das Paradigma bedient sich dabei der Automatisierbarkeit von Beleuchtungssystemen, um biologisch wirksame und dynamisch applizierte Beleuchtungsszenarien umzusetzen, welche durch die Stabilisierung unserer zirkadianen Rhythmik (Menculini, et al., 2018)



langfristig zur Erzielung gesundheitlich positiver Wirkungen beitragen sollen. Typischerweise besitzen derart gelagerte Kunstlichtlösungen dafür über 24 Stunden variabel angelegte Intensitäten und Farbtemperaturen, um die melanopische Wirksamkeit der Beleuchtung während des Tagesverlaufs zu verändern.

Die Entschlüsselung der unterliegenden Wirkmechanismen dieser zeitgesteuerten Lichtexpositionen findet ihren Ursprung dabei vorrangig in Untersuchungen zur lichttherapeutischen Behandlung von affektiven Störungen, bei welchen häufig auftretende Disruptionen der zirkadianen Rhythmen und/oder Schlafprobleme (Cunningham, et al., 2019) entscheidende Faktoren der Pathogenese darstellen (Lee, 2019). Da Lichtexpositionen neben der Synchronisation des zirkadianen Systems (Menculini, et al., 2018) auch das langfristige Potenzial bieten, die Schlafqualität zu verbessern (Faulkner, et al., 2019), erwiesen sie sich dementsprechend als vielversprechende nicht-pharmakologische Interventionsoption. Der Ansatz folgte einer morgendlichen polychromatischen Weißlichtbestrahlung von ca. 5.000 lxh (bspw. 5.000 lx über eine Stunde, gemessen als vertikale Beleuchtungsstärke am Auge des Patienten) und erwies sich aufgrund seines schnell auftretenden antidepressiven Effekts (Cunningham, et al., 2019) als äußerst wirksam bei einem gleichzeitig sehr geringem Nebenwirkungsprofil (Kogan & Guilford, 1998). Heute stellt die Lichttherapie eine Erstlinienbehandlung für saisonale affektive Störungen (SAD) dar (Terman & Terman, 2005) und wird auch zur Behandlung von Patienten mit mittelschwerer bis schwerer Depression (Geoffroy, et al., 2019) eingesetzt. Trotz der Erkenntnis, dass sich eine adjuvante Behandlung mittels Lichttherapie als wirksamer als eine alleineige Pharmakotherapie erweist (Geoffroy, et al., 2019), findet die Lichttherapie heute jedoch nur selten eine darüber hinausreichende Anwendung.

Erste Indikationen, dass die in Bezug zur lichttherapeutischen Anwendung gewonnenen Erkenntnisse möglicherweise auch im Kontext von Allgemeinbeleuchtungen von Bedeutung sein könnten, ergaben sich bereits 1989 aus einer bahnbrechenden Studie (Terman, et al., 1989), welche von den positiven Auswirkungen künstlicher Morgen- und Abendsimulationen bei Patienten mit affektiven Störungen berichtete. Die daraus folgende Annahme, dass künstliche Morgendämmerung genauso wirksam zur Behandlung herangezogen werden kann wie Lichttherapie, wurde später von weiteren Studien (Avery, et al., 2001; Terman & Terman, 2006) belegt.

Inzwischen haben Forschungen an gesunden Menschen unser Verständnis der Auswirkungen künstlicher Beleuchtung auf den Menschen maßgeblich erweitert und die Annahme nicht-visueller Lichtwirkungen auf Stimmung, Kognition und das zirkadiane System mittels der Interaktion von Stäbchen, Zapfen und intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGCs) gilt weitestgehend als gesichert (Lall, et al., 2010; Lucas, et al., 2012). Lichtexpositionen am Morgen verbessern dabei nachweislich die Schlafträgheit (Thompson, et al., 2014; Van de Werken, et al., 2010) und die kognitive Leistung nach dem Aufwachen (Thompson, et al., 2014; Gabel, et al., 2015) und verursachen eine physiologische Phasenverlagerung des zirkadianen Rhythmus (Danilenko, et al., 2000), einen beschleunigten Abfall der Hauttemperatur (Van de Werken, et al., 2010) und einen reduzierten Herzfrequenzgradienten während des Schlaf-Wach-Übergangs (Viola, et al., 2015). Zudem



verringert blau-reduzierte nächtliche Beleuchtung die Erregung vor dem Schlafengehen (Rahman, et al., 2017) und minimiert Störungen von zirkadianen und schlafbezogenen Parametern (Vethe, et al., 2021; Chellappa, et al., 2013). Darüber hinaus lieferte eine kürzlich veröffentlichte Metaanalyse (Mu, et al., 2022) vorläufige Beweise für einen kleinen, aber signifikanten Effekt von hellem Weißlicht auf Konzentrationsmaße während des Tages.

Um eine systematische Überführung dieser Erkenntnisse in die lichtplanerische Praxis zu gewährleisten und die Erzielung gesundheitlich wirksamer Lichtexpositionen mittels Allgemeinbeleuchtungen sicherstellen zu können, erweist sich jedoch die Ableitung einer geeigneten Metrik zur Bewertung der nicht-visuellen Wirksamkeit von Beleuchtungssituationen als notwendig. Einen ersten und lange als vielversprechend geltenden Ansatz stellte hierfür der Circadian Stimulus (CS) dar (Rea, et al., 2022), welcher aufbauend auf Studien zur nächtlichen Melatonin-Suppression (Brainard, et al., 2001) die nicht-visuelle Wirkung auf Basis eines physiologischen Ansatzes modellierte. Das Modell beruht dabei auf einem komplexen Zusammenspiel mehrerer Wirkfunktionen und berücksichtigt unter anderem auch die Dauer der Bestrahlung und die räumliche Ausdehnung und Lage der Lichtquelle. Obwohl eine derartige Modellierung von Experten lange gefordert wurde, geriet der CS aufgrund starker Unstetigkeiten im unteren Wirkungsbereich zunehmend in Kritik und hat sich schlussendlich international nicht durchgesetzt. Heute findet der CS ausschließlich noch in amerikanischen UL-Standards (UL, 2019) eine Anwendung.

Die dagegen aktuell auf internationaler Ebene anerkannte Bewertungsgröße stellt die melanopisch tageslichtäquivalente Beleuchtungsstärke (MEDI) dar (CIE, 2018), welche die nicht-visuelle Wirksamkeit vergleichend zur Wirksamkeit des Normlichtspektrums D65 und unter Anwendung der relativen spektralen Empfindlichkeit der melanopsinhalten Ganglienzellen beschreibt. Da bei der Berechnung der melanopische tageslichtäquivalente Effizienzfaktor (MDER) des am Auge auftretenden Lichtspektrums mit der zugehörigen visuellen Beleuchtungsstärke multipliziert wird, fließen auch hier mehrere Wirkfunktionen in die Bewertung ein. Ausschlaggebend für die Berechnung ist dabei nur die am Auge auftretende Beleuchtungsstärke und zur Beachtung von zusätzlichen Alterungsfaktoren des menschlichen Auges stehen verschiedene altersabhängige Korrekturfaktoren zur Verfügung.

Mit dem Erscheinen der DIN/TS 67600 wurden zwischenzeitlich auch erstmals wissenschaftlich konsolidierte Zielgrößen erarbeitet, welche es ermöglichen sollen, dass gesundheitliche Planungsaspekte auch auf breiterer Basis eine umfassende Berücksichtigung finden können und Planende gleichzeitig vor neue Herausforderungen stellen. So erweist sich beispielsweise die angeführte Zielgröße von maximal 10 lx MEDI zur Sicherstellung eines möglichst geringen Einflusses auf die zirkadiane Phasenlage während der Nacht in den meisten Applikationsbereichen als nur äußerst schwierig einzuhalten und der untere Schwellenwert des Bereichs in dem nicht-visuelle Wirkungen des Lichts genutzt werden können und welcher für tagesbezogene Lichtexpositionen angestrebt werden sollte liegt mit 250 lx MEDI deutlich über den bisherigen normativen Forderungen.

Die bei der Berechnung des MEDI herangezogenen vertikalen Beleuchtungsstärken können gegenüber horizontalen Beleuchtungsstärken zudem in den meisten Fällen nur deutlich

schwerer erbracht werden und die visuellen Beleuchtungsstärken werden bei der Berechnung durch die melanopische tageslichtäquivalente Bewertung meist reduziert (bei 5.000 K liegt der MDER beispielsweise bei ca. 0,8). Speziell in Bezug zu klima- und umweltpolitischen Zielsetzungen erweisen sich die aktuellen Forderungen dementsprechend als problematisch, da sie zwangsweise nicht nur in höheren Anlagendimensionierungen, sondern auch in erhöhten energetischen Verbräuchen resultieren.

2 Lichtplanerische Aspekte

Zur Quantifizierung der nachhaltigkeitsbezogenen Aspekte aktueller nicht-visueller Zielkriterien wurden drei verschiedene Beleuchtungskonzepte (diffuse Deckenpaneele, Pendelleuchten und ausgeblendete Systeme) simulationsbasiert in ihrer zur Erreichung der Zielwerte notwendigen Anschlussleistung dimensioniert (Abb. 1). Als Grundlage wurde hierfür eine 22,5 m² große Standardbüroeinheit mit Doppelarbeitsplatzbelegung herangezogen. Die Dimensionierung erfolgte in DIALux (Version 4.12.0.1) und unter Beachtung aller relevanter normativer Vorgaben. Als nicht-visuelle Zielgröße der Simulationen wurde hierbei ein zu erzielender MEDI von 250 lx herangezogen, welcher mit den Farbtemperaturen von 5.000 K und 16.000 K erzielt werden sollte. Vergleichend dazu wurde eine Standardsituation mit der normativen, horizontalen Beleuchtungsstärke von 500 lx herangezogen.

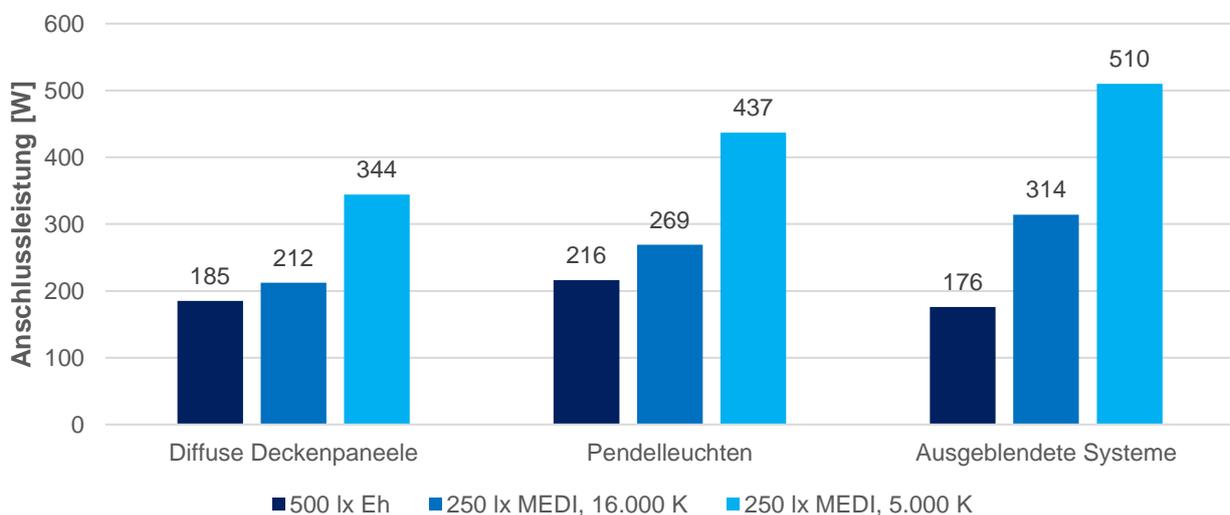


Abb. 1: Vergleichende Darstellung der mittels DIALux simulierten notwendigen Anschlussleistung nach Beleuchtungskonzept und Zielkriterium für ein Standard-Doppelbüro von 22,5 m²

Die Simulationsergebnisse veranschaulichen den mit nicht-visuellen Anforderungen einhergehenden und unabhängig vom angewandten Beleuchtungskonzept auftretenden Anstieg der notwendigen Anschlussleistung. Speziell in Bezug zur Annahme von 5.000 K ergeben sich dabei gegenüber der normativen Standardsituation um ca. 85% (diffuse Deckenpaneele) bis 185% (ausgeblendete Systeme) höhere Dimensionierungsanforderungen. Die zu

Vergleichszwecken errechneten Anschlussleistungen bei 16.000 K fallen aufgrund des erhöhten MDER deutlich niedriger aus, werden jedoch aus visueller Sicht nicht empfohlen.

Des Weiteren wird in den Ergebnissen ersichtlich, dass sich diffus abstrahlende Systeme deutlich besser zur Erreichung nicht-visueller Zielgrößen eignen als ausgeblendete Konzepte. Der Grund liegt dabei vorrangig darin, dass ausgeblendete Systeme durch den Ausschluss von direkt ins Auge fallenden Beleuchtungsanteilen die notwendigen vertikalen Beleuchtungsstärken nur über reflektiertes Licht erreichen können und ein dementsprechend schlechteres E_h/E_v -Verhältnis aufweisen. Trotz dieses Vorteils weisen rein diffus abstrahlende Beleuchtungskonzepte jedoch deutliche Nachteile auf. Sie lassen Oberflächen verblassen und erzeugen im Normalfall eine kontrastarme und eher nüchtern wirkende Raumatmosphäre. Zudem dominieren die hohen Leuchtdichten der Lichtaustrittsflächen ($> 5.000 \text{ cd/m}^2$) den Raum und reduzieren den visuellen Komfort. Architekturintegrierte Beleuchtungskonzepte und ausgeblendete Leuchten-Designs, welche diese Nachteile nicht aufweisen, tragen diesbezüglich deutlich zu einem verbesserten emotionalen Raumempfinden bei (Abb. 2).



Abb. 2: Beispielhafte Darstellung verschiedener Beleuchtungskonzepte im Studio der Bartenbach Lichtwelt in Aldrans; Links: diffuse Raumbelichtung mittels eines Deckenpanels, Mitte und Rechts: architekturintegrierte Beleuchtung mittels Bartenbach Components mit unterschiedlichen emotionalen und melanopischen Wirkungen)

Eine weitere entscheidende Einschränkung diffuser Beleuchtungskonzepte besteht darin, dass diese generell keine zonale Variation der Raumausleuchtung gestatten. Dadurch ist sowohl eine Anpassung an unterschiedliche individuelle visuelle Lichtbedürfnisse als auch die Erbringung unmittelbarer Lichteffekte zur Steigerung von beispielsweise Wachheit oder Aufmerksamkeit im Allgemeinen nicht möglich. Studien konnten auch aufzeigen, dass der Komfort von Nutzern durch die mangelnde Kontrolle über ihre Umgebung substantziell eingeschränkt wird (Nagy, et al., 2016) und die Möglichkeit zur individuellen Einstellung der Beleuchtung auf bevorzugte Werte die Nutzerzufriedenheit nachhaltig verbessert (Despenic, et al., 2017). Raumbezogene Beleuchtungssysteme, welche individuelle Bedürfnisse nicht ausreichend abdecken, laufen demnach Gefahr von Nutzern nur eingeschränkt akzeptiert zu werden (Weninger & Canazei, 2018; Weninger, et al., 2018) und führen zunehmend zu Unzufriedenheiten, wie auch in der 2018 im Rahmen des Forschungsprojekts Repro-light europaweit durchgeführten Endnutzerbefragung (Tanzer & Rudolph, 2018)

bestätigt wurde. So wünschten sich von den über 1.100 Befragten beispielsweise 70% mehr Kontrolle über ihre Arbeitsplatzbeleuchtung und 80% eine automatische Anpassung an ihre individuellen Bedürfnisse.

Die vorrangige Herausforderung liegt dementsprechend darin, integrative Beleuchtungen zu konzipieren, die kosten- und energieeffizient hohe vertikale Beleuchtungsstärken am Auge erzielen, ohne den visuellen Komfort und das Raumerscheinungsbild zu beeinträchtigen. Gleichzeitig soll der Nutzer mit seinen individuellen Bedürfnissen berücksichtigt werden, ohne dabei allgemein raumbezogenen Qualitätskriterien zuwiderzuhandeln.

3 Nachhaltigkeitsbezogene Potentiale

Dass diese Forderung grundsätzlich in lichtplanerischen Anwendungen zielführend umgesetzt werden kann, kann am Beispiel des Bartenbach F&E Gebäudes in Aldrans (Abb. 3) verdeutlicht werden. Das rund 160 m² große Großraumbüro charakterisiert sich durch eine große, nach Süden ausgerichtete Glasfassade, welche zusammen mit den nach Norden ausgerichteten Oberlichtern für ein überdurchschnittlich hohes Tageslichtniveau im Büro sorgen. Um direkten Sonnenlichteintrag auf den Arbeitsplätzen zu vermeiden, sind außenliegende, statische Tageslichtlamellen installiert, deren Dimension und Struktur speziell für die geografische Lage des Gebäudes optimiert sind. Die Kunstlichtlösung für Arbeitsplätze und Transitzonen wurde mit deckenintegrierten LED-Leuchten realisiert, deren Längsentblendung, asymmetrische Abstrahlcharakteristik und Leuchtenanordnung eine blendfreie und homogene Ausleuchtung der Arbeitsplätze gewährleisten und die Abschattung der Arbeitsfläche durch den Nutzer verhindern. Über Beleuchtungsstärkesensoren und PIR-Sensoren wird das Kunstlicht je nach Tageslichtangebot und Anwesenheit automatisch geschaltet oder gedimmt. Um den individuellen Beleuchtungspräferenzen zu folgen, wurde im Großraumbüro eine Zonierung von Tageslicht- und Kunstlichtsystemen realisiert, bei der die jeweils benachbarten Arbeitsplätze zu Arbeitsplatzzonen zusammengeschaltet werden.



Abb. 3: Innen- und Außenansicht des Bartenbach F&E-Gebäudes; im linken Bild sind die Oberlichter erkenntlich, das rechte Bild veranschaulicht die außenliegenden statischen Tageslichtlamellen



Zur Unterstützung des menschlichen circadianen Systems wird in den Morgenstunden kaltweißes Licht (5.000 K) verwendet, das sich im Laufe des Tages nach einer vordefinierten Regelkurve dynamisch zu wärmeren Farbtemperaturen bis hin zu abendlichem, warmweißem Licht (2.200 K) und niedrigeren Beleuchtungsstärken anpasst.

Im Rahmen des Forschungsprojekts MOSCOW wurde das Gebäude 2019 zu einem Living Lab umgerüstet und seither systematisch zur Evaluierung von Nachhaltigkeitsaspekten genutzt. Im Zuge der Umrüstung wurden ca. 100 Sensoren installiert, welche über das zentrale Beckhoff Gebäudeleitsystem erfasst und weiterverarbeitet werden. Dazu gehören u. a. Beleuchtungsstärke und Anwesenheit je Arbeitsplatzzone, Informationen zum Raumklima und der Dimmwert der Beleuchtung. Das Langzeitmonitoring liefert dabei in Kombination zu erweiternden Tageslichtsimulationen wertvolle Erkenntnisse zur übergeordneten Performanz des Gebäudes, welche zur Ableitung von Potenzialen zur Steigerung der energetischen Effizienz herangezogen werden.

1.1 Vorteile erhöhter Tageslichtintegration

Eine 2022 auf Basis der erhobenen Messdaten durchgeführte Gebäudeevaluierung (Geisler-Moroder, et al., 2022) ergab eine durchschnittliche Tageslichtautonomie $DA_{500,8-18}$ von 82 % in Bezug auf die normative Mindestbeleuchtungsstärke von 500 lx (Bezugszeit: 08:00-18:00, Sommerzeit nicht berücksichtigt) und bestätigt somit die überaus hohen Tageslichtverfügbarkeit im Gebäude. Zudem wurde der „Lighting Energy Numeric Indicator“ (LENI) gemäß EN 15193 ermittelt. Bezogen auf die normative Mindestbeleuchtungsstärke für Bürotätigkeiten von 500 lx ergab sich dabei für die Bürofläche ein Energiebedarf pro Fläche von 3,65 kWh/m²y, dazu kommen noch 1,09 kWh/m²y für die umfangreiche Sensorik inklusive des Embedded PC für die Steuerung. Ohne tageslichtabhängige Steuerung liegt der Referenz-Energiebedarf unter Berücksichtigung des erfassten Anwesenheitsprofils bei 16,5 kWh/m²y. Die positiven Auswirkungen der Sensoren zur integralen Kunst- und Tageslichtsteuerung auf den Energieverbrauch überwiegen dementsprechend deutlich den eigenen Energiebedarf.

Zudem verweisen die erhobenen Daten auf eine effiziente Tageslichtnutzung mit durchschnittlichen horizontalen Tageslichtbeleuchtungsstärken am Arbeitsplatz von über 1.000 lx zur Mittagszeit, die auch bei bedecktem Himmel eine nicht-visuelle Wirksamkeit ohne zusätzliche Kunstlichtbeleuchtung sicherstellen (Tab. 1).

Tab. 1: Im Bartenbach F&E-Büro gemessene Farbtemperaturen (CCT), vertikale Beleuchtungsstärken (E_v) und melanopisch tageslichtäquivalente Beleuchtungsstärken (MEDI)

Tag und Uhrzeit	CCT	E_v	MEDI
Tageslicht, sonniger Himmel, 16. April 2022, 11:50	5.451 K	1.647 lx	1.301 lx
Tageslicht, bedeckter Himmel, 19. April, 2022; 12:25	5.317 K	1.558 lx	1.199 lx



1.2 Steuerungsbezogene Potentiale

Die niedrigen Energieverbräuche des Gebäudes resultieren dabei jedoch nicht nur aus der hohen Tageslichtverfügbarkeit, sondern auch durch die erweiterte Beachtung nutzerspezifischer Einflüsse. Durch die hohe Tageslichtverfügbarkeit verschiebt sich der Kunstlichtbedarf hauptsächlich in die Tagesrandbereiche, welche aufgrund individuell unterschiedlicher Arbeitszeitgestaltungen grundsätzlich höhere Nutzerdynamiken aufweisen. Adäquate Präsenzerkennungen erweisen sich dementsprechend ebenfalls von hoher Bedeutung für den energieeffizienten Betrieb, können jedoch grundsätzlich auf verschiedene Arten in die übergeordnete Gebäudesteuerung implementiert werden. Um diesbezüglich verschiedene Konzepte zu bewerten, wurden in einer 2020 durchgeführten Studie (Hammes, et al., 2020) die energetischen Verbräuche in Bezug zu unterschiedlichen Raumzonierungen (Steuerung des Großraumbüros als Ganzes; Aufteilung in 2 nach Westen und nach Osten ausgerichtete Steuergruppen; 9 individuelle Arbeitsplatzzonen) betrachtet und einem manuell gesteuerten Ansatz gegenübergestellt.

Die Ergebnisse (Tab. 2) zeigen nicht nur, dass grundsätzlich gesteuerte Systeme gegenüber nicht gesteuerten Ansätzen energetische Vorteile aufweisen, sondern vor allem, dass mit zunehmend stärkerer Nutzerzentrierung eine signifikante Reduktion des Energiebedarfs erreicht wird. Zudem konnte die Studie aufzeigen, dass auf Basis der erhöhten Abdeckung individueller Beleuchtungspräferenzen auch eine höhere Systemakzeptanz erreicht werden kann.

Tab. 2: Simulationsbasiert ermittelte, normalisierte Energieverbräuche nach Raumzonierung und Steuerungskonzept (vgl. auch (Hammes, et al., 2020))

	Vollflächige Beleuchtung, manuell	Vollflächige Beleuchtung, präsenzgest.	Zwei Bereiche, präsenzgest.	9 Arbeitsplatzzonierung, präsenzgest.
Normalisierter Energieverbrauch	117%	100%	88%	45%

1.3 Personalisierte Beleuchtungskonzepte

Vergleichbare Ergebnisse zeigen sich auch in Bezug zu hochgradig personalisierten Beleuchtungskonzepten, welche im Allgemeinen dem Ansatz folgen, die Beleuchtung näher an den Endnutzer zu verlagern, um auf interindividuelle Unterschiede und Anforderungen besser adaptieren zu können. Im Rahmen des Forschungsprojekts Repro-light wurde hierzu ein beispielhafter Prototyp entwickelt, welcher aus einer Rückwand mit einem horizontal montierten Leuchtenkopf besteht und auf Basis einer Einzelpunktansteuerung von 24 LED-Einheiten die variable Ansteuerung von Intensität, Farbtemperatur (2.200 bis 5.700 K) und Lichtverteilung separat für Schreibtisch und Rückwand ermöglicht (Abb. 4).



Abb. 4: Beispielhafte Darstellung der unabhängigen Beleuchtung von Rückwand und Tisch mit unterschiedlichen Farbtemperaturen

Durch die Nähe zum Endnutzer können dabei nicht nur horizontale und vertikale Beleuchtungsstärken erzielt werden, die die derzeit in der Lichtplanung verwendeten Mindestanforderungen deutlich übertreffen (bis zu 1.500 lx auf Augenhöhe und 6.000 lx am Schreibtisch), sondern es werden gleichzeitig auch nutzerspezifische Bedürfnisse (Lasa, et al., 2021) besser abgedeckt. Zudem ergeben sich aus personalisierten Beleuchtungskonzepten auch darüber hinausreichende Potentiale zur Erbringung nicht-visueller Effekte, speziell in Bezug zu Aufmerksamkeitsleistungen während des Tages.

Im Rahmen von Allgemeinbeleuchtungen werden diese normalerweise durch kontinuierliche Einwirkung bestimmter Lichteinstellungen erzeugt, da individuelle Faktoren nicht ziel führend im Beleuchtungskonzept abgebildet werden können. Aktuell gibt es jedoch erste Hinweise darauf, dass auch intermittierende Lichtinterventionen (Chang, et al., 2012) akute Lichteffekte ausüben, die potenziell gegenüber einer kontinuierlichen Einwirkung auch eine erhöhte Wirksamkeit besitzen (Güler, et al., 2008). Die Vermutungen konnten 2023 im Rahmen einer im Projekt LessIsMore durchgeführten Studie (Canazei, et al., 2023) unter Einsatz der beschriebenen Prototypen bestätigt werden, indem sich nicht nur verbesserte kognitive Leistungen, sondern auch eine reduzierte Herzratenvariabilität zeigten. Unter Beachtung der Erfordernis einer erhöhten Nutzerzentrierung erweisen sich kurzzeitige Lichtinterventionen dementsprechend als vielversprechender Ansatz nicht-visuellen Anforderungen gerecht zu werden ohne nachhaltigkeitsbezogene Aspekte zu vernachlässigen.

4 Fazit

Mit den in der DIN/TS 67600 angeführten ergänzenden Kriterien für die Lichtplanung im Hinblick auf nicht-visuelle Wirkungen von Licht stehen Planenden nun erstmals wissenschaftlich konsolidierte Zielgrößen zur Verfügung. Obwohl gesundheitliche Planungsaspekte dadurch nun eine umfassendere Berücksichtigung finden können, ergeben sich durch die formulierten Vorgaben in Bezug zu Nachhaltigkeitszielen neue Herausforderungen für Planende, da zur Erreichung der nicht-visuell Zielvorgaben höheren Systemdimensionierung erforderlich sind, die auch in einem erhöhten Energieverbrauch resultieren.



Effiziente Tageslichtlösungen bieten hierbei grundsätzlich das Potenzial nicht-visuelle Effekte während des Tages zu maximieren und den Energieverbrauch zu reduzieren. Im Optimalfall sollten solche Systeme dabei auf integraler Ebene durch geeignete Steuerungsverfahren mit dem Kunstlicht gekoppelt und mit möglichst starker Nutzerzentrierung ausgeführt werden, um energetische Einsparmöglichkeiten bestmöglich abzurufen. Im Allgemeinen ermöglichen solche Ansätze es auch erweiterte Personalisierungsverfahren zu implementieren, welche durch eine direktere Abbildung nutzerspezifischer Präferenzen die Akzeptanz gegenüber technologischen Systemen im Normalfall erhöhen. Derart gelagerte Kunstlichtsysteme ermöglichen dabei zudem erhöhte Effizienzgrade und die individuelle Applikation aufmerksamkeitsfördernder Beleuchtungssituationen.

Beleuchtungen bietet demnach ein maßgebliches Potenzial, einen weitreichenden nachhaltigen Nutzen für sowohl Einzelpersonen als auch die Gesellschaft als Ganzes zu stiften. Es bedingt dafür jedoch einer Transformation der Beleuchtungsphilosophie, bei welcher sowohl Konzepte und Produkte als auch eingesetzte Technologien den raumbezogenen Fokus zugunsten der personellen Individualität reduzieren.

Danksagung

Die Projekte MOSCOW (FFG Nr. 870845) und LessIsMore (FFG Nr. 861712) wurden von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG teilfinanziert.

Das Projekt Repro-light wurde im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon 2020 unter der Nummer 768780 von der Europäischen Union gefördert.

Referenzen

Avery, D. H. et al., 2001. Dawn simulation and bright light in the treatment of SAD: a controlled study. *Biological psychiatry*, 50(3), pp. 205-216.

Brainard, G. C. et al., 2001. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *Journal of Neuroscience*, 21(16), pp. 6405-6412.

Canazei, M. et al., 2023. Impact of repeated morning bright white light exposures on attention in a simulated office environment. *Scientific Reports*, 13(8730).

Chang, A. M. et al., 2012. Human responses to bright light of different durations. *The Journal of physiology*, 590(13), pp. 3103-2112.

Chellappa, S. L. et al., 2013. Acute exposure to evening blue-enriched light impacts on human sleep. *Journal of sleep research*, 22(5), pp. 573-580.

CIE, 2018. *CIE S 026/E:2018: CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*, Wien: Commission Internationale de l'Eclairage.

Cunningham, J. E., Stamp, J. A. & Shapiro, C. M., 2019. Sleep and major depressive disorder: a review of non-pharmacological chronotherapeutic treatments for unipolar depression. *Sleep medicine*, Band 61, pp. 6-18.



- Danilenko, K. V. et al., 2000. Phase advance after one or three simulated dawns in humans. *Chronobiology international*, 17(5), pp. 659-668.
- Despenic, M., Chraibi, S., Lashina, T. & Rosemann, A., 2017. Lighting preference profiles of users in an open office environment. *Building and Environment*, Band 116, pp. 89-107.
- Faulkner, S. M. et al., 2019. Light therapies to improve sleep in intrinsic circadian rhythm sleep disorders and neuro-psychiatric illness: A systematic review and meta-analysis. *Sleep medicine reviews*, Band 4, pp. 108-123.
- Gabel, V. et al., 2015. Dawn simulation light impacts on different cognitive domains under sleep restriction. *Behavioural brain research*, Band 281, pp. 258-266.
- Geisler-Moroder, D., Hammes, S. & Pohl, W., 2022. Integrale Gebäudesteuerung - Die Beleuchtung als Herzstück. In: *TGA Planung 2022*. Wien: WEKA Industrie Medien GmbH, pp. 10-13.
- Geoffroy, P. A., Schroder, C. M., Reynaud, E. & Bourgin, P., 2019. Efficacy of light therapy versus antidepressant drugs, and of the combination versus monotherapy, in major depressive episodes: A systematic review and meta-analysis. *Sleep medicine reviews*, Band 48, p. 101213.
- Güler, A. D. et al., 2008. Melanopsin cells are the principal conduits for rod-cone input to non-image-forming vision. *Nature*, 453(7191), pp. 102-105.
- Hammes, S. et al., 2020. Die Bedeutung von Nutzerzentrierung in automatisierten Beleuchtungssystemen. *Bauphysik*, 42(5), pp. 209-217.
- ISO/CIE, 2022. *Light and lighting—Integrative lighting—Non-visual effects. Report No. ISO/CIE TR 21783*, s.l.: International Standards Organization and Commission Internationale de l'Eclairage.
- Kogan, A. O. & Guilford, P. M., 1998. Side effects of short-term 10,000-lux light therapy. *American Journal of Psychiatry*, 155(2), pp. 293-294.
- Lall, G. S. et al., 2010. Distinct contributions of rod, cone, and melanopsin photoreceptors to encoding irradiance. *Neuron*, 66(3), pp. 417-428.
- Lasa, G. et al., 2021. Measuring the User Acceptance: User-centered Methods and Co-creation Processes in Luminaire Development. *LED Professional Review*, Band 83, pp. 30-35.
- Lee, H. J., 2019. Is advancing circadian rhythm the mechanism of antidepressants?. *Psychiatry Investigation*, 16(7), p. 479.
- Lucas, R. J., Lall, G. S., Allen, A. E. & Brown, T. M., 2012. How rod, cone, and mel-anopsin photoreceptors come together to enlighten the mammalian circadian clock. *Progress in brain research*, Band 199, pp. 1-18.
- Menculini, G. et al., 2018. Depressive mood and circadian rhythms disturbances as outcomes of seasonal affective disorder treatment: a systematic review. *Journal of affective disorders*, Band 241, pp. 608-626.



- Mu, Y. M. et al., 2022. Alert-ing effects of light in healthy individuals: a systematic review and meta-analysis. *Neural Regeneration Research*, 17(9), p. 1929.
- Nagy, Z., Yong, F. Y. & Schlueter, A., 2016. Occupant centered lighting control: A user study on balancing comfort, acceptance, and energy consumption. *Energy and Buildings*, Band 126, pp. 310-322.
- Rahman, S. A., Hilaire, M. A. S. & Lockley, S. W., 2017. The effects of spectral tuning of evening ambient light on melatonin suppression, alertness and sleep. *Physiology & behavior*, Band 177, pp. 221-229.
- Rea, M. S., Nagare, R., Bierman, A. & Figueiro, M. G., 2022. The circadian stimulus-oscillator model: Improvements to Kronauer's model of the human circadian pacemaker. *Frontiers in Neuroscience*, 16(965525).
- Tanzer, K. & Rudolph, H., 2018. *Repro-light: Modularity, Sustainability & Personalization for the Lighting Industry*. Bregenz, Luger Research.
- Terman, M., Schlager, D., Fairhurst, S. & Perlman, B., 1989. Dawn and dusk simulation as a therapeutic intervention. *Biological Psychiatry*, 25(7), pp. 966-970.
- Terman, M. & Terman, J. S., 2005. Light therapy for seasonal and nonseasonal depression: efficacy, protocol, safety, and side effects. *CNS spectrums*, 10(8), pp. 647-663.
- Terman, M. & Terman, J. S., 2006. Controlled trial of naturalistic dawn simulation and negative air ionization for seasonal affective disorder. *American Journal of Psychiatry*, 163(12), pp. 2126-2133.
- Thompson, A., Jones, H., Gregson, W. & Atkinson, G., 2014. Effects of dawn simulation on markers of sleep inertia and post-waking performance in humans. *European journal of applied physiology*, 114(5), pp. 1049-1056.
- UL, 2019. *UL 24480: Design Guidelines for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active People*, Bensenville: Underwriters Laboratory Inc..
- Van de Werken, M. et al., 2010. Effects of artificial dawn on sleep inertia, skin temperature, and the awakening cortisol response. *Journal of sleep research*, 19(3), p. 42.
- Vethe, D. et al., 2021. The evening light environment in hospitals can be designed to produce less disruptive effects on the circadian system and improve sleep. *Sleep*, 44(3).
- Viola, A. U. et al., 2015. Dawn simulation light: a potential cardiac events protector. *Sleep Medicine*, 16(4), pp. 457-461.
- Weninger, J. & Canazei, M., 2018. Die Vorzüge der Unbestimmtheit. Beleuchtungslösungen im Internet of Things. In: *LICHT 6/2018*. München: Richard Pflaum Verlag, pp. 71-75.
- Weninger, J., Canazei, M. & Pohl, W., 2018. Die Wiederentdeckung des individuellen Lichtbedürfnisses. In: *LICHT 4/2018*. München: Richard Pflaum Verlag, pp. 28-33.