

Über die Energieeffizienz hinausgehen

Neue Möglichkeiten von LED-Beleuchtung

Aufgrund der pandemiebedingten Tendenz zu einer „Indoor-Gesellschaft“ und der deutlichen Zunahme des Bevölkerungsanteils älterer Menschen ist gutes und richtiges Licht wichtiger denn je



Schlaf und Erholung und in der Hellphase ein Maximum an Vitalität und Leistung zu ermöglichen. Unter dieser Abfolge hat sich im Laufe der Evolution unser Biorhythmus entwickelt – das zirkadiane System. Der zirkadiane Rhythmus wird hauptsächlich durch die Farbtemperatur und Intensität des Lichts beeinflusst bzw. ausgelöst. Licht ist ein wichtiger „Zeitgeber“ für die innere Uhr (Zellrhythmen, Schlaf-Wach-Zyklus, Organrhythmen). Auch die Wirkung der Farbtemperatur der typischerweise hinterleuchteten Displays von mobilen Geräten und Computern sowie Laptops ist ein bereits weithin bekannter Aspekt.

Die Allgemeinbeleuchtung in Innenräumen wird derzeit immer mehr am Energieverbrauch (und damit Klimaschutz) sowie an der Lichtqualität gemessen.

Richtiges Licht in Innenräumen

„Gesundes“ Licht fördert das Wohlbefinden. Im Folgenden soll gezeigt werden, warum die Nachahmung realer Tageslichtbedingungen mit erweiterten Tageslichtkurven und einer direkten und einer indirekten Komponente (CCT 1.800–16.000 K) neben vollem kontinuierlichen Spektrum und hoher Farbwiedergabe unerlässlich ist.

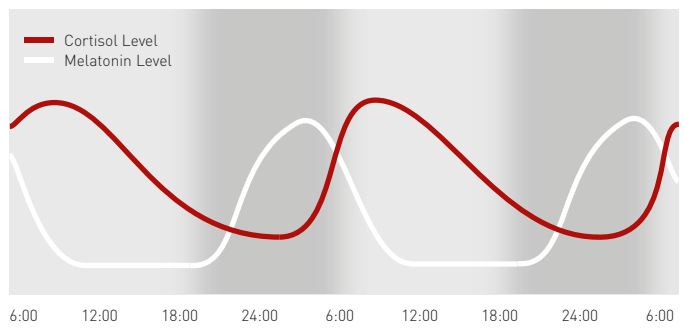
Eine ganzheitliche melanopische Lichtlösung trägt dazu bei, das Wohlbefinden, die Vitalität, die Gesundheit, die Aufmerksamkeit, die Konzentration, die Genesung, die Stressreduktion, die Entspannung sowie den natürlichen Schlaf-Wach-Rhythmus positiv zu beeinflussen. Mit dynamischen Lichtlösungen können darüber hinaus aber auch neue, veränderbare Raumatmosphären erzeugt werden.

Der natürliche Tag-Nacht-Rhythmus ist darauf ausgelegt, dem Menschen in der Dunkelphase ein Optimum an

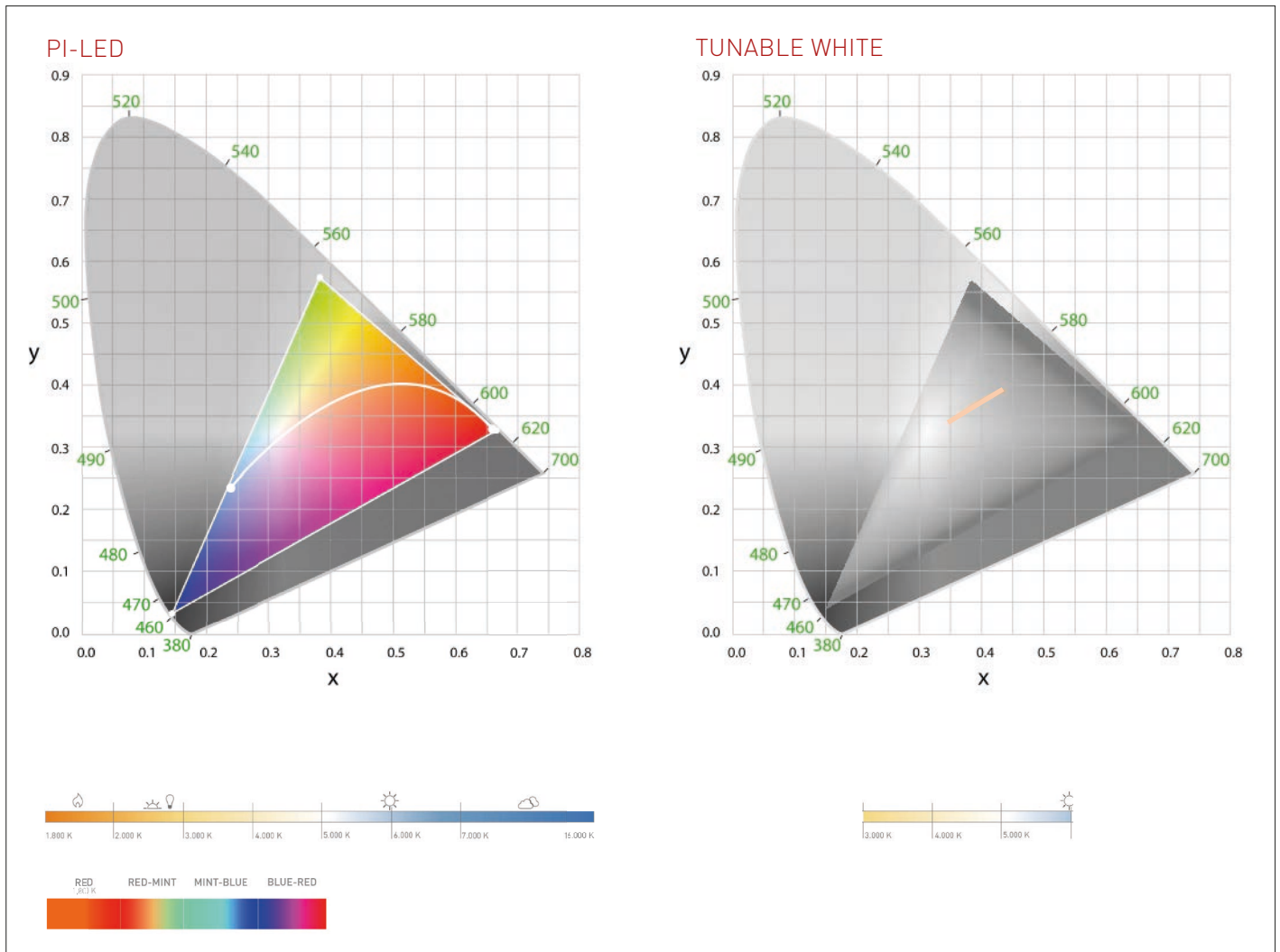
LICHTWIRKUNG AUF DEN MENSCHEN



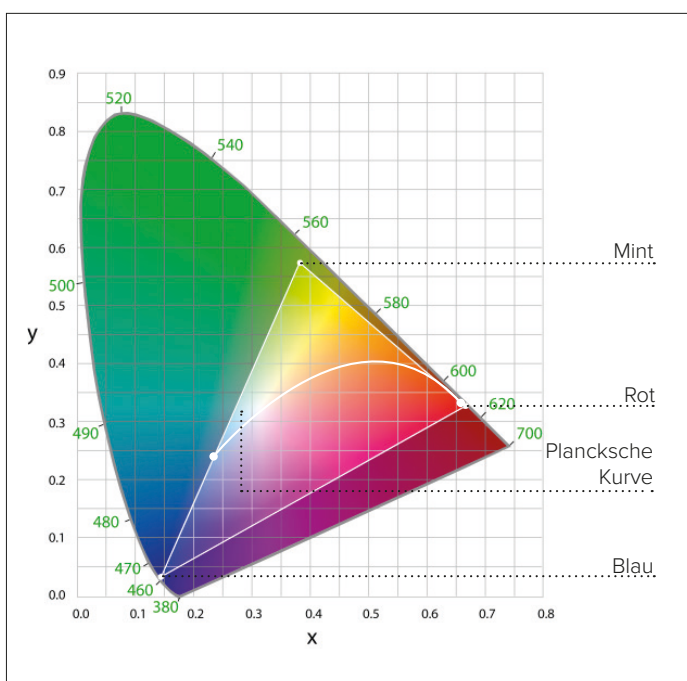
DER CIRCADIANE RHYTHMUS



Die Wirkung verschiedener CCTs auf den Menschen



Gegenüberstellung der Möglichkeiten von PI-LED vs. TunableWhite (2-Kanal, weiß/weiß)



CIE-Chart: High-End-3-Kanal- PI-LED-Technologie

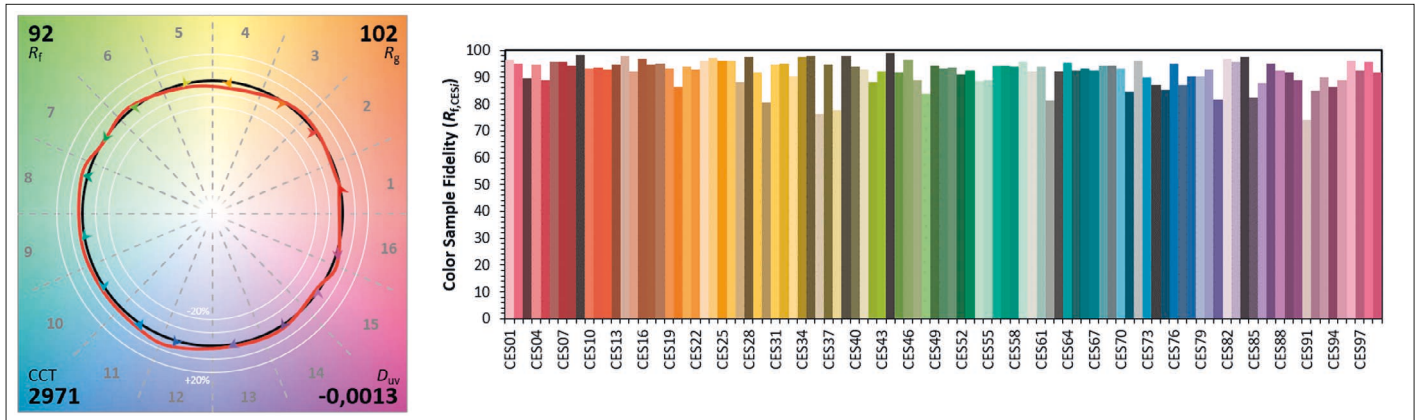
App-Anwendungen, welche die Farbtemperatur benutzergesteuert oder zeitgesteuert z.B. gegen Ende des Tages in Richtung warmweiß ändern, sollen das Problem des deutlich späteren und verzögerten Einschlafens reduzieren und sind mittlerweile gebräuchlich. Der Einfluss der Farbtemperatur in diesem Bezug zählt inzwischen zum Allgemeinwissen. Der Nobelpreis für Medizin 2017 wurde für die Forschungen zum zirkadianen Rhythmus an die US-Amerikaner Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash und Michael W. Young verliehen.

Indoor-Gesellschaft

Das Wohlbefinden des menschlichen Organismus und aller beteiligten biologischen Prozesse hängt stark von natürlichem Tageslicht ab. Da jedoch große Teile des modernen Lebens in geschlossenen Räumen mit statischer Beleuchtung stattfinden, kann

der natürliche Verlauf des Tageslichts nicht mehr wahrgenommen werden. Dies ist von besonders hoher Relevanz für Bereiche, in denen sich Menschen in der Regel über längere Zeit in Innenräumen aufhalten. Krankenhäuser und Altenheime aber natürlich auch Büros und Arbeitsplätze können hier als Beispiele genannt werden. Es liegt auf der Hand, dass die konventionelle, künstliche Beleuchtung mit ihren in den meisten Fällen einheitlichen, unveränderlichen statischen Eigenschaften keine positiven Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, das Wohlbefinden und die Leistung haben kann.

Natürliches Tageslicht wäre selbstverständlich das beste Licht, ist aber in ganz vielen Fällen z.B. aufgrund urbaner baulicher Situationen und Bedingungen (Stichwort: Abschattung) nicht entsprechend verfügbar. Des Weiteren kann direkte Sonneneinstrahlung (wenn überhaupt) meist nur in sehr



ANSI-IES TM-30-18 (Beispiel)

CCT	CRI	Ra9
2673	93	90
2982	94	95
3995	96	95
7060	92	89
16759	85	79

CRI/Ra9 (Beispiel)

begrenztem Umfang und damit sehr oft in nicht ausreichendem Ausmaß in die Tiefen der Räume eindringen.

Alternde Gesellschaft

Vor allem in der nördlichen Hemisphäre erhöht sich die Zahl der älteren Men-

schen radikal. Die Babyboomer bewegen sich immer mehr in Richtung „Alte“ und die Gruppe der über 65-Jährigen wird in den nächsten Jahrzehnten vermutlich viel schneller wachsen als die Gesamtbevölkerung.

Ältere Menschen benötigen aufgrund von fortschreitender altersbedingter Trübung der Augenlinse tendenziell mehr Licht für die Erledigung ihrer Sehaufgaben. Dem kann – als herkömmliche Maßnahme – durch Erhöhung der Lichtintensität Rechnung getragen werden. Alternativ kann man die Lichtspektren so anpassen, dass zur richtigen Tageszeit das richtige Licht zur Verfügung steht. Hierzu muss die Lichtleistung nur geringfügig erhöht werden, und das gewünschte Ziel lässt sich mit dem Zusatznutzen von Wohlbefinden und Gesundheit erreichen, während gleichzeitig Energie eingespart werden kann.

Die Babyboomer haben höhere Ansprüche, sind technologisch orientierter und haben stärker segmentierte und differenzierte Bedürfnisse als frühere Generationen. Darum und um die oben beschriebenen Vorteile zu nutzen (mit anderen Worten: um authentisches Human Centric Lighting zu generieren) bedarf es einer ausgeklügelten Steuerungsarchitektur mit der Möglichkeit persönlicher Anpassung.

Human Centric Lighting

HCL stellt sich dieser Herausforderung: Es ahmt die spektrale Qualität des natürlichen Tageslichts über den ganzen Tag nach, sodass die menschlichen Hormonspiegel ausgeglichen bleiben – auch unter künstlicher Beleuchtung. Dies hat eine positive Wirkung auf Körper und Geist und Leistungs-

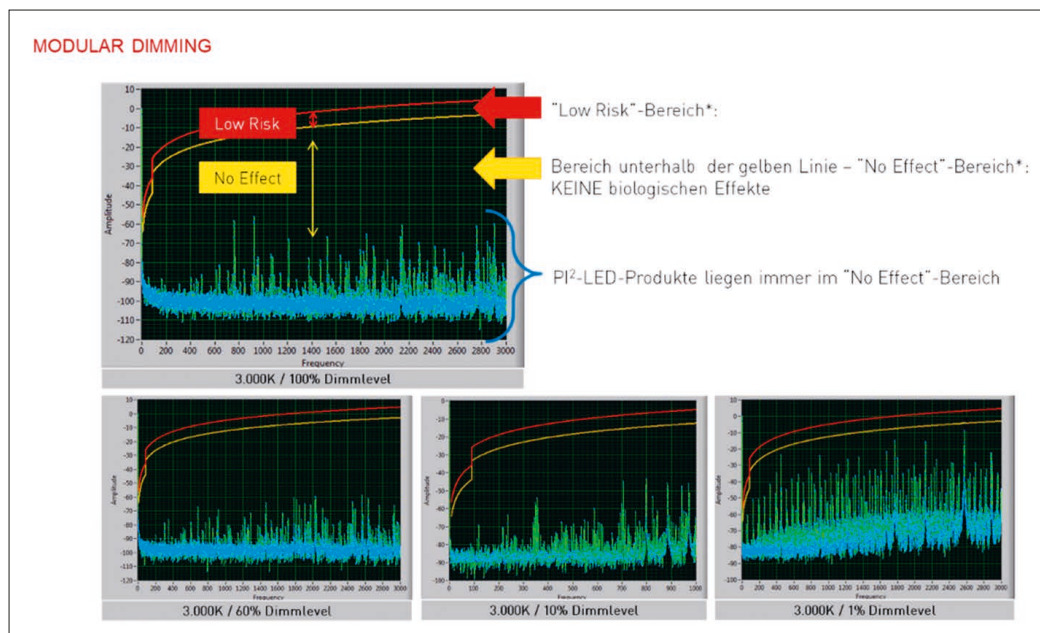
steigerung und Konzentrationssteigerung sind die Folge [1].

Der nächste Schritt nach der Integration von LED-Quellen in die Allgemeinbeleuchtung besteht also darin, die gegebenen und bestehenden Möglichkeiten zu nutzen, über die Energieeffizienz hinauszugehen und in eines der vielversprechendsten und am schnellsten wachsenden Segmente in der Welt des Lichts zu führen [2, 3].

Der zirkadiane Rhythmus

Der natürliche Tag-Nacht-Rhythmus ermöglicht es Menschen, gut zu schlafen und sich zu regenerieren. Im Laufe der menschlichen Evolution hat unser Körper auf der Grundlage dieser Sequenz einen Biorhythmus entwickelt – den zirkadianen Rhythmus. Neben den Stäbchen und Zapfen, die für unser visuelles Sehen verantwortlich sind, verfügt das menschliche Auge auch über sogenannte nichtvisuelle Photorezeptoren, die den zirkadianen Rhythmus spürbar beeinflussen (intrinsisch photosensitive retinale Ganglienzellen, ipRGC, sensitiv für blaue Spektralwellenlängen). Diese melanopsinhaltenen Rezeptoren steuern unser Hormongleichgewicht, insbesondere die Regulation von Melatonin, Cortisol und Serotonin, die für unser Schlaf-Wach-Muster verantwortlich sind.

Genau hier setzt authentisches Human Centric Lighting auf Basis von PI-LED an – mit dem Ziel, den menschlichen zirkadianen Rhythmus zu unterstützen und die natürliche Melatoninproduktion im Gleichgewicht zu halten. Wie im Bild dargestellt, hat kaltes Licht mit einem hohen Blauanteil eine vitalisierende Wirkung und fördert die Freisetzung von Serotonin und Cortisol bei gleichzeitiger Verringerung von



Modular Dimming



HCL-Design-Leuchte VIBE in PI-LED-Technologie mit Direkt- und Indirektanteil (Quelle: Kiteo)

Melatonin. Körperliche Fitness, geistige Leistungsfähigkeit und Wachsamkeit werden deutlich erhöht. Warmes Licht mit sehr niedrigem Blauanteil unterdrückt hingegen die Freisetzung von Melatonin nicht und fördert so Entspannung und Regeneration.

Inspiziert von der Sonne

Je besser und genauer künstliche Beleuchtung es schafft, unsere evolutionär prägende Lichtquelle Sonne nachzubilden, desto angenehmer und perfekter erleben wir dieses Licht. HCL-Lösungen imitieren das kontinuierliche Spektrum des Sonnenlichts im Laufe des Tages, ohne unerwünschte ultraviolette oder Infrarotstrahlung zu emittieren. Diese außergewöhnliche Lichtqualität konnte und kann mit herkömmlichen Lichtkonzepten nicht erreicht werden. Auch bei einem simplen 2-Kanal-Weiß-Weiß-System ist dies (über andere Einschränkungen und Limitationen hinaus) nicht möglich, insbesondere wegen des begrenzten CCT-Bereichs, welcher zudem nicht der Planck'schen Kurve folgt (Bild). Zu den Voraussetzungen, um Sonnenlicht zu nachzuahmen: Die Farbtemperaturen müssen entlang der Planck'schen Kurve automatisch einstellbar sein, um im Laufe des Tages natürliches Tageslicht nachzuahmen (einschließlich saisonaler und nicht-saisonaler Veränderungen sowie geographischer Lage/Ausrichtung). Notwendig ist hier ein Farbtemperaturbereich von 1800 K („Sonnenaufgang“) bis 16.000 K („blauer Himmel“) mit kontinuierlichem Spektrum und mit hoher Farbwiedergabe für höchste Farbauthentizität (und darüber hinaus individueller Kontrolle der Farben).

Eine weitere Voraussetzung ist eine 100%-ige Kalibrierung und Temperaturkompensation für minimale Farbtoleranzen (MacAdams typ. 1). Dies kann auf Basis einer High-End-3-Kanal-PI-LED-Technologie erreicht werden, bestehend aus Rot, Blau und Mint-Weiß, die individuell gesteuert werden und hinsichtlich Temperatur und Intensität optimal aufeinander abgestimmt sind (Bild).

Durch die unabhängige Steuerung des blauen Kanals kann zusätzlich ein angenehmes Bernsteinlicht erzeugt werden – z.B. für Nachtlicht, um unerwünschte Aktivierungen zu vermeiden. Mit der PI-LED-Technologie sind Lichtfarben von 1800 bis 16.000 K stufenlos möglich und dies flickerfrei mit einem kontinuierlichen Spektrum und einer hohen Farbwiedergabe. Darüber hinaus können zahlreiche Farben, wie sie in der Natur vorkommen, nachgestellt werden (Morgenröte, Sonnenuntergangsstimmung, Kaminfeuer, Blaue Stunde u.v.m.). Durch die zusätzliche Möglichkeit, Farben zu generieren, ist auch Stimmungslicht realisierbar. All dies mit ein und derselben Lichtquelle resp. Leuchte, nach dem Prinzip, zu animieren und nicht zu manipulieren.

Grundsätzliche Anforderungen an Lichtqualität

Bei Systemen mit einem eigenen Rot-Kanal ist zusätzlich eine hohe Farbwiedergabe im wichtigen R9-Index möglich (Stichwort: Hauterscheinung etc., s. Bilder).
Flickerfreiheit: keine biologischen Effekte gemäß IEEE 1789-2015 bei Modular Dimming, s. Bild

Tageslicht ist immer eine Kombination aus direkter Sonneneinstrahlung und diffuser Strahlung vom Himmel. Sonnenlicht wird je nach Wellenlänge in unterschiedlichem Maße von der Atmosphäre absorbiert. Im Jahresdurchschnitt erreicht das meiste Licht die Erdoberfläche in Form von direktem Licht; der kleinere Teil ist indirektes Licht aufgrund von Luftmolekülen, Aerosolen oder Wolken, welche die Strahlung streuen. Nur ein bestimmter Teil dieser gesamten Sonneneinstrahlung ist sichtbar und kann vom menschlichen Auge wahrgenommen werden. Die Intensität der Strahlungsenergie hängt jedoch stark von der Position der Sonne zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten ab. Entscheidend für jede entsprechende Lösung ist eine automatisierte Kontrolle, die von sich aus die Tageszeit innerhalb des Jahres und den Breitengrad berücksichtigt. Eine Lichtsituation mit direkter (Sonne) und indirekter Komponente (Himmel) ist entscheidend, um einen Horizont

für die unbewusste Orientierung zu bieten (Bild). Weiter ist eine individuelle Einstellung der Lichtbedingung (Farbtemperaturkurve, Lichtpegel) nach persönlichen Vorlieben und/oder Befindlichkeit resp. Gemütslage notwendig.

Melanopischer Wirkfaktor

Die sich verändernde Farbtemperatur und -intensität des Tageslichts sind nicht die einzigen entscheidenden Faktoren für die Synchronisation der „inneren Uhr“. Weitere wichtige Elemente sind die Richtung und Planarität der Lichtquelle, die unsere Augen erreicht. Biologisch wirksame Beleuchtung berücksichtigt all diese Faktoren tageszeitabhängig. Dies erfordert einen ganzheitlichen Designansatz, der auch aus einer Lichtplanung einschließlich des melanopischen Wirkfaktors nach CIE DIS 026/E:2018 besteht (Bild). Ein richtiges Lichtdesign muss die kritischen Werte für das melanopisch bewertete Tageslichtäquivalent der Beleuchtungsstärke auf dem Auge zur Aktivierung

CCT [K]	VISUELL			BIOLOGISCH	MELANOPISCHER WIRKFAKTOR
	Lichtstrom [lm]			alpha(smel)	
	dir. opal	dir. Prisma	indir.		
1.800	1960	1800	1000	0,258	
2.000	2220	2040	1125	0,293	
2.500	2900	2665	1460	0,371	
2.700	3190	2930	1600	0,400	
3.000	3500	3200	1700	0,440	
3.500	3330	3045	1625	0,501	
4.000	3220	2950	1575	0,554	
4.500	3150	2880	1540	0,602	
5.000	3095	2835	1520	0,645	
5.500	3060	2800	1505	0,683	
6.000	3030	2775	1495	0,716	
6.500	3005	2755	1490	0,748	
7.000	2990	2740	1480	0,775	
8.000	2940	2635	1475	0,821	
9.000	2720	2440	1470	0,858	
10.000	2560	2300	1470	0,888	
12.000	2350	2110	1470	0,933	
14.000	2220	1990	1465	0,965	
16.000	2125	1910	1465	0,989	

Beispiel für die Angabe des melanopischen Wirkfaktors (Quelle: Kiteo)

(>250 melanopische Lux) und Entspannung (<100 melanopische Lux) berücksichtigen. Dazu ist als Voraussetzung die Angabe der Werte durch den Leuchten-resp. Leuchtmittelhersteller erforderlich.

Anwendungen/ Applikationen – Vorteile

Die angeführten Überlegungen bzw. Ansätze kommen bei praktisch allen Aufgabenstellungen an Allgemeinbeleuchtung in Indoor-Situationen zum Tragen, wie Schauräume, Seminarräume oder Sitzungszimmer. Die Vorteile sind in den allermeisten Fällen ein verbesserter Tag-Nacht-Rhythmus und demzufolge ein besserer Wach-Schlaf-Zyklus. Im Folgenden taxativ die daraus resultierenden Mehrwerte:

- erhöhte Mitarbeiterzufriedenheit
- Produktivitätssteigerung
- naturgetreue Wiedergabe der Farben im Shop und geringere Umtauschzahlen

- Längere Verweildauer der Kunden
- Steigerung der Kundenzufriedenheit
- Schaffung von Wohlfühloasen
- reduzierter Stresslevel (vor Operationen) und positive psychische Stimulation
- Reaktivierung der „inneren Uhr“ von Demenzpatienten (in früher Phase) [4]
- erhöhte Konzentration

Neuste Erkenntnisse

Es ist bereits bekannt, dass Licht die Wachsamkeit und Leistung beeinflusst. Neueste wissenschaftliche Erkenntnisse der Fachhochschule München zur Beleuchtung typischer kognitiver Aufgaben (Büro/Bildung) besagen außerdem, dass es für die aufgewendete Anstrengung – gemessen am Anstieg der Herzkontraktionskraft – einen nachgewiesenen und deutlichen Unterschied macht, ob Licht dynamisch oder nur statisch ist [6]. Die Beleuchtungskomponen-

ten müssen einen großen Dynamikumfang erlauben und die Beleuchtungssteuerung muss diesen Wechsel automatisiert umsetzen.

Dynamische Beleuchtung (in Bezug auf wechselnde/veränderbare CCT) ist eine ergonomische Maßnahme. Es ist davon auszugehen, dass die in der betreffenden Studie festgestellten akuten Effekte zu den positiven mittel- bis langfristigen circadianen Effekten dynamischer Beleuchtung hinzukommen.

Schlussfolgerung

Authentisches Human Centric Lighting erfüllt den visuellen und biologischen sowie den emotionalen Aspekt (Bild) und unterstützt die langfristige Gesundheit, das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen. Auf der Grundlage eines ganzheitlichen Lichtdesigns gibt es also ein hohes Potenzial, das allen Menschen zugutekommen kann.

Literatur

- [1] The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance, 2007 Mills et al; license BioMed Central Ltd. Peter R. Mills, Susannah C. Tomkins and Luc JM Schlangen
- [2] Human Centric Lighting: Going Beyond Energy Efficiency, ZVEI July 2013
- [3] Global Human Centric Lighting and Environmental Lighting, Market Research Report 2018
- [4] Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Herbert Plichke www.lichtnet.de
- [5] Octavio Perez, PhD Mount Sinai Hospital NYC LpR Nov/Dec 2018 Issue 70 p. 38
- [6] Influence of common lighting conditions and time-of-day on the effort-related cardiac response Johannes Zauner et al. (Oct. 2020)