



## **Biodynamische Beleuchtung**

# **– Die Wirkung von Licht auf den Menschen in Hinblick auf anwendungsspezifische Umsetzungen biologisch wirksamer Beleuchtung in der Praxis**

Agnes Lachner <sup>1</sup>, Silke Weidenfeld <sup>2</sup>, Florian Schutzbach <sup>3</sup>

<sup>1</sup> a.lachner@waldmann.com

<sup>2</sup> s.weidenfeld@waldmann.com

<sup>3</sup> f.schutzbach@waldmann.com

<sup>1,2,3</sup> Herbert Waldmann GmbH & Co.KG,

Villingen-Schwenningen, Deutschland

**DOI: 10.14464/awic.v3i0.296**

### **ABSTRACT**

Natürliches Licht ist für Menschen unentbehrlich. Es unterstützt das Sehen, sorgt für Wohlbefinden und beeinflusst unsere Aktivierungs- und Erholungsphasen. Somit wirkt es dreifach: visuell, emotional und biologisch. Die biologische Wirkung des Lichts taktet die innere Uhr des Menschen. Vor allem der dadurch beeinflusste Anteil der Hormone Cortisol und Melatonin im Körper bestimmt Schlaf- und Wachphasen, aber auch Herzfrequenz, Blutdruck und Stimmung.

Lange Zeiten, in denen Menschen heute künstlichem Licht und damit oft biologischer Dunkelheit ausgesetzt sind, machen eine gute Beleuchtung umso wichtiger. Biodynamisches Licht (Human Centric Lighting) kann vor allem in Räumen mit wenig Tageslichtversorgung sowie in den Wintermonaten, wenn die innere Uhr kaum mit dem Tageslicht synchronisiert wird, das Wohlbefinden nachhaltig stärken. Das Waldmann Lichtmanagementsystem VTL entstand in enger wissenschaftlicher Abstimmung. Es bringt die Dynamik des natürlichen Tageslichts in Innenräume und erweitert dadurch die emotionalen und ergonomischen Aspekte der Lichtqualität. Im Büro, in der Industrie und in Pflege- und Gesundheitseinrichtungen.

**Keywords:** *natürliches Licht, biodynamisches Licht, Arbeitsumwelt, Human Centric Lighting*

# **1 LICHT DIENT MEHR ALS DEM SEHEN**

Licht beeinflusst den Menschen. Es hat eine essentielle Bedeutung, die weit über die visuelle Funktion hinausgeht. Der wissenschaftliche Beleg für die nicht-visuellen Wirkungen ist noch relativ jung. Erst 2001 wurden in der Netzhaut des Auges neben den Stäbchen und Zapfen weitere Fotorezeptoren entdeckt, die äußerst sensibel auf Licht mit hohen Blauanteilen reagieren (Brainard et al., 2001; Thapan et al., 2001). Diese dritten Fotorezeptoren dienen nicht dem Sehen, sondern nehmen Einfluss auf den Biorhythmus des Menschen (Berson, 2002; Hattar, 2002). Licht hat somit entscheidenden Einfluss auf die menschliche Gesundheit, Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden.

Der moderne Mensch hält sich vorwiegend in künstlich beleuchteten Innenräumen und damit in „biologischer Dunkelheit“ auf, das bleibt nicht ohne Auswirkungen. Viele Arbeitsplätze haben eine geringere Tageslichtwirkung, insbesondere in großen Gebäuden mit hoher Gebäudetiefe oder bei enger Bebauung. Selbst die Art der Verglasung spielt eine Rolle. Hierdurch geht der dynamische Verlauf des Tageslichts verloren. Das hat Einfluss auf die innere Uhr.

Eine künstliche Beleuchtung, die die Dynamik des Tageslichts nachahmt, kann dem entgegenwirken. In Büros sowie Pflege- und Gesundheitseinrichtungen kommt diese biologisch wirksame Beleuchtung bereits seit Jahren zum Einsatz. Doch in der Industrie gibt es noch keine standardisierten Lösungen. Deshalb ist es Ziel dieses Beitrags praktische Umsetzungen und bestehende Hürden näher zu beleuchten. Dazu werden zunächst die theoretischen Grundlagen zu den Wirkungen von Licht auf den Menschen näher betrachtet. Darauf aufbauend, wird die Umsetzung in der Praxis in verschiedenen Anwendungsbereichen beispielhaft erläutert und ein Ausblick auf die bevorstehenden Entwicklungen gegeben.

## **2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN DER NICHT-VISUELLEN LICHTWIRKUNG**

### **2.1 DIE ENTDECKUNG DES DRITTEN FOTOREZEPTORS**

Seit den 80er Jahren wird vermutet, dass neben den bisher bekannten Stäbchen und Zapfen weitere Fotorezeptoren im Auge existieren. Diese Vermutung beruht auf Versuchen mit blinden Menschen mit fehlender Stäbchen- und Zapfenfunktion aber intaktem Tag-Nacht-Rhythmus, wobei eine lichtinduzierte Unterdrückung der Melatoninsekretion beobachtet wurde (Czeisler et al., 1995)

2001 wurde zunächst indirekt über die nächtliche lichtinduzierte Melatoninsuppression ein neuer Fotorezeptor aus der Gruppe der Ganglienzellen nachgewiesen (Brainard et al., 2001; Thapan et al., 2001). Die sogenannten intrinsischen fotosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC) besitzen das lichtempfindliche Fotopigment Melanopsin, wodurch sie die Eigenschaft eines eigenständigen (intrinsisch) Fotorezeptors erlangen (Berson, 2002). Es wird auch von melanopsinhaltigen Ganglienzellen gesprochen. IpRGCs werden in fünf verschiedene

Subtypen (M1 bis M5) untergliedert, welche sowohl visuelle als auch nicht-visuelle Funktionen besitzen. Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit von Melanopsin befindet sich im kurzwelligeren Bereich des sichtbaren Lichtes bei 480 nm (Hattar, 2002).

Mit 0,2 % der gesamten Ganglienzellen nehmen sie nur einen sehr geringen Anteil ein (Dacey et al., 2005). Die ipRGC sind über die ganze Netzhaut verteilt, wobei die höchste Empfindlichkeit zur Melatoninsuppression im unteren nasalen Bereich des Auges nachgewiesen wurde (Dacey et al., 2005; Rüger et al., 2005).

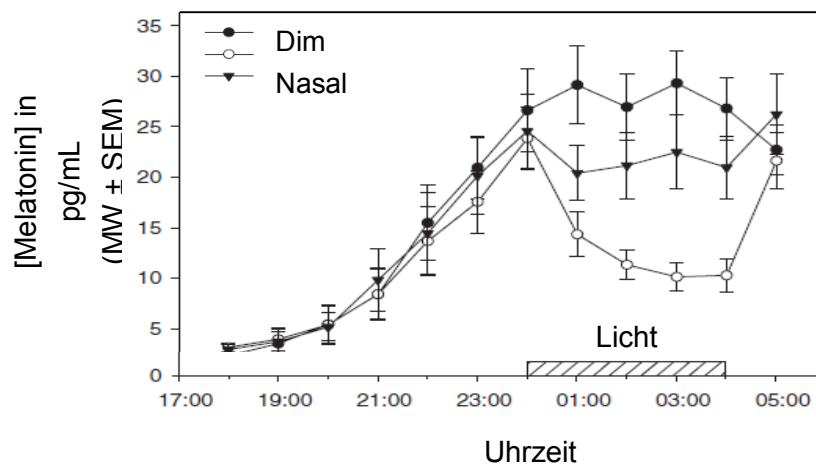


Abbildung 1: Melatoninsuppression in Abhängigkeit von der Beleuchtung des Netzhautbereiches.

Quelle: Rüger, 2005

Im Gegensatz zu den Fotorezeptoren des visuellen Systems (Stäbchen und Zapfen) dienen die ipRGCs nicht dem Sehen, sie registrieren die Helligkeit in der Umgebung und regulieren biologische Prozesse im Körper (Hatori et al., 2008). Sie sind primär für die Vermittlung von nicht-visuellen Lichtwirkungen verantwortlich. Die melanopsinhaltigen Ganglienzellen leiten Lichtinformationen aus der Umwelt über den retinohypothalamischen Trakt (RHT) an den suprachiasmatischen Nucleus (SCN), unserer inneren Uhr im Gehirn und haben direkten Einfluss auf das circadiane System.

Die Axone der klassischen Ganglienzellen zweigen nach der Sehnervenkreuzung (Chiasma opticum) zum visuellen Cortex des Großhirns ab, wohingegen die Axone der ipRGCs früher aus dem N. opticus (II) austreten und in verschiedene Gehirnareale projizieren (Abbildung 2).

Die neuronale Verbindung der ipRGCs zum SCN stellt eine Untereinheit des N. opticus (II) dar und wird als retinohypothalamischer Trakt bezeichnet. Im SCN wird ein circadianes Signal erzeugt, welches an sympathische Nervenfasern im Rückenmark weitergeleitet wird und über das obere Halsstrang-Ganglion (ganglion cervicale superior) die Zirbeldrüse (glandula pinealis) aktiviert. Nachts führt dies zur Ausschüttung des Hormons Melatonin (Korf, Stehle, 2005).

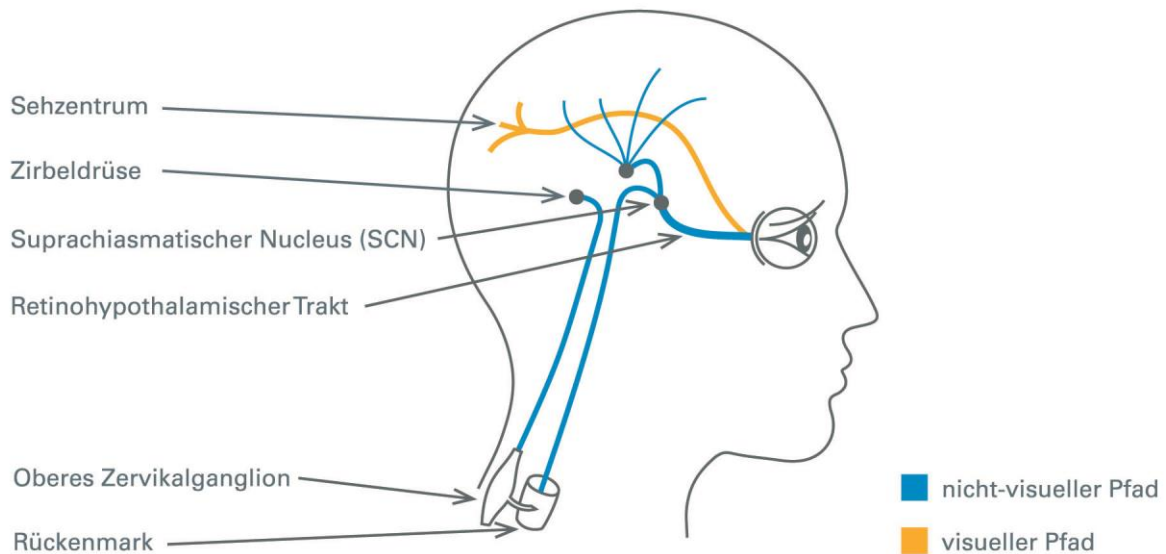


Abbildung 2: **Visueller Pfad:** Licht dringt durch Hornhaut, Pupille, Linse und Glaskörper und gelangt auf die Netzhaut. Dort befinden sich lichtempfindliche Sinneszellen, die ankommende Lichtinformationen in elektrische Impulse umwandeln. Über die Sehbahn werden die Signale zum visuellen Kortex im Gehirn geleitet und dort in Bildinformationen verarbeitet. **Nicht-visueller Pfad:** Lichtinformationen werden von den Axonen der ipRGCs über den retinohypothalamischen Trakt (RHT) zum suprachiasmatischen Nucleus (SCN), unserer inneren Uhr, geleitet. Dort wird ein circadianes Signal generiert.

Quelle: Herbert Waldmann GmbH & Co. KG, adaptiert nach Plischke, 2016

## 2.2 DIE INNERE UHR IM SCN UND DER MENSCHLICHE BIORHYTHMUS

Im menschlichen Körper läuft jeden Tag das gleiche Programm ab. Viele Körperfunktionen folgen dabei einem definierten Rhythmus, welcher von der „inneren Uhr“ generiert wird. So taktet die „innere Uhr“ physiologische und psychologische Funktionen, welche wesentlich vom Licht gesteuert und unterstützt werden.

Je nach Periodenlänge werden in der Chronobiologie drei Rhythmen unterschieden – ultradiane Rhythmen (wenige Stunden), circadiane Rhythmen (etwa 24 h) und infradiane Rhythmen (länger als 24 h).

Der Rhythmus der inneren Uhr ist genetisch in uns verankert. Greifbar ist hier der Schlaf-Wach-Rhythmus des Menschen, welcher einer circadianen Rhythmik folgt. Uhrengene bestimmen, ob die innere Uhr kürzer oder länger als 24 programmiert ist. Diese Ausprägung wird als individueller Chronotyp bezeichnet (Roenneberg, 2012). Hierbei werden Morgentypen/Lerchen, Intermediäre Typen und Abendtypen/Eulen unterschieden. Die Länge dieser endogen erzeugten Rhythmen variiert inter- und intraindividuell und werden von weiteren Faktoren wie z.B. dem Alter und dem Geschlecht beeinflusst (Hofstra, Weerd 2008). Im Durchschnitt folgt der endogene circadiane Rhythmus einer Länge von 25 Stunden (Wever 1979; Aschoff 1965).

Beim Menschen befindet sich direkt oberhalb der Sehnervenkreuzung in einem kleinen Bereich des Hypothalamus im Gehirn der suprachiasmatische Nucleus (SCN), welcher als Sitz der inneren zentralen Uhr (Master clock) identifiziert wurde. Hormone und Botenstoffe nehmen von hier aus ihren Lauf, wodurch periphere Uhren im Körper getaktet werden. Neben der Synthese von Hormonen wie Melatonin, Cortisol und Insulin taktet die innere Uhr noch weitere circadiane Funktionen im Körper (Abbildung 3) (Hofstra, Weerd, 2008). Hierzu zählen beispielsweise die Konzentrationsleistung, der Schlaf-Wach-Rhythmus sowie die Steuerung vegetativer Funktionen wie der Körpertemperatur, der Verdauung, der Herzfrequenz und des Blutdrucks (Hastings et al., 2007). Die Länge dieser endogen erzeugten Rhythmen folgt unter natürlichen Bedingungen (Tag/Nacht-Wechsel) einer Periodendauer von ungefähr 24,2 Stunden weshalb auch vom circadianen Rhythmus (circa = ungefähr, dies = Tag) gesprochen wird (Czeisler et al., 1999). Unter isolierten Bedingungen entspricht die Periodendauer dieser circadianen Rhythmik nicht genau 24 Stunden, weshalb es einer Synchronisation der inneren Uhr mit äußeren Zeitgebern bedarf. Die Synchronisation (Entrainment) des circadianen Systems erfolgt beim Menschen über die ipRGCs der Netzhaut, die synchronisierende Reize aus der Umwelt an den SCN über den retinohypothalamischen Trakt (RHT) vermitteln (Hofstra, Weerd, 2008; Czeisler et al., 1999; Berson et al., 2002; Moore, 1996). Tageslicht und Dunkelheit sind hierbei die stärksten Zeitgeber, die unsere innere Uhr takten (Wever, 1989). Als Zeitgeber können auch die Aufnahme von Nahrung, körperliche Aktivitäten, Temperaturschwankungen sowie soziale Interaktionen wirken (Duffy, Wright, 2005), welche jedoch dem Zeitgeber Licht nachgestellt sind.

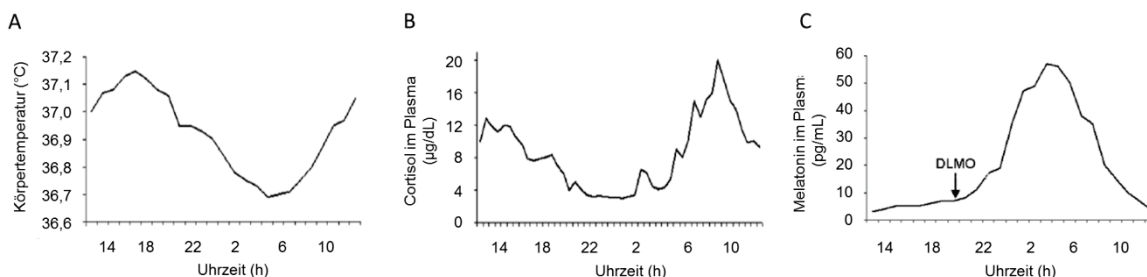


Abbildung 3: Circadiane Rhythmik der Körpertemperatur sowie der Hormone Cortisol und Melatonin. (A) Die maximale Körpertemperatur wird spätnachmittags erreicht und sinkt in der zweiten Nachthälfte auf ein Minimum ab. (B) Die beiden Hormone Cortisol und Melatonin wirken antizyklisch. Morgens produziert der Körper das Hormon Cortisol, welches gegen 9 Uhr seine maximale Konzentration im Blut erreicht. (C) Die Melatoninproduktion beginnt erst am Abend und wird durch den dim light melatonin onset (DLMO) angezeigt.

Quelle: Adaptiert nach Hofstra, Weerd, 2008

Melatonin und Cortisol sind die wichtigsten Hormone, die den biologischen Rhythmus steuern. Ihre Produktion folgt einem klar definierten Rhythmus, weshalb sie ein nützlicher, nach außen messbarer Marker für die Phasenlage der inneren Uhr im SCN sind.

### **2.2.1. MELATONIN**

Melatonin ist ein kleines lipophiles Indolhormon, welches bei Dunkelheit hauptsächlich in der Epiphyse (syn. Pinealorgan, Zirbeldrüse) aus der aromatischen Aminosäure L-Tryptophan synthetisiert wird und pulsatil in den Blutstrom abgegeben wird.

Unter normalen Bedingungen (synchronisierter 24-h Tag/Nachtwechsel) beginnt die Melatoninsynthese am Abend zwischen 20:00 und 23:00 Uhr (DLMO = dim light melatonin onset). Melatonin sorgt für die Entschleunigung vieler Körperfunktionen und macht den Menschen müde. Zwischen 02:00 und 04:00 Uhr wird die höchste Konzentration erreicht. Am Morgen gegen 8:00 – 10:00 Uhr sinkt der Melatoninspiegel auf die Ausgangskonzentration zurück. Am Tag ist kaum Melatonin nachweisbar. Der kurzweilige Spektralbereich von Tageslicht bewirkt die Suppression von Melatonin (Abbildung 3 C). Der individuelle Rhythmus hängt vom Chronotyp ab.

Aufgrund der geringen Molekülgröße (320 Da) ist Melatonin in der Lage physiologische Barrieren wie die Blut-Hirn-Schranke oder Blut-Plazenta-Schranke zu durchdringen (Langer et al., 1997; Reiter, 1993; Pardridge, Mietus, 1980). Melatonin kann daher in vielen Körperflüssigkeiten und Geweben wie Urin (Fellenberg et al., 1980), Speichel (Miles et al., 1985), Liquor (Smith et al. 1976), Fruchtwasser (Mitchell et al., 1978), Muttermilch (Illnerová et al., 1993) und Sperma (van Vuuren et al., 1988) nachgewiesen werden.

Aufgrund seiner vielen Zielorte werden zahlreiche Prozesse im Körper von Melatonin beeinflusst. Einer der wichtigsten Wirkungen beim Menschen ist die Steuerung des Tag-Nacht-Rhythmus (Brzezinski, 1997). Melatonin beeinflusst mehrere vegetative Funktionen. Es senkt den Blutdruck, die Herzfrequenz sowie den Spiegel von Cholesterin und Triglyceriden im Blut (Chuang et al., 1993; Müller-Wieland et al., 1994; Hoyos et al., 2000). Melatonin wirkt als Antioxidans, indem es freie Radikale abfängt (Poeggeler et al., 1993). Melatonin ist ebenso in der Lage die Immunfunktion zu beeinflussen. Ein Mangel an Melatonin wird mit Schlafstörungen, Störungen der allgemeinen Befindlichkeit und der Vigilanz sowie Depression in Verbindung gebracht (Claustrat et al., 2005; Obayashi et al., 2015).

### **2.2.2 CORTISOL**

Cortisol ist ein lipophiles Hormon, welches zur Gruppe der Glucocorticoide zählt. Es wird in der Zona fasciculata, der Nebennierenrinde, synthetisiert und pulsatil in den Blutstrom abgegeben (Silverthorn, 2009). Die Cortisolsynthese folgt dabei einem circadianen Rhythmus. Etwa 30 bis 60 Minuten nach dem Aufwachen erreicht die Cortisolkonzentration ihren maximalen Wert. Über den Tag hinweg sinkt die Cortisolkonzentration ab und erreicht um Mitternacht ihr Tief (Clow et al., 2004). Cortisol hat eine Vielzahl von Wirkungen auf den Stoffwechsel. Es zählt zu den Stresshormonen und ist in der Lage Energieträger wie Glucose bereitzustellen. Weiterhin beeinflusst es neben anderen Glucocorticoiden die Gluconeogenese in der Leber, den Proteinabbau in der Skelettmuskulatur sowie die Lipolyse.

Cortisol zeigt eine immunsuppressive und entzündungshemmende Wirkung und beeinflusst die Durchblutung im Gehirn (Tortora, Derrickson, 2006; Silverthorn, 2009). Die Regulation der Cortisolsynthese erfolgt über die Hypophysen-Hypothalamus-Nebennieren-Achse (HPA-Achse), welche zum einen einer circadianen Regulation und zum anderen der Stress-Regulation unterliegt (Weitzman et al., 1971). Durch das erste Licht am Morgen wird die Sekretion von Cortisol, durch die Freisetzung von Corticotropin-Releasing-Hormon (CRH) im Hypothalamus, eingeleitet.

Neben dem circadianen Rhythmus der Cortisolsekretion wird die Cortisol-Aufwachreaktion (Cortisol Awakening Response, CAR) beschrieben. In der Literatur wird ein 50 – 100 %iger Anstieg der Cortisolkonzentration im Speichel innerhalb der ersten 30 bis 45 Minuten nach dem Erwachen beschrieben (Pruessner et al., 1997; Stalder et al., 2016). Die CAR ist ein eigenständiger Vorgang, welche dem circadianen Rhythmus überliegt (Fries et al., 2009). Zur Beschreibung der täglichen Cortisolsekretion, dient die Cortisolkonzentration nach dem Erwachen, die Steigung der Cortisolkonzentration über den Tag (Slope of Decline, SOD) oder die CAR (Adam et al., 2006; Clow et al., 2004).

### **2.3 BIODYNAMISCHE BELEUCHTUNG UND DEREN WIRKUNG AUF DEN MENSCHEN**

Eine künstliche Beleuchtung, die sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse der nicht-visuellen Lichteffekte zunutze macht, wird als biodynamische Beleuchtung oder auch Human Centric Lighting bezeichnet. Dabei handelt es sich um eine dem natürlichen Licht angepasste Beleuchtung, deren Ziel die Stärkung und Stabilisierung des circadianen Rhythmus ist.

Eine hochwertige Beleuchtungslösung berücksichtigt demnach drei Dimensionen des Lichts: die visuelle, die emotionale und die biologische. Mit dem richtigen Licht zur richtigen Zeit werden Wohlbefinden, Gesundheit und Vitalität optimal unterstützt.

Zahlreiche Studien belegen die positiven Effekte von Licht:

- Licht kann Winterdepressionen mildern (Lewy, 1982)
- Licht kann die Dauer und Tiefe sowie die Qualität von Schlaf erhöhen (Lack, 1993)
- Licht kann den Schlaf-Wach-Rhythmus von Alzheimerpatienten regulieren (van Someren, 1997)
- Licht kann die Gewichtszunahme von Frühgeborenen verbessern (Miller, 1995; Brandon, 2002)
- Licht aktiviert das circadiane System über die ipRGC (Berson, 2002, Hattar, 2002)
- Licht reguliert die Melatoninproduktion (Lewy, 1980), Melatonin verringert das Wachstum von Brustkrebs (Dauchy, 1999; Blask, 1999)
- Licht hat Einfluss auf die Hirnaktivität (Badia, 1991)

Für eine optimale Wirksamkeit der biodynamischen Beleuchtung sind Faktoren wie Lichtspektrum, Intensität, Timing und Dauer (Tagesverlauf), Lichtrichtung sowie der spezifische Anwendungsbereich zu beachten.

Bei kurzwelligem Licht mit 460 nm ist die Melatoninsuppression am höchsten (Brainard, Thapan, 2001). Licht mit hohen Blaulichtanteilen am Morgen/Mittag sorgt dafür, dass in der Nacht mehr Melatonin produziert wird. Dadurch erhöht sich die subjektive Aufmerksamkeit sowie die Körperkerntemperatur und die Herzfrequenz (Cajochen et al., 2005). Licht mit hohen Blaulichtanteilen in der Nacht führt ebenfalls zur Melatoninsuppression (Brainard, 2001; Thapan, 2001) und sollte daher vermieden werden. Blau angereichertes Licht am Tag sorgt für schnellere kognitive Leistungsfähigkeit und bessere Konzentration (Keis et al., 2005) und verringert die lichtinduzierte Melatoninsuppression in der Nacht (Kozaki et al. 2015). Das Licht sollte flächig und von vorne oben auf das Auge treffen (Lasko, 1999).

Jeder Anwendungsbereich hat seine eigenen Besonderheiten. So ist beispielsweise in der Altenpflege zu beachten, dass es mit zunehmendem Alter zur Trübung der Augenmedien kommt. Ein 60-jähriger benötigt im Vergleich zu einem 25-jährigen für die gleiche Wirkung die doppelte Helligkeit. Ältere Menschen reagieren außerdem am Abend sensibler auf kurzwelliges Licht, da die Melatoninproduktion mit dem Alter sinkt. Folglich findet bei Ihnen eine stärkere Melatoninsuppression statt (van Norren et al., 2007).

### **3 BIODYNAMISCHE BELEUCHTUNGSLÖSUNGEN IN DER PRAXIS**

Das Wissen um die biologische Wirkung von Licht hat die Beleuchtungsbranche für sich aufgenommen und in verschiedenen anwendungsspezifischen Lösungen für biodynamisches Licht umgesetzt. Auf diese Weise soll dem Menschen das natürliche Lichterlebnis wieder zurückgegeben werden. Die biologische Dimension von künstlicher Beleuchtung gilt dabei als ein weiteres Qualitätsmerkmal. Im Folgenden wird am Beispiel des Leuchtenherstellers Herbert Waldmann GmbH & Co. KG der aktuelle Stand der praktischen Umsetzung biodynamischer Lichtlösungen aufgezeigt.

#### **3.1 BIODYNAMISCHE BELEUCHTUNG IN PFLEGE- UND GESUNDHEITSEINRICHTUNGEN**

Seit 2004 setzt Waldmann biodynamische Beleuchtungslösungen in der Pflege ein. Über 200 Projekte wurden zwischenzeitlich umgesetzt. Der Einsatz biodynamischer Lichtlösungen stabilisiert den Tag-Nacht-Rhythmus, insbesondere, wenn eine eingeschränkte Mobilität die Synchronisation mit dem natürlichen Tageslicht verhindert. Einige Gerontologen sehen darin die Möglichkeit, schlaffördernde Medikamente zu reduzieren. Pflegepersonal berichtet, dass sich Bewohner angstfreier bewegen und aktiver am Tagesgeschehen teilnehmen. Das



Waldmann Lichtmanagementsystem für eine biodynamische Beleuchtung VTL basiert auf Erkenntnissen aus Wissenschaft und langjährigen Erfahrungen in der Praxis. Eine zentral installierte Steuereinheit regelt automatisch via DALI den dynamischen Lichtverlauf. Die Steuerung kann über App oder einfachen Taster erfolgen.

Die Pflegetherapeutischen Zentren in Altentreptow und Neubrandenburg der pro-persona.care GmbH sind in großem Umfang mit biodynamischem Licht ausgestattet. In den Hauptbereichen wurden entsprechende Pendelleuchten eingesetzt. Durch den konsequenten Einsatz in allen Räumen, kann die hohe Lichtqualität eine gute Raumwahrnehmung gewährleisten. Dadurch bewegen sich die Bewohner sicherer und werden gleichzeitig durch die Tageslichtnachführung zu mehr Aktivität animiert. Die Lichtfarbe und die Beleuchtungsstärke der Pendelleuchten werden mittels vordefinierten Lichtszenen im Tagesverlauf automatisch verändert. Nach etwa fünf Monaten der Anwendung konnten die Geschäftsführer Gerd Bekel und Roman Balk gemeinsam mit ihrem Team positive Ergebnisse feststellen: „Bei unseren Klienten und Patienten stellen wir fest, dass sie deutlich aktiver sind. Bei einigen können wir sagen, dass der Tag-Nacht-Rhythmus wieder funktioniert, so wie wir es beabsichtigt hatten. Bei Klienten und Patienten, die nicht in unserer Einrichtung wohnen und folglich abends in ihre häusliche Umgebung zurückkehren, stellen wir nach längerer Abwesenheit fest, dass sie vermutlich schlechten Lichtverhältnissen ausgesetzt waren. Sie sind auffällig müde und unruhig.“ Und auch Angehörige bewerten laut Bekel und Balk das Lichtkonzept positiv. Genau wie die Mitarbeiter, die eine positive Bilanz im Vergleich zu Pflegeeinrichtungen ohne biodynamisches Licht ziehen. Alle Mitarbeiter beschreiben, dass sie während des Arbeitstages kaum noch müde sind. Sie fühlen sich ausgeruhter und können nach eigenen Angaben besser schlafen.

Im Rahmen der Modernisierung des Fürstlich Fürstenbergischen Altenpflegeheims in Hüfingen, wurde das Befinden und Wohlergehen der Bewohner vor und nach der Modernisierung mit biodynamischer Beleuchtung untersucht. Bereits nach acht Wochen verbesserte sich die Schlafqualität der Bewohner. Nach gut einem Jahr wurden fast 75% weniger unruhige Nächte beobachtet. Als im Rahmen des Tests die dynamische Beleuchtung ausgeschaltet wurde, verschlechterte sich das Schlafverhalten bereits nach sechs Wochen auf das Ursprungsniveau. Mit dem anschließenden Einschalten der VTL-Beleuchtung verbesserte sich das Schlafverhalten wieder.

### **3.2 BIODYNAMISCHE BELEUCHTUNG IM BÜRO**

Im Büro setzt Waldmann biodynamisches Licht nach dem Plug-&-Light-Prinzip seit 2014 um. Konfigurationen oder Programmierungen der Leuchten sind nicht notwendig. In Stehleuchten ist das System bereits integriert, somit ist auch keine Anbindung an ein Gebäudemanagement notwendig. Die Leuchten variieren automatisch und in Echtzeit ihre indirekte Lichtmenge und -farbe. Beginnend mit aktivierenden kalten Lichtfarben am Morgen bis hin zu warmen Lichtfarben am Abend, worüber die Ruhephase eingeleitet wird (Abbildung 4). Das direkte Arbeitslicht in neutraler Lichtfarbe kann individuell hinzugeschaltet und gedimmt werden.

Raumleuchten für biodynamisches Licht werden mit dem gebäudeseitig montierten NET-Modul über eine DALI-Schnittstelle verbunden. Auch hier läuft das der Tageszeit entsprechende Licht – ohne Installationssoftware oder weitere Inbetriebnahmeschritte – über eine Echtzeitsteuerung im indirekten und direkten Lichtanteil ab. Durch die fest eingestellten Regelkurven vermeidet das Lichtmanagementsystem VTL falsche Konfigurationen oder fehlerhafte und im schlimmsten Fall negativ wirkende Einstellungen. Es fördert die Leistungsfähigkeit und unterstützt nach natürlichem Vorbild das Wohlbefinden und die Gesunderhaltung am Arbeitsplatz. Anwendung findet das Lichtmanagementsystem VTL bereits in zahlreichen Projekten. Darunter Bayer in Basel oder die Erber Group im österreichischen Getzersdorf. Beide Unternehmen setzen Stehleuchten mit biodynamischem Licht an den Arbeitsplätzen ein. Bei Bayer kommen zusätzlich in den Kommunikationsbereichen Raumleuchten mit Biodynamik zum Einsatz.

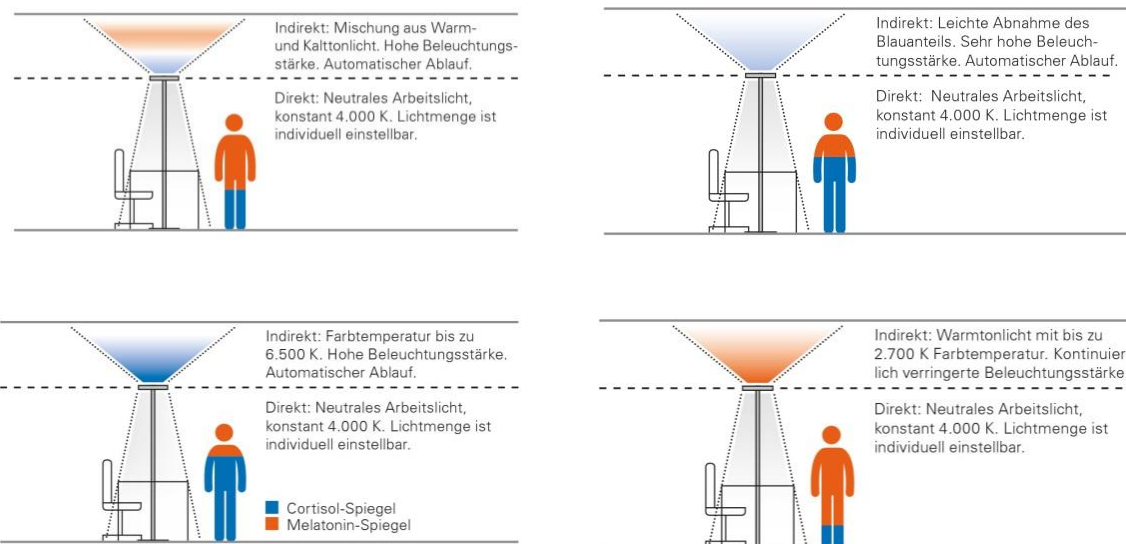


Abbildung 4: Über den Tagesverlauf verändern sich Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe im indirekten Lichtanteil der Stehleuchten. Damit einher geht die Veränderung der Melatonin- und Cortisol-Werte im menschlichen Körper.

Quelle: Herbert Waldmann GmbH & Co. KG

### 3.3 BIODYNAMISCHE BELEUCHTUNG IN DER INDUSTRIE

Biodynamische Beleuchtung ist in Industriehallen bislang kaum anzutreffen. Aktuell sind erste Pilotprojekte aufgesetzt, es werden Erfahrungen gesammelt und es wird weiter geforscht. Die Anforderungen an eine biodynamische Beleuchtung in der Industrie sind sehr vielfältig. Hohe Hallen, schmale Lagergänge, Verschmutzung und fehlende Reflexionsflächen für einen indirekten Lichtanteil erhöhen die Komplexität. Außerdem sorgen Schichtarbeit, vor allem Nachtschicht und wechselnde Schichtmodelle für kontroverse Diskussionen zwischen Wissenschaft, Lichtbranche und Arbeitsschutz. Die Thematik erfordert demnach einen äußerst sensiblen Umgang, birgt sie doch sowohl Chancen als auch Risiken für die Belegschaft.

Wenn die Fragestellungen zufriedenstellend gelöst sind, ist der Anwendungsbereich geradezu prädestiniert für biodynamisches Licht. Weil in Industriehallen oft wenig Tageslichteinfall vorhanden ist und lange Betriebszeiten die Regel sind, können Mitarbeiter von einer biologisch wirksamen Beleuchtung besonders profitieren. Es kann Wohlbefinden, Gesunderhaltung und Konzentrationsfähigkeit nachhaltig unterstützen.

Die Marktstudie von AT Kearney stuft die biodynamische Beleuchtung deshalb als wichtigen und wachsenden Markt ein. Insbesondere im Industrieumfeld sieht die Studie einen relevanten Einsatzbereich der biodynamischen Beleuchtung. Durch die Umstellung der Beleuchtung konnten in Testinstallationen Produktionssteigerungen von sieben Prozent erreicht werden. In Ergänzung dazu wurden viele positive Aspekte beobachtet: höhere Konzentration, weniger Ausfälle und eine verbesserte Motivation haben die Stimmung der Arbeitnehmer positiv beeinflusst.

Aktuell führt Waldmann im Tochterunternehmen Derungs Licht AG in Gossau eine Studie in der Produktionshalle durch. Das Pilotprojekt unter wissenschaftlicher Begleitung soll erste Fragestellungen beantworten, die für die Planung und Umsetzung eines konkreten Beleuchtungsprojekts mit biodynamischer Beleuchtung in der Industriehalle notwendig sind. Die im Projekt gesammelten Erfahrungen sollen in ein Serienprodukt münden. Als besondere Herausforderung sind unter anderem folgende Themen identifiziert worden: Der für die biologische Wirkung nach heutigen Erkenntnissen notwendige Indirektanteil der Leuchten ist im industriellen Umfeld selten möglich. Leuchten werden teils in hohen Höhen installiert. Viel höher als in Büroumgebungen. Zu klären ist demnach, ob die Beleuchtung unter diesen Voraussetzungen die gleiche biologische Wirkung hat.

## **4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK**

Biodynamische Beleuchtung ist ein sehr komplexes und durchaus sensibles Thema. Eine Umsetzung, die die Lichtbedürfnisse des Menschen zur jeweiligen Tageszeit berücksichtigt, bringt nachweislich zahlreiche positive Effekte mit sich.

Bereits heute gibt es Anwendungen, in denen biodynamische Beleuchtungslösungen sinnvoll eingesetzt werden können. Nach dem Vorbild des natürlichen Tageslichts mit aktivierendem Licht am Vormittag bis hin zu wärmerem Licht am Abend bzw. in der Nacht kann der Mensch von entsprechenden Lichtlösungen profitieren. Darunter sind Anwendungen in der Pflege, Gesundheitseinrichtungen und im Büro zu nennen.

Ein Lichtkonsum von tageslichtweißer Beleuchtung mit höheren Blauanteilen in der Nacht ist nachweislich zu vermeiden. Ein Aspekt, der auch den bislang nicht erschlossenen Anwendungsbereich der Industrie mit Schichtarbeit betrifft. Auch hier gilt, dass tagsüber eine möglichst am Tageslicht orientierte Beleuchtung mit zu Beginn höheren Blauanteilen realisiert werden sollte und während der Nachtschicht eine Beleuchtung, die den circadianen Rhythmus nicht stört.

Wie jedoch der dynamische Verlauf im industriellen Schichtbetrieb genau aussehen sollte, muss in den kommenden Jahren neben weiteren die industrielle Anwendung betreffenden Spezifika über Pilotinstallationen untersucht werden. Bestehende Hürden gilt es in den kommenden Jahren auf Basis fundierter anwendungsorientierter Forschungsarbeit auszuräumen und somit zufriedenstellende Antworten für eine praxistaugliche Umsetzung in der Industrie zu liefern. Dabei gibt es verschiedene Interessengruppen deren Vorstellungen in Einklang gebracht werden müssen. Gemeinsames Ziel sollte die optimale Unterstützung des Menschen sein.

## LITERATURVERZEICHNIS

- Adam, Emma K.; Hawkley, Louise C.; Kudielka, Brigitte M.; Cacioppo, John T. (2006): Day-to-day dynamics of experience--cortisol associations in a population-based sample of older adults. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103 (45), pp. 17058–17063. DOI: 10.1073/pnas.0605053103.
- A. T. Kearney (2013): *Human Centric Lighting: Going Beyond Energy Efficiency*. URL: [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_und\\_Medien/Publikationen/2013/Okttober/Market\\_Study\\_\\_Human\\_Centric\\_Lighting/ZVEI-FV-Licht-Human-Centric-Lighting-Ueberblick.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2013/Okttober/Market_Study__Human_Centric_Lighting/ZVEI-FV-Licht-Human-Centric-Lighting-Ueberblick.pdf)
- Badia P, Myers B, Boecker M, Culpepper, J. 1991. Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and Behavior. *Physiol Behav* 50(3): 583- 588.
- Berson, David M.; Dunn, Felice A.; Takao, Motoharu (2002): Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. In *Science (New York, N.Y.)* 295 (5557), pp. 1070–1073. DOI: 10.1126/science.1067262.
- Berson, D. M. (2003): Strange vision: Ganglion cells as circadian photoreceptors. In: *Trends in Neurosciences* 26 (6), S. 314–320.
- Blask D, Sauer L, Dauchy R, Holowachuk E, Ruhoff M, Kopff H. 1999. Melatonin inhibition of cancer growth in vivo involves suppression of tumor fatty acid metabolism via melatonin receptor-mediated signal transduction events. *Cancer Res* 59: 4793-4701.
- Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.; Greeson, J. M.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M.D. (2001): Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. In *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 21 (16), pp. 6405–6412.
- Brandon DH, Holditch-Davis D, Belyea M. 2002. Preterm infants born at less than 31 weeks' gestation have improved growth in cycled light compared with continuous near darkness. *J Pediatr* 140(2): 192-199.
- Brzezinski, A. (1997): Melatonin in humans. In *The New England journal of medicine* 336 (3), pp. 186–195. DOI: 10.1056/NEJM199701163360306.
- Cajochen, C., Münch, M., Kobińska, S., Kräuchi, K., Steiner, R., Oelhafen, P., Orgül, S., Wirz-Justice, A. (2005): High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light. *J of Clinical Endocrinology & Metabolism* Vol. 90, No. 3 S. 1311-1316
- Chuang, J. I.; Chen, S. S.; Lin, M. T. (1993): Melatonin decreases brain serotonin release, arterial pressure and heart rate in rats. In *Pharmacology* 47 (2), pp. 91–97.

- Claustrat, Bruno; Brun, Jocelyne; Chazot, Guy (2005): The basic physiology and pathophysiology of melatonin. In *Sleep medicine reviews* 9 (1), pp. 11–24. DOI:10.1016/j.smrv.2004.08.001.
- Clow, A.; Thorn, L.; Evans, P.; Hucklebridge, F. (2004): The awakening cortisol response. Methodological issues and significance. In *Stress (Amsterdam, Netherlands)* 7 (1), pp. 29–37. DOI: 10.1080/10253890410001667205.
- Czeisler, C. A.; Shanahan, T. L.; Klerman, E. B.; Martens, H.; Brotman, D. J.; Emens, J. S. et al. (1995): Suppression of melatonin secretion in some blind patients by exposure to bright light. In *The New England journal of medicine* 332 (1), pp. 6–11. DOI: 10.1056/NEJM199501053320102
- Czeisler, C. A.; Duffy, J. F.; Shanahan, T. L.; Brown, E. N.; Mitchell, J. F.; Rimmer, D. W. et al. (1999): Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker. In *Science (New York, N.Y.)* 284 (5423), pp. 2177–2181.
- Dacey, Dennis M.; Liao, Hsi-Wen; Peterson, Beth B.; Robinson, Farrel R.; Smith, Vivianne C.; Pokorny, Joel et al. (2005): Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. In *Nature* 433 (7027), pp. 749–754. DOI:10.1038/nature03387
- Dauchy RT, Blask DE, Sauer LA, Brainard GC, Krause JA. 1999. Dim light during darkness stimulates tumor progression by enhancing tumor fatty acid uptake and metabolism. *Cancer Lett* 144: 131-136.
- Duffy, Jeanne F.; Wright, Kenneth P. (2005): Entrainment of the human circadian system by light. In *Journal of biological rhythms* 20 (4), pp. 326–338. DOI: 10.1177/0748730405277983
- Fellenberg, A. J.; Phillipou, G.; Seemark, R. F. (1980): Measurement of urinary production rates of melatonin as an index of human pineal function. In *Endocrine research communications* 7 (3), pp. 167–175.
- Fries, Eva; Dettenborn, Lucia; Kirschbaum, Clemens (2009): The cortisol awakening response (CAR). Facts and future directions. In *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology* 72 (1), pp. 67–73. DOI: 10.1016/j.ijpsycho. 2008.03.014.
- Hastings, Michael; O'Neill, John S.; Maywood, Elizabeth S. (2007): Circadian clocks. Regulators of endocrine and metabolic rhythms. In *the Journal of endocrinology* 195 (2), pp. 187–198. DOI: 10.1677/JOE-07-0378.
- Hatori, Megumi; Le, Hiep; Vollmers, Christopher; Keding, Sheena Racheal; Tanaka, Nobushige; Buch, Thorsten et al. (2008): Inducible ablation of melanopsin-expressing retinal ganglion cells reveals their central role in non-image forming visual responses. In *PloS one* 3 (6), e2451. DOI: 10.1371/journal.pone.0002451.
- Hattar, Samer; Kumar, Monica; Park, Alexander; Tong, Patrick; Tung, Jonathan; Yau, King-Wai; Berson, David M. (2006): Central projections of melanopsin-expressing retinal ganglion cells in the mouse. In *The Journal of comparative neurology* 497 (3), pp. 326–349. DOI:10.1002/cne.20970.
- Hofstra, Wytse A.; Weerd, Al W. de (2008): How to assess circadian rhythm in humans. A review of literature. In *Epilepsy & behavior: E&B* 13 (3), pp. 438–444. DOI:10.1016/j.yebeh.2008.06.002.
- Hoyos, M.; Guerrero, J. M.; Perez-Cano, R.; Olivan, J.; Fabiani, F.; Garcia-Pergañeda, A.; Osuna, C. (2000): Serum cholesterol and lipid peroxidation are decreased by melatonin

- in diet-induced hypercholesterolemic rats. In *Journal of pineal research* 28 (3), pp. 150–155.
- Illnerová, H.; Buresová, M.; Presl, J. (1993): Melatonin rhythm in human milk. In *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 77 (3), pp. 838–841. DOI: 10.1210/jcem.77.3.8370707
- Keis, Oliver; Helbig, Hannah; Streb, Judith; Hille, Katrin (2014): Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance. In: *Trends in Neuroscience and Education* 3 (3-4), S. 86–92. DOI: 10.1016/j.tine.2014.09.001.
- Korf, Horst-Werner; Stehle, Jörg (2005): Das circadiane System der Säugetiere – integraler Bestandteil des neuroendokrinen Systems. In Elmar Peschke (Ed.): *Endokrinologie II (Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse, 63,2)*, pp. 9–32.
- Kozaki, Tomoaki; Kubokawa, Ayaka; Taketomi, Ryunosuke; Hatae, Keisuke (2015): Effects of day-time exposure to different light intensities on light-induced melatonin suppression at night. In *Journal of physiological anthropology* 34, p. 27. DOI: 10.1186/s40101-015-0067-1.
- Lack L, Wright H. 1993. The effect of evening bright light in delaying the circadian rhythms and lengthening the sleep of early morning awakening insomniacs. *Sleep* 16(5): 436-443.
- Langer, M.; Hartmann, J.; Turkof, H.; Waldhauser, F. (1997): Melatonin beim Menschen ein Überblick. In *Wiener klinische Wochenschrift* 109 (18), pp. 707–713.
- Lasko T.A., Kripke D.F., Elliot J.A. (1999): Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields. *J. Biol. Rhythms* Vol. 14 Nr. 2 S. 122-125
- Lewy AJ, Wehr TA, Goodwin FK, Newsome DA, Markey SP. 1980. Light suppresses melatonin secretion in humans. *Science* 210(4475): 1267-1269.
- Lewy AJ, Kern HA, Rosenthal NE, Wehr TA. 1982. Bright artificial light treatment of a manic-depressive patient with seasonal mood cycle. *Am J Psychiatry* 139(11): 1496-1498.
- Miles, A.; Philbrick, D. R.; Shaw, D. M.; Tidmarsh, S. F.; Pugh, A. J. (1985): Salivary melatonin estimation in clinical research. In *Clinical chemistry* 31 (12), pp. 2041–2042.
- Miller CL, White R, Whitman TL, O'Callaghan MF, Maxwell SE. 1995. The effects of cycled versus noncycled lighting on growth and development in preterm infants. *Infant Behav Develop* 18(1): 87-95.
- Mitchell, M. D.; Sayers, L.; Keirse, M. J.; Anderson, A. B.; Turnbull, A. C. (1978): Melatonin in amniotic fluid during human parturition. In *British journal of obstetrics and gynaecology* 85 (9), pp. 684–686.
- Moore, R. Y. (1996): Entrainment pathways and the functional organization of the circadian system. In *Progress in brain research* 111, pp. 103–119.
- Müller-Wieland, D.; Behnke, B.; Koopmann, K.; Krone, W. (1994): Melatonin inhibits LDL receptor activity and cholesterol synthesis in freshly isolated human mononuclear leukocytes. In *Biochemical and biophysical research communications* 203 (1), pp. 416–421.
- Obayashi, Kenji; Saeki, Keigo; Iwamoto, Junko; Tone, Nobuhiro; Tanaka, Kunihiro; Kataoka, Hiroshi et al. (2015): Physiological Levels of Melatonin Relate to Cognitive Function and Depressive Symptoms. The HEIJO-KYO Cohort. In *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 100 (8), pp. 3090–3096. DOI: 10.1210/jc.2015-1859
- Pardridge, W. M.; Mietus, L. J. (1980): Transport of albumin-bound melatonin through the blood-brain barrier. In *Journal of neurochemistry* 34 (6), pp. 1761–1763.

- Plischke, Herbert (2016): Nicht-visuelle Wirkung von Licht und Strahlung. In Roland Baer, Meike Barfuß, Dirk Seifert (Eds.): Beleuchtungstechnik. 4. Auflage. Berlin: Huss-Medien GmbH, pp. 92–97.
- Poeggeler, B.; Reiter, R. J.; Tan, D. X.; Chen, L. D.; Manchester, L. C. (1993): Melatonin, hydroxyl radical-mediated oxidative damage, and aging: a hypothesis. In *Journal of pineal research* 14 (4), pp. 151–168.
- Pruessner, J. C.; Wolf, O. T.; Hellhammer, D. H.; Buske-Kirschbaum, A.; Auer, K. von; Jobst, S. et al. (1997): Free cortisol levels after awakening. A reliable biological marker for the assessment of adrenocortical activity. In *Life sciences* 61 (26), pp. 2539–2549.
- Reiter, R. J. (1993): The melatonin rhythm. Both a clock and a calendar. In *Experientia* 49 (8), pp. 654–664.
- Roenneberg, T. (2012): Internal Time and Sleep in Real Life. In: DIN Deutsches Institut für Normung (Hg.): 6. DIN-Expertenforum. Wirkung des Lichts auf den Menschen. Berlin, 28.06.2012. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth, S. 17–19.
- Rüger, Melanie; Gordijn, Marijke C. M.; Beersma, Domien G. M.; Vries, Bonnie de; Daan, Serge (2005): Nasal versus temporal illumination of the human retina. Effects on core body temperature, melatonin, and circadian phase. In *Journal of biological rhythms* 20 (1), pp. 60–70. DOI: 10.1177/0748730404270539.
- Silverthorn, Dee Unglaub (2009): Physiologie. With assistance of Carsten Biele, Monika Niehaus, Jorunn Wissmann, Ursula Loos, Wolf-Michael Weber. 4., aktualisierte Auflage. München, Boston, San Francisco, Harlow, England, Don Mills, Ontario, Sydney, Mexico City, Madrid, Amsterdam: Pearson Studium ein Imprint von Pearson Education (med - Medizin).
- Smith, I.; Mullen, P. E.; Silman, R. E.; Snedden, W.; Wilson, B. W. (1976): Absolute identification of melatonin in human plasma and cerebrospinal fluid. In *Nature* 260 (5553), pp. 716–718.
- Stalder, Tobias; Kirschbaum, Clemens; Kudielka, Brigitte M.; Adam, Emma K.; Pruessner, Jens C.; Wüst, Stefan et al. (2016): Assessment of the cortisol awakening response. Expert consensus guidelines. In *Psychoneuroendocrinology* 63, pp. 414–432. DOI: 10.1016/j.psyneuen. 2015.10.010.
- Thapan, K.; Arendt, J.; Skene, D. J. (2001): An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. In *The Journal of physiology* 535 (Pt 1), pp. 261–267.
- Tortora, Gerard J.; Derrickson, Bryan H. (2006): Anatomie und Physiologie. Weinheim: WILEY-VCH. Available online at [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2774590&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2774590&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).
- van Norren, D.; van de Kraats, J. (2007): Spectral transmission of intraocular lenses expressed as a virtual age. In: *British Journal of Ophthalmology* 91 (10), S. 1374–1375.
- van Someren EJW, Kessler A, Mirmirann M, Swaab DF. 1997. Indirect bright light improves circadian restactivity rhythm disturbances in demented patients. *Biol Psychiatry* 41: 55-963.
- van Vuuren, R. J.; Du Plessis, D. J.; Theron, J. J. (1988): Melatonin in human semen. In *South African medical journal = Suid-Afrikaanse tydskrif vir geneeskunde* 73 (6), pp. 375–376.
- Weitzman, E. D.; Fukushima, D.; Nogeire, C.; Roffwarg, H.; Gallagher, T. F.; Hellman, L. (1971): Twenty-four hour pattern of the episodic secretion of cortisol in normal subjects.

In The Journal of clinical endocrinology and metabolism 33 (1), pp. 14–22. DOI: 10.1210/jcem-33-1-14.

Wever, R. A. (1989): Light effects on human circadian rhythms. A review of recent Andechs experiments. In Journal of biological rhythms 4 (2), pp. 161–185.