

3.3 Licht und nicht-visuelle Wirkungen

3.3.1 Human Centric Lighting (HCL)

Unter der Bezeichnung „Human Centric Lighting“ versteht man heute solche Anwendungen der Beleuchtung, bei denen in besonderer Weise der Mensch und sein Wohlbefinden in den Mittelpunkt der Lichtlösungen gestellt werden. Das Bewusstsein um den Einfluss der Beleuchtung auf Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen entwickelt sich in den vergangenen Jahren zunehmend unter dem Eindruck weitreichender, neuer Erkenntnisse aus intensiver Forschungstätigkeit. Diese Erkenntnisse führen heute dazu, gutes Licht neu zu definieren. Neben der Schaffung qualitativer Sehbedingungen und der räumlichen Wirkung des Lichtes ist in der Planung sowie der Ausführung vieler Anwendungen auch die spektrale Zusammensetzung der Lichtdynamik über den Tagesverlauf zu berücksichtigen.

Tatsächlich hat sich der Mensch in seiner mehrere Millionen Jahre zurückliegenden Entwicklungsgeschichte zu einem Tageslichtwesen entwickelt. Er hat sich in seiner Evolution an das Tageslicht und seine sehr unterschiedlichen Wirkungen ebenso gewöhnt wie an den natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus.

In den vergangenen ca. 100 Jahren hat sich der Mensch nun – entgegen dem natürlichen Tag-Nacht-Turnus – eine globale 24-Stunden-Gesellschaft geschaffen, in der er nach dem Motto „Licht macht die Nacht zum Tage“ scheinbar unabhängig vom Tagesrhythmus ist. Diese scheinbare Unabhängigkeit ist, wie wir heute wissen, äußerst kritisch zu bewerten. Licht sollte, aus Gründen der Gesundheit und des Wohlbefindens, stets am natürlichen Licht orientiert sein und gezielt in den Tagesverlauf integriert werden.

Der wesentliche Aspekt ist dabei der Einfluss des Lichts auf unsere innere Uhr. Aber auch die emo-

tionale, psychologische Wirkung von Beleuchtung spielt in der Lichtplanung eine bedeutende Rolle.

Erst im Jahr 2000 wurde ein zusätzlicher Empfänger im Auge entdeckt, welcher bei dieser biologischen, nicht-visuellen Lichtwirkung eine wichtige Rolle spielt. Der „neue“ Rezeptor, eine intrinsisch photosensitive Ganglienzelle (ipRGC) reagiert besonders auf Lichtwellenlängen im kurzwelligen, „blauen“ Bereich des Spektrums von ca. 490 nm (siehe Abschnitt 3.3.9 „Optische Strahlung“). Seit seiner Entdeckung beschäftigen sich Wissenschaft und Industrie mit dem Verständnis der nicht-visuellen Wirkung auf den Menschen und haben so einen Kenntnisstand generiert, der sich nach und nach auch in der Lichtenwendung widerspiegelt. Insbesondere hat die Entdeckung des Proteins Melanopsin, welches als Photopigment die neu entdeckten Ganglienzellen lichtempfindlich macht, den Begriff der „melanopischen Wirksamkeit“ des Lichts geprägt.

Klar ist: Zusammensetzung und Intensität des von verschiedenen Lichtquellen emittierten Spektrums haben verschiedene Auswirkungen auf den Menschen. So kann durch eine integrale Lichtplanung das Wohlbefinden gesteigert und die Stimmung positiv beeinflusst werden. Auch Aktivierung oder Entspannung können durch Licht unterstützt werden.



Dabei kann die melanopische Wirkung des Lichts vor allem gesundheitliche Aspekte wie Aktivierung, Erholung und allgemeines Wohlbefinden verbessern (biologische, nicht-visuelle Wirkung), während die visuelle Wirkung Emotionen hervorrufen und unterstützen kann. Die Kombination aus nicht-visueller, visueller und emotionaler Unterstützung des Menschen definiert den Begriff „Human Centric Lighting“.

In der Anwendung kann zwischen vier grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten unterschieden werden:

- **Melanopisch wirksames Licht zur Unterstützung der Gesundheit**

Der menschliche Tag-Nacht-Rhythmus kann durch Licht unterstützt werden. Wie das Tageslicht kann gezielte Beleuchtung durch zeitliche Änderung der Lichtfarbe und Intensität Gesundheit und Leistungsfähigkeit unterstützen und fördern.

- **Melanopisch wirksames Licht zur Aktivierung**

Beleuchtung unterstützt die Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit. Durch die aktivierende Wirkung insbesondere von kälteren Lichtfarben kann auch die kognitive Leistungsfähigkeit gesteigert werden.

- **Melanopisch wirksames Licht zur Erholung**

Licht wirkt aktivierend, trägt aber auch aktiv zur Erholung und Entspannung bei. Das Wohlbefinden kann durch Anpassung der Beleuchtung an individuelle Bedürfnisse, beispielsweise durch Änderung zu wärmeren Lichtfarben, gesteigert werden.

- **Licht, das Emotionen weckt**

Beleuchtung inszeniert, akzentuiert und erschafft Räume. Durch das Schaffen unterschiedlicher Lichtatmosphären können Emotionen der Begeisterung oder Gemütlichkeit ausgelöst werden, die das Wohlbefinden und die Akzeptanz erhöhen.

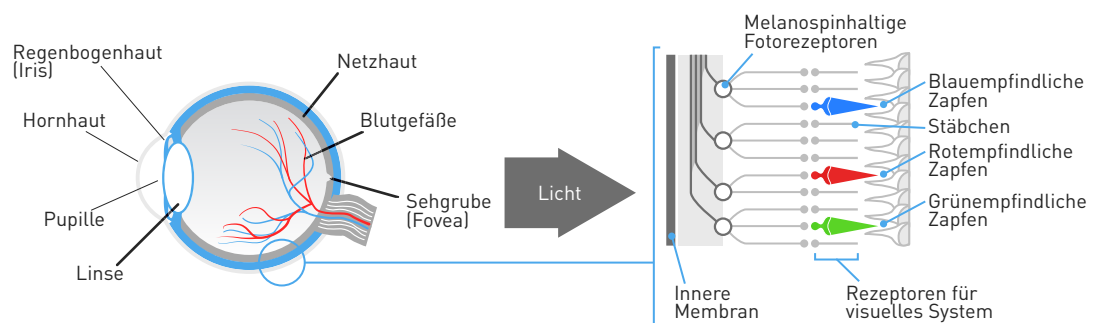
Der Begriff „**melanopisch wirksames Licht**“ beschreibt dabei nicht eine Lichtsituation, gekennzeichnet durch absolute Angaben physikalischer und lichttechnischer Kennwerte. Er beschreibt vielmehr die zeitliche, relative Variation derselben, die geeignet ist, die Physiologie des menschlichen, circadianen Rhythmus zu unterstützen (siehe Abschnitt 3.3.3).

Human Centric Lighting grenzt sich also überall dort von der rein technischen Beleuchtung ab, wo Licht eine psychologische, physiologische oder psychobiologische Wirkung auf den Menschen haben soll.

3.3.2 Melanopische Wirksamkeit des Lichts

Die melanopische Wirkung des Lichts ist tief in der Entwicklung des Menschen verankert. In der frühen Entwicklungsgeschichte wurde das gesamte Leben des zu diesem Zeitpunkt noch nicht sesshaften Menschen vom verfügbaren Tageslicht bestimmt. Dieses Licht bestimmte maßgeblich Schlaf- und Wachphasen, Zeiten der Nahrungbeschaffung und Zeiten des Rückzuges.

Abbildung 3.5: Die für den blauen (kurzwelligigen) Lichtanteil besonders sensitiven Ganglienzellen befinden sich im unteren Bereich der Retina. Sie sind am Sehvorgang nicht beteiligt, sind aber als Signalgeber für unsere „innere Uhr“ mitverantwortlich.



Schon der frühe Mensch nahm einen großen Teil seiner Umweltinformation über das Auge auf. Daraus ergab sich zu Tagzeiten ein Vorteil gegenüber anderen Tierarten, während nachts im Dunklen fast unsichtbare Gefahren lauern konnten.

Erst mit der Beherrschung des Feuers konnte der Mensch auch bei Dunkelheit behagliche Orte schaffen, die für Wärme und Schutz sorgten. Erste Lampen und Feuerstellen entwickelten sich stetig weiter. Während vor allem im 19. Jahrhundert verwendete Öllampen eher in Herrschaftshäusern genutzt wurden, entwickelten sich aus dem sich stärker verbreitenden Gaslicht zunächst erste großflächige Straßenbeleuchtungen in den Metropolen. Erst die Erfindung des elektrischen Lichts machte die Beleuchtung zuhause einer breiteren Masse zugänglich. Durch die neue günstige Lichtquelle konnte der Tag künstlich verlängert werden, bis hin zur vollständigen Erhellung der nächtlichen Dunkelheit. Vor allem im Zuge der Industrialisierung konnten so Arbeitsprozesse vom natürlichen Tageslicht entkoppelt werden, Fabriken konnten rund um die Uhr arbeiten. Die dadurch mögliche zeitliche Selbstbestimmung spiegelte sich auch in der Gesellschaft wieder, die – insbesondere in den Städten – nicht mehr nach dem von der Natur vorgegebenen Rhythmus lebte, sondern ihren eigenen Tageszyklus bestimmte.

Diese rasanten gesellschaftlichen und technischen Veränderungen fanden im Wesentlichen innerhalb eines einzigen Jahrhunderts statt – im Maßstab der Evolution ein zu kurzer Zeitraum, um den menschlichen Körper an die neuen Gegebenheiten anzupassen. Die über die Jahrtausende entwickelte Verbundenheit mit dem Tageslicht und dem damit vorgegebenen Rhythmus war und ist immer noch ein bestimmender Faktor im Leben des Menschen.

Dass Tageslicht einen positiven Einfluss auf den Menschen hat, zeigt sich bereits in über Jahrtausende alten Sonnenkulten. Aber auch am Anfang des 20. Jahrhunderts wurde dieses Wissen beispielsweise bei der Architektur von Sanatorien

und in der Lichttherapie mit Höhensonne angewendet.

Etwa seit Mitte des 20. Jahrhunderts wird dieser Einfluss gezielt wissenschaftlich untersucht. Die bekanntesten Wissenschaftler sind hier vermutlich Colin Pittendrigh, der „Vater der biologischen Uhr“, und Jürgen Aschoff, die gemeinhin als Mitbegründer der Chronobiologie gelten. Erste Beobachtungen an Pflanzen, Insekten und Nagetieren führten schließlich auch zum Nachweis circadianer Rhythmen beim Menschen.

Wissenschaftliche Erkenntnisse zur inneren Uhr und zu circadianen Rhythmen wurden im Oktober 2017 sogar mit dem Nobelpreis für Medizin ausgezeichnet. Damit wird dem Licht in Bezug auf den biologischen Tagesrhythmus ein ganz bedeutender Stellenwert zuteil.

Da parallel auch gute Erfolge mit der Lichttherapie von Winterdepression (Seasonal affective disorder, SAD) und anderen Mangelerscheinungen erzielt wurden, entwickelte sich ein interdisziplinäres Forschungsfeld, in dem Verhaltensforscher, Biologen und Mediziner die Wirkung von Licht auf den Menschen untersuchten. Im Jahr 1991 wurde ein zusätzlicher, nicht am eigentlichen Sehvorgang beteiligter Photorezeptor von Russel G. Foster und Kollegen in Mäuseaugen nachgewiesen, der eine wesentliche Rolle für den circadianen Rhythmus, also den 24-Stunden-Rhythmus der biologischen inneren Uhr, spielt.

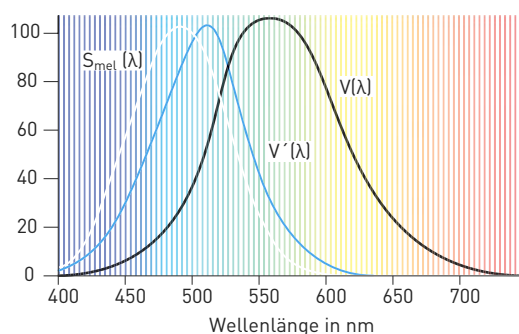


Abbildung 3.6: Visuell wirksamer Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für das helladaptierte Auge (Tagsehen) und $V'(\lambda)$ für das dunkeladaptierte Auge (Nachtsehen) sowie melanopische Wirkungsfunktion S_{mel} für die circadianen Rhythmen

Im Jahr 2001 konnten solche lichtempfindlichen Ganglienzellen auch auf der menschlichen Netzhaut entdeckt werden und so die Wirkungsweise von Licht auf den menschlichen Tag-Nacht-Rhythmus weiter erklärt werden. Die Forschung in diesem Bereich wurde in der Folge intensiviert, 2007 konnte Melanopsin als Wirkstoff in den Ganglienzellen bestimmt werden. Die Wirkung von Licht auf den circadianen Rhythmus des Menschen wird seitdem mithilfe eines Wirkungsspektrums beschrieben (siehe Abbildung 3.6), welches in Abhängigkeit der Wellenlänge des Lichts unterschiedlich starken Einfluss auf die innere Uhr hat. Aber auch die Richtung und räumliche Verteilung des Lichts spielt dabei eine Rolle. Weitreichende interdisziplinäre Forschung auf dem Gebiet führte zu einem heute guten Kenntnisstand über menschliche Bedürfnisse und Gefährdungen, die durch Licht induziert werden können.

Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen im Bereich der Lichtplanung wurden auch in der lichttechnischen Normung abgebildet.

Normung

In DIN/TS 5031-100:2021-11 „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Symbole und Wirkungsspektren“ [47] werden zunächst Begrifflichkeiten, die für die Betrachtung von nicht-visueller Lichtwirkung auf den Menschen wichtig sind, beschrieben. Sie steht in weitgehender Übereinstimmung mit der internationalen Norm CIE S 026:2018 „CIE-System für die Metrologie optischer Strahlung für ipRGC-beeinflusste Antworten auf Licht“ [163]. Beides sind Regelwerke, die einheitliche Begriffe und Definitionen für eine gesundheitsfördernde Innenraumbeleuchtung in Europa etablieren sollen. Sie stellen darüber hinaus die Beziehung zwischen visuellen und nicht-visuellen Wirkungen des Lichts her und sind daher entscheidend für die nachhaltige Entwicklung der Innenraumbeleuchtung.

Zu diesem Zweck werden die melanopische Lichtwirkung und ein entsprechender Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ definiert. Letzterer ist ein Maß für den Einfluss einer Lichtquelle auf die nicht-visuelle Wirkung des Lichts und damit auch auf die Unterstützung des circadianen Rhythmus.

Vergleichbar mit der Bewertung einer Strahlungsquelle mit der visuellen Empfindlichkeit des Auges $v(\lambda)$ kann diese ebenfalls melanopisch durch spektrale Multiplikation mit dem melanopischen Wirkungsspektrum $s_{mel}(\lambda)$ vorgenommen werden (siehe Abbildung 3.6).

Mit dem Spektrum einer LED ergeben sich grafisch folgende Bilder:

Abbildung 1:
Spektrum einer LED-Lichtquelle mit 4.000 K (orange)

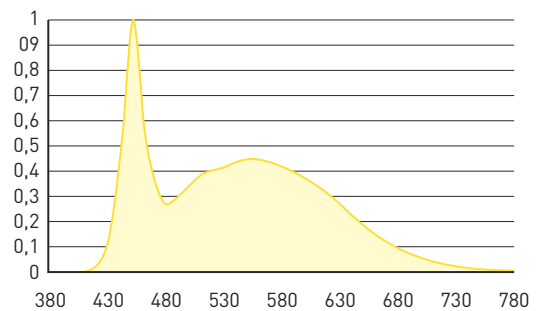


Abbildung 1

Abbildung 2:
Ermittlung der visuellen Strahlungsgröße mit $v(\lambda)$

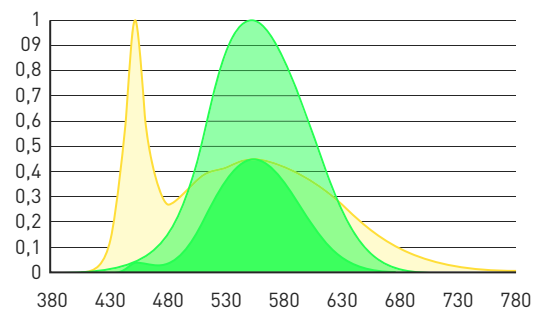


Abbildung 2

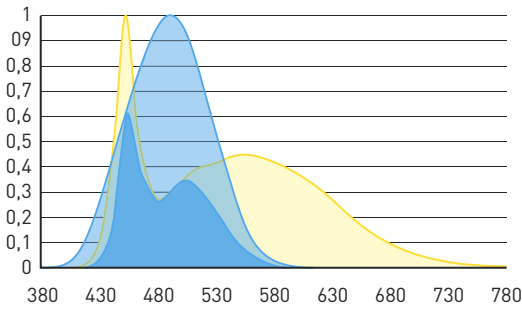
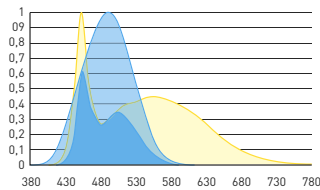


Abbildung 3: Ermittlung der melanopischen Strahlungsgröße mittels $s_{mel}(\lambda)$ (hellblau)

Der melanopische Wirkfaktor $a_{mel,v}$ berechnet sich nun als Quotient aus der mit der melanopischen ($s_{mel}(\lambda)$) und der visuellen ($v_{\lambda}(\lambda)$) Empfindlichkeit bewerteten Strahlungsquelle.



$a_{mel,v} =$

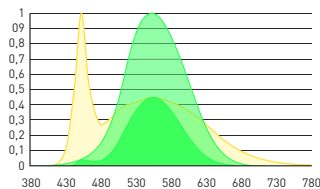


Abbildung 4: Berechnung von $a_{mel,v}$

$$a_{mel,v} = \frac{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} X_{\lambda}(\lambda) \cdot v_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda}$$

So ist z. B. für eine typische, warmweiße LED mit einer Farbtemperatur von 3.075 K ein melanopischer Wirkfaktor von 0,387 ermittelt worden. Für eine tageslichtweiße LED mit 6.535 K betrug der ermittelte Wirkfaktor 0,725. Diese Werte sind in der oben genannten Norm dokumentiert (vgl. Beispiel der Abbildung 3.8).

Weiterhin kann die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke (melanopic equivalent daylight illuminance – MEDI) mittels des melanopischen Tageslicht-Effizienzfaktors

(melanopic daylight efficacy ratio – MDER) berechnet werden.⁵

Zunächst wird dazu der melanopischen Tageslicht-Effizienzfaktor (MDER) ermittelt. Dieser ergibt sich aus der Multiplikation des melanopischen Wirkfaktors $a_{mel,v}$ mit dem Verhältnis des melanopischen Tageslichtäquivalents für Normlicht D65 $K_{mel,D65}$ zum Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents für Tagsehen K_{cd} .

$$K_{mel,D65} = 753,86 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

$$K_{cd} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

$$\frac{K_{mel,D65}}{K_{cd}} = 1,10375$$

$$\text{MDER} = 1,10375 \cdot a_{mel,v}$$

Mit dem melanopischen Tageslicht-Effizienzfaktor (MDER) kann nun die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke (MEDI) berechnet werden. Dabei ist die vertikale Beleuchtungsstärke maßgeblich, da im Wesentlichen das unter flachen Winkeln in das Auge eintretende Licht melanopisch wirksam ist (siehe Abbildung 3.7).

Die gemessene vertikale, fotopische Beleuchtungsstärke E_v wird mit MDER multipliziert:

$$\text{MEDI} = E_v \cdot \text{MDER}$$

Mit zunehmendem Alter verringert sich der Transmissionsgrad der verschiedenen optischen Medien im Auge. Weitere vom Alter (A) abhängige Faktoren sind zu berücksichtigen.

Faktoren für diese altersabhängige Trübung der Augenmedien $k_{mel,trans}(A)$ sind in DIN/TS 5031-100 [47] enthalten (siehe Tabelle 3.18).⁶ Des Weiteren werden Anpassungsfaktoren $k_{Pupille}(A)$ für die altersabhängige Verkleinerung der Pupille gegeben. Diese betragen z. B. $k_{Pupille}=1$ für Personen im Alter von 32 und $k_{Pupille}=0,54$ für 75-Jährige.

⁵ In der Dokumentation des „WELL Building Institute“ wird alternativ zur MEDI auch das EML (equivalent melanopic lux) verwendet, mit dem Umrechnungsfaktor 0,91 · EML = MEDI. Die melanopische Beleuchtungsstärke unterscheidet sich im Zahlenwert von der hier definierten melanopisch äquivalenten Tageslicht-Beleuchtungsstärke um den Faktor $1/a_{mel,v,D65} = 1/0,906$. Hinweis: Diese Beschreibung und die Einheiten „melanopic lux“ oder „melanopic equivalent lux“ sind mit dem SI-System nicht vereinbar.

⁶ Die altersbedingte Verringerung des Transmissionsgrades der optischen Medien im Auge ist von der Wellenlänge abhängig. Die vereinfachte Tabelle der Korrekturfaktoren ist für die Bewertung von weißem Licht geeignet, nicht jedoch, wenn die Lichtquelle eine spektral stark strukturierte Charakteristik mit Spektrallinien oder farbig gefiltertem Licht aufweist. Abweichungen des altersbedingten Transmissionsgrades aufgrund der spektralen Zusammensetzung weißen Lichts mit unterschiedlichen Farbtemperaturen werden in dieser Näherung nicht berücksichtigt.

Das Produkt dieser beiden Faktoren beschreibt die altersabhängige Korrektur der melanopisch äquivalenten Tageslicht-Beleuchtungsstärke $MEDI(A)$:

$$MEDI(A) = MEDI \cdot k_{mel}(A)$$

mit $k_{mel}(A) = k_{mel,trans}(A) \cdot k_{pupille}(A)$
(siehe Tabelle 3.18).

Der Lichtbedarf älterer Menschen steigt also nicht nur für das Sehen (siehe Abbildung 3.11), sondern auch für die Funktion der circadianen Synchronisation.

Eine weitere für die nicht-visuelle Lichtwirkung relevante Norm, die DIN/TS 67600:2022 „Ergänzende Kriterien für die Lichtplanung und Lichtanwendung in Hinblick auf nicht-visuelle Wirkungen von Licht“ [48], enthält Planungsempfehlungen für Arbeits- und Nichtarbeitsstätten als Ergänzung zu anderen planungsrelevanten Normen wie der DIN EN 12464-1 [51] oder der ASR A3.4

[110]. Es sind hier nicht-visuelle Kriterien der Beleuchtung enthalten, die über die Größen Beleuchtungsstärke, Spektrum, Lichtverteilung und zeitlicher Verlauf der Beleuchtung definiert werden.

Eine große Rolle spielt dabei die Lichtverteilung, da melanopische Wirkung nur zu erzielen ist, wenn das Licht vornehmlich flächig, diffus aus dem oberen Halbraum unser Auge erreicht (siehe Abbildung 3.7). Auch hier wird der ursächliche Zusammenhang zum natürlichen Vorkommen des wirksamen Lichts, dem Taghimmel, erkennbar. In der Norm werden sowohl Tageslicht als auch Kunstlicht und Mischungen aus beiden betrachtet. So werden beispielsweise die Relevanz für die Planung melanopisch wirksamen Lichts für verschiedene Nutzungsarten sowie grobe Maßnahmen zur Berücksichtigung in konkreten Lichtplanungen beschrieben. Zielgrößen sind hier vor allem die Stabilisierung und Stärkung der inneren Uhr und des damit verbundenen



Abbildung 3.7: Die melanopische Wirksamkeit des Lichts ist abhängig vom Einfallswinkel des Lichts, der Position und Größe der Lichtquelle, aber auch von den Raumflächen (Materialien), welche das Spektrum und die Beleuchtungsstärke reduzierend beeinflussen.

Tabelle 3.18: Der wellenlängenabhängige Transmissionsgrad des Auges in Abhängigkeit vom Lebensalter

Alter	10	25	32	50	75	90
$k_{mel,trans}(A)$	1,13	1,05	1,00	0,84	0,59	0,46
$k_{pupille}(A)$	1,29	1,09	1,00	0,79	0,54	0,42
$k_{mel}(A)$	1,4577	1,1445	1,00	0,6636	0,3186	0,1932

$$MEDI(A) = MEDI \cdot k_{mel}(A)$$

Schlaf-Wach-Rhythmus sowie Förderung von Konzentration, Regeneration, Stimmung und Leistungsbereitschaft durch Beleuchtung.

Als Schwellwert für die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke ist gemäß DIN/TS 67600:2022 [48] ein Wert von $MEDI(A) = 250 \text{ lx}$ für eine 32 jährige Person anzustreben (siehe auch Vergleich in Abbildung 3.13).

Auch wenn es sich um eine Norm handelt, sind alle beschriebenen Maßnahmen freiwillig. Auch werden keine Verschiebungen des circadianen Rhythmus beabsichtigt, sondern lediglich allgemeine Planungshinweise für verschiedene Arbeitsplätze gegeben.

3.3.3 Der circadiane Rhythmus und die innere Uhr

Unter dem Begriff „circadianer Rhythmus“ versteht man per Definition einen biologischen Rhythmus mit einer Dauer von etwa 24 Stunden (circa=ungefähr, dies=Tag). Ein typischer circadianer Rhythmus ist also der Schlaf-Wach-Rhythmus des Menschen.

Schon in den 1950er Jahren erforschten Gustav Kramer und Jürgen Aschoff das Schlafverhalten von Personen, die sich unter Isolationsbedingungen ohne Kontakt zum Tagesablauf und zum Tageslichtrhythmus mehrere Wochen in künstlich beleuchteten Räumen aufhielten. Ihr Schlafverhalten wurde verglichen mit dem von weiteren Testpersonen, die sich unter normalen, vom Tageslicht beeinflussten Bedingungen befanden. Während Letztere regelmäßig zwischen 21:00 Uhr und 7:00 Uhr schliefen, veränderte sich das Schlafverhalten (also das Schlafbedürfnis) un-

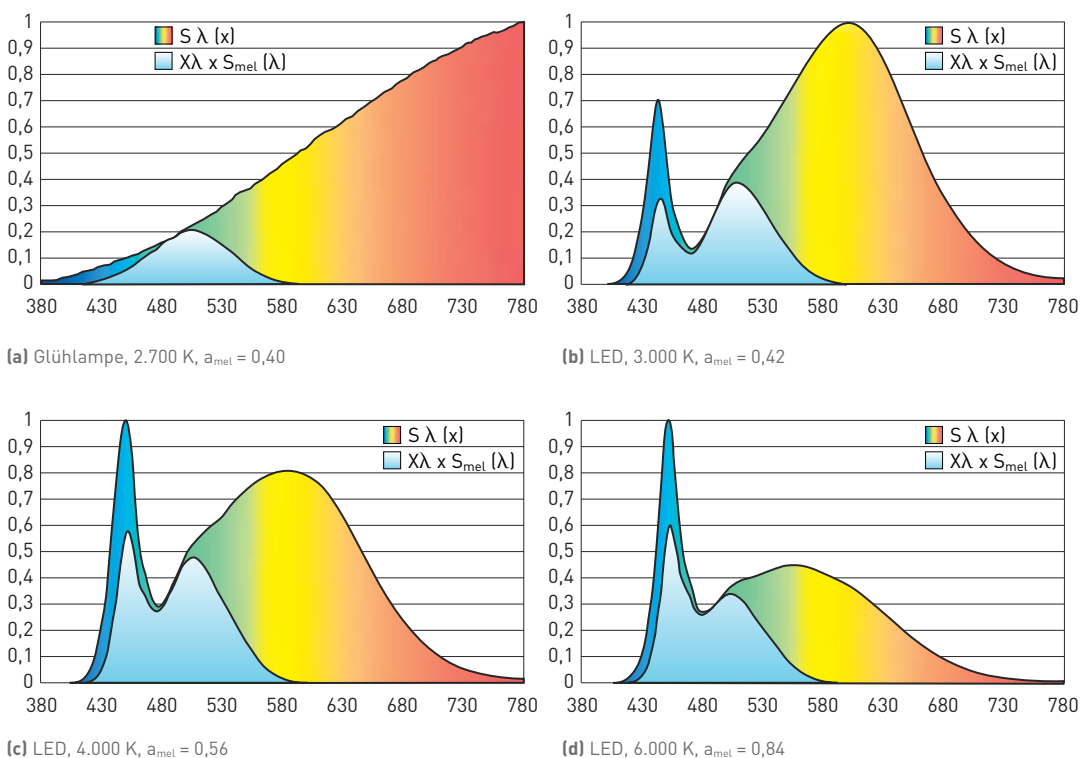


Abbildung 3.8: Radiometrisches Spektrum und melanopisches Wirkspektrum einer LED-Leuchte bei unterschiedlichen Farbtemperaturen und der sich ergebende melanopische Wirkungsfaktor a_{mel} . Zum Vergleich sind das radiometrische Spektrum und das melanopische Wirkspektrum einer Glühlampe (2.700 K) dargestellt.

ter Isolationsbedingungen nach wenigen Tagen völlig. Die Einschlaf- und Aufwachphase hatte sich täglich verschoben (siehe Abbildung 3.10). Nach etwa 21 Tagen schliefen die Testpersonen in der Zeit von 16:00 Uhr bis etwa 1:00 Uhr nachts. Schon nach wenigen Tagen hatte sich also eine wesentlichen Zeitverschiebung des Schlafrhythmus eingestellt.

Damit diese zeitliche Verschiebungen in Bezug zur Tageszeit korrigiert wird, muss die innere Uhr mit der Tageszeit synchronisiert werden. Licht ist hierfür der stärkste Zeitgeber. Über die bereits beschriebenen Ganglienzellen wird das Umgebungslicht zur Synchronisation der inneren Uhr genutzt. Die Effekte dieser Synchronisation können oft durch den Verlauf des natürlichen

Tageslichts erklärt werden, welches evolutionär gesehen den einzigen Lichtzeitgeber darstellt. Geeignetes Licht am Morgen ist am wirksamsten zur Unterstützung bei der Synchronisierung der inneren Uhr. So kann aber auch besonders helles Licht in den Mittagsstunden einer Nachmittagsmüdigkeit vorbeugen. Eine Korrespondenz findet sich in der höheren Tageslichteinstrahlung in der Mittagszeit (siehe Abschnitt 2.12). Weißes Licht mit erhöhtem Blauanteil oder Licht mit hoher Farbtemperatur, wie es dem Streulicht eines blauen Taghimmels entspricht, kann zu höherer Wachheit und Aufmerksamkeit führen. Auch in den Abendstunden kann dieser Effekt genutzt werden, um trotz fortgeschrittener Zeit beim Menschen eine erhöhte Wachheit zu erreichen.

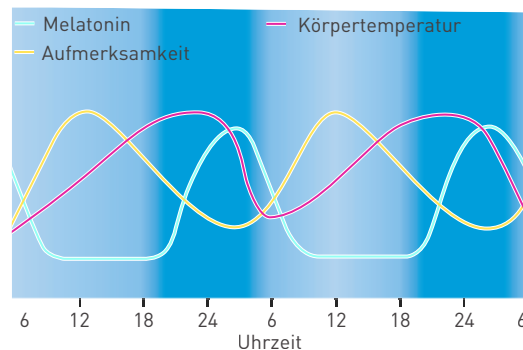


Abbildung 3.9: Verlauf verschiedener circadianer Rhythmen innerhalb von 24 Stunden

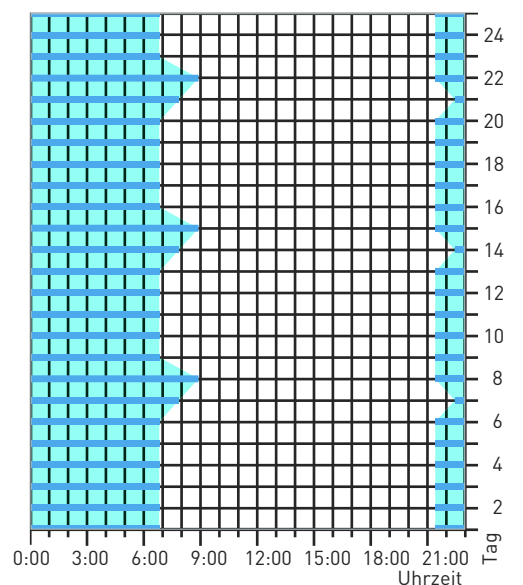


Abbildung 3.10: Schlafverhalten unter Normalbedingungen (links): Geschlafen wurde zwischen 21.00 Uhr und etwa 7:00 Uhr. Unter Isolationsbedingungen (rechts) schliefen die Testpersonen z. B. nach 21 Tagen in der Zeit von etwa 16:00 Uhr bis 1:00 Uhr nachts.

Am Arbeitsplatz kann Licht mit einem höheren Blauanteil Schläfrigkeit am Tage vorbeugen und gleichzeitig einen erholsameren Nachtschlaf unterstützen, wenn dieser abends durch entspannendes, gedämpftes Licht und Dunkelheit am Abend eingeleitet wird. Auf der anderen Seite können auch ungewünschte Wachphasen durch Licht induziert werden, wenn zum Beispiel nachts eine Badezimmerleuchte mit hohem Blauanteil eingeschaltet wird, die zu kurzzeitiger Schlaflosigkeit führen kann.

Biologisch funktionieren diese Prozesse durch die Ausschüttung oder Unterdrückung bestimmter Hormone (Melatonin, Serotonin usw., siehe Abschnitt 3.3.7 „Melatonin“), die für Müdigkeit oder Leistungsfähigkeit mitverantwortlich sind. Die Hormonabgabe verschiedener Drüsen im Gehirn wird maßgeblich über die photosensitiven Ganglienzellen getriggert, sodass der Einfluss von Licht auf den Hormonhaushalt direkt über im Blut vorhandene Hormonkonzentrationen nachgewiesen werden kann.

Circadiane Rhythmen sind beispielhaft in Abbildung 3.9.3 dargestellt für

- den Melatoninspiegel, der in der Nacht bzw. der Dunkelzeit stark ansteigt und am Tag stark reduziert ist, weshalb Melatonin auch als Schlafhormon bezeichnet wird und als Maß für die Phasenlage des circadianen Rhythmus betrachtet werden kann,
- die Aufmerksamkeit des Menschen als Folge des Cortisolspiegels und
- die Körpertemperatur als Folge der Aktivität des Organismus.

Der Verlauf des Melatoninspiegels im Blut teilt den 24-Stunden-Tag in einen biologischen Tag (Arbeitstag, die ergotrope Phase) und eine biologische Nacht (Ruhetag, die trophotrope Phase) ein (siehe auch Abschnitt 3.3.7). Der Melatoninspiegel ist bei jungen Menschen deutlich höher als bei älteren.

Schlafprobleme bis hin zu Krankheiten können auftreten, wenn die innere Uhr künstlich und für längere Zeit aus dem Tritt gebracht wird.

Ein Beispiel hierfür ist ständig wechselnde Schichtarbeit, die durch nächtliche Arbeitsplatzbeleuchtung und tagsüber künstlich hergestellte Dunkelheit einen permanenten Jetlag verursachen und so zu Gesundheitsproblemen führen kann. Eine solche Verschiebung kann durch den richtig eingestellten Verlauf des Lichts wieder synchronisiert werden.

Der Begriff „**melanopisch wirksames Licht**“ beschreibt insofern die zeitliche, relative Variation

physikalischer und lichttechnischer Kennwerte. Insbesondere soll die zeitliche Variation von Intensität und spektraler Zusammensetzung melanopisch wirksamen Lichts die „innere Uhr“ synchronisieren. Störungen, die die „innere Uhr“ aus dem Takt bringen und damit die Synchronisation unwirksam machen, sind nach Möglichkeit zu vermeiden.

3.3.4 Licht und Leistung

Die Leistungsbereitschaft des Menschen mit normal synchronisierter innerer Uhr ist in der Zeit zwischen ca. 10:00 Uhr und 12:00 Uhr am größten, fällt über die Nachmittagszeit leicht ab und steigt dann wieder an, bevor sie nachts ein Minimum durchläuft. Je nach Chronotyp („Eulen“ und „Lerchen“) kann dieser Rhythmus leicht in beiden Richtungen verschoben sein. Analog zum Schlaf-Wach-Rhythmus kann auch der Tagesverlauf der Leistungsfähigkeit durch Licht unterstützt werden.

Hohe Farbtemperaturen haben Auswirkungen auf die kognitive Leistungsfähigkeit, Aufmerksamkeit und Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung. Auch die Bearbeitung kreativer Aufgaben kann durch Licht mit höherem Blauanteil unterstützt werden. Neben dem Lichtspektrum ist auch die Intensität und Dauer der Lichtexposition von großer Bedeutung. Während im Freien je nach Bewölkung oft Beleuchtungsstärken von mehreren 10.000 lx herrschen, sind die Beleuchtungsstärken im Innenraum meist deutlich geringer. Eine Erhöhung der Intensität über einen längeren Zeitraum kann Aufmerksamkeit,

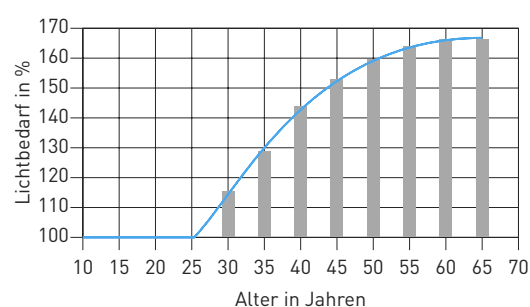


Abbildung 3.11:
Lichtbedarf und
Lebensalter

Konzentration, körperliche und kognitive Leistungsfähigkeit und sogar das Arbeitsgedächtnis positiv beeinflussen. Hier gilt: Gezieltes, zeitlich begrenztes Einwirken auf die allgemeine Leistungsfähigkeit durch Licht kann zu höherer Produktivität am Arbeitsplatz führen. Nicht zielführend ist hingegen eine Dauerexposition mit hellem Licht mit hohem Blauanteil, ohne entsprechende Erholungsphasen zu bieten.

Eines der effektivsten Einsatzgebiete ist die Bürobeleuchtung (siehe Kapitel 4.3.10 „Grundlegende Kriterien der Beleuchtungsplanung (Büro)“). Unterschiedliche Beleuchtungsphasen steigern die Konzentration, Kreativität und Leistungsfähigkeit. Wirksam ist dabei nicht nur aktivierendes, sondern auch beruhigendes Licht, welches Raum für Entspannung lässt. Gleiches gilt für die Beleuchtung in Bildungseinrichtungen, wo durch die Unterstützung des circadianen Rhythmus Aufmerksamkeit und konzentriertes Arbeiten verbessert werden und gleichzeitig die Fehlerrate reduziert wird (siehe Kapitel 4.9.2 „Allgemeinbeleuchtung (Ausbildungsstätten)“).

3.3.5 Licht und Wohlbefinden

Schlafqualität, Leistungsfähigkeit und Wohlbefinden sind eng miteinander verknüpft. Auswirkungen der Beleuchtung auf den circadianen Rhythmus beeinflussen also neben den bereits genannten Faktoren auch das allgemeine Wohlbefinden.

Wichtig ist, dass neben der aktivierenden Wirkung der Beleuchtung auch Regenerations- und Entspannungsphasen einbezogen werden.

Als natürliches Beispiel soll hier der Einfluss der Jahreszeiten auf die Stimmung angeführt werden. Stimmung und allgemeines Wohlbefinden sind in den Sommermonaten deutlich besser als zum Ende der Wintermonate. In extremeren Fällen können in den Wintermonaten Stimmungverschlechterungen bis hin zu Depressionen (Seasonal Affective Disorder, SAD) auftreten. Eine

bevorzugte Behandlungsmethode für SAD ist die Lichttherapie, bei der beim Patienten durch intensive künstliche Beleuchtung die Serotonin- und Melatoninausschüttung angeregt wird. Auch für Menschen, die nicht von SAD betroffen sind, kann eine gezielte zusätzliche Lichtexposition die Stimmung aufhellen.

Insbesondere alte Menschen benötigen viel melanopisch wirksames Licht. Diesem Bedürfnis kann durch häufigen Aufenthalt im Freien entsprochen werden. Meist ist dies bei älteren Menschen jedoch aus gesundheitlichen Gründen nicht in dem Maße möglich wie nötig. Bei sich ständig im Hause aufhaltenden Menschen werden die melanopischen Rezeptoren nur ungenügend stimuliert und das innere, circadiane System wird nicht mit dem Tagesverlauf synchronisiert. Die Folge sind Befindlichkeits- und Schlafstörungen, gesteigerte motorische Unruhe und depressive Verstimmungen.

Bei Bewohnern von Senioren-, Alten- und Pflegeheimen hat man durch zeitweilig hohe Zusatzbeleuchtung am Tage, z.B. durch Einschalten einer hellen Lichtdecke in Aufenthaltsräumen, das Schlafhormon der Bewohner unterdrückt und damit die Tagesmüdigkeit auf die natürlichen Nachtzeiten verschieben können. Anstelle von allgemeiner Müdigkeit und Unausgeschlafenheit am Tag sowie Schlaflosigkeit und Unruhe in der Nacht zeigten diese älteren Menschen durch zeitlich begrenzte, hohe Lichtdosen wieder einen Wachzustand am Tag und entsprechende Müdigkeit in der Nacht.

Auch das emotionale Wohlbefinden kann durch Licht positiv beeinflusst werden. Im Gegensatz zur rein melanopischen Lichtwirkung spielt hier die psychologische Komponente der Lichtwahrnehmung eine wichtige Rolle. So können mit Licht einladende, attraktive Räume geschaffen werden, die über die emotionale Wirkung das Wohlbefinden verbessern können. Licht kann Dramaturgie schaffen und Aufmerksamkeit erregen (z.B. im Schaufensterbereich eines Shops). Licht kann beruhigend und entspannend wirken (z.B. in Hotelzimmern oder Pausenräumen).

Licht kann aber auch ästhetisch das Büro oder den Besprechungsraum in Szene setzen und so zu höherem Wohlbefinden bis hin zu größerer Identifikation und Zufriedenheit mit dem Arbeitsplatz führen.

3.3.6 Human Centric Lighting und Lichtplanung

Von der Natur vorgegeben und daher gesundheitlich unbedenklich ist ein Nachahmen des natürlichen Tageslichtverlaufs über den Tag mittels künstlicher Beleuchtung. Räume für die Bildschirmarbeit gegenüber dem Tageslicht zu verdunkeln, sollte vermieden werden. Gut entblendete Bildschirme sowie eine günstige Position und Ausrichtung der Bildschirmarbeitsplätze machen dies in aller Regel möglich (siehe Kapitel 4.3, „Beleuchtung von Büros und Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen“).

In vielen Fällen ist der Tageslichteintrag in den Gebäuden, in denen wir uns aufhalten, jedoch gering oder nicht vorhanden. Eine abgestimmte künstliche Beleuchtung, die wechselnde Farbtemperatur und Intensität des Tageslichts berücksichtigt, kann hier helfen, die innere Uhr richtig zu synchronisieren. Auch die Richtung, aus der das Licht auf unser Auge trifft, und die Flächigkeit der Lichtquelle sind hier maßgebliche Faktoren (siehe Abbildung 3.7). Wichtig für den Einsatz melanopisch wirksamer Beleuchtung ist immer, dass das richtige Licht zur richtigen Zeit eingesetzt wird. So kann zwar die Wachsamkeit durch Licht mit erhöhtem Blauanteil gesteigert werden, eine dauerhafte Beleuchtung mit solchem Licht führt aber letztendlich nicht zum gewünschten Effekt. Vielmehr soll die künstliche Beleuchtung zum richtigen Zeitpunkt unterstützend eingreifen, jedoch immer genügend Entspannungphasen zulassen.

Durch sorgfältige Planung kann die positive Wirkung des Lichts auf den Menschen optimal zur Wirkung gebracht werden. Dabei kann eine künstliche Beleuchtung die Eigenschaften des

Tageslichts nie vollständig kopieren, sondern sie dient dazu, wichtige Impulse zu geben.

Auch für die Bewertung und Zertifizierung von Gebäuden erlangen die Aspekte des Human Centric Lighting und weitere Funktionen des Lichtmanagements zunehmend an Bedeutung und sie werden im Punkteschema einiger Zertifizierungssysteme berücksichtigt (siehe Kapitel 3.6 „Gebäudezertifizierung“).

Anforderungen an die Lichtsteuerung

Essentiell ist auch die Einplanung geeigneter Lichtsteuerungssysteme, die circadiane Lichtabläufe realisieren können. Als in vielen Fällen ausreichende Mindestanforderung muss ein geeignetes Steuergerät hierfür die zeitliche Variation des Lichts, der Farbtemperatur und ggf. der Helligkeit in Anlehnung an das Tageslicht ermöglichen.

Abhängig von der Anwendung können jedoch auch weitere Funktionen des Steuergeräts und der Bedienoberfläche gefordert sein (siehe auch Kapitel 8 „Lichtmanagement“). Häufig gefordert sind:

- Die Möglichkeit zur individuellen Anpassung des circadianen Verlaufs durch den Nutzer
- Die Möglichkeit, mehrere circadiane Verläufe zur Auswahl zu hinterlegen
- Die stufenlose manuelle Einstellung der Helligkeit
- Die stufenlose manuelle Einstellung der Lichtfarbe
- Der Aufruf voreingestellter Lichtszenen
- Die Möglichkeit zur individuellen Anpassung der Lichtszenen.

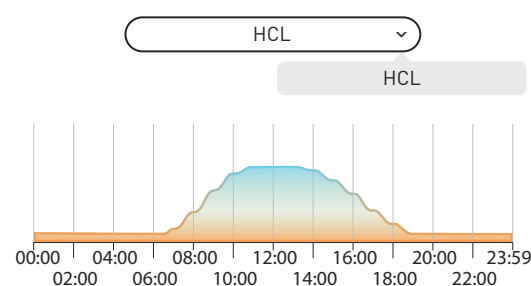


Abbildung 3.12: Beispiel eines melanopisch wirksamen Tagesverlaufs mit einer Dynamik in der Beleuchtungsstärke und der Lichtfarbe (mit dem Lichtmanagementsystem TRILUX LiveLink WiFi)

Ein Beispiel für einen circadianen Verlauf zeigt die Abbildung 3.12. Der gezeigte Verlauf orientiert sich am natürlichen Tageslicht und ist z. B. dazu geeignet, in räumlichen Bereichen ohne oder mit wenig Tageslicht eingesetzt zu werden. Der Verlauf der Farbtemperatur wirkt auf die innere Uhr sich dort dauerhaft aufhaltender Personen synchronisierend und kann ihren circadianen Rhythmus unterstützen.

In Räumen mit guter oder bereichsweise guter Tageslichtversorgung empfiehlt es sich dazu häufig, die melanopische Wirksamkeit mit einem energiesparenden Betrieb der Beleuchtung zu kombinieren. In der Norm DIN/TS 67600:2022 [48] heißt es dazu: „Nichtvisuell wirksame Beleuchtung und Energieeffizienz stehen nicht im Widerspruch. Eine sinnvoll geplante Lichtsteuerung stellt eine hohe Effizienz des Gesamtsystems sicher.“ Das Lichtmanagement sollte dann neben der Variation der Farbtemperatur auch eine tageslichtabhängige Regelung ermöglichen.

Ein Bezug der Farbtemperatur des Kunstlichts auf die gemessene Farbtemperatur des einfallenden Tageslichts ist hier eine weitere sinnvolle Option.

Anforderungen an Leuchten

Ebenso ergeben sich für die einzusetzenden Leuchten spezifische Anforderungen. Damit Licht melanopisch wirksam sein kann, muss die spektrale Verteilung dem Tageslicht ähnlich sein. Um den Tagesverlauf nachbilden zu können, muss die Lichtfarbe der Leuchte stufenlos einstellbar – durchstimmbare – sein und den gesamten benötigten Farbtemperaturbereich abdecken. Moderne Zweckleuchten aller Bauformen stehen heute dank der verwendeten LED-Technologie mit nur geringem Mehraufwand mit fein abstimmbaren Farbtemperaturen und Spektren zur Verfügung. Im TRILUX-Produktportfolio werden solche Leuchten als „Active“-Leuchten bezeichnet und sind durch den Namenszusatz „Act“ in der Leuchtenbezeichnung zu erkennen.

Da sich der melanopisch sensitive Bereich überwiegend im unteren Halbraum des Auges befindet

(siehe Abbildung 3.7), ist neben dem Spektrum und der Intensität auch der Einfall des Lichts von großer Bedeutung. Eine großflächige, diffuse Abstrahlung im oberen Halbraum begünstigt die melanopische Wirksamkeit. Flächenleuchten, aber auch Hängeleuchten mit hohem Indirektanteil, sind also besonders geeignet.

Der Vergleich in Abbildung 3.13 zeigt:

Im Fall a) mit tiefstrahlenden Downlights:

- Eine ausreichende aktivierende Wirkung durch die künstlichen Beleuchtung kann, auch bei einer erhöhten Beleuchtungsstärke von 703 lx, selbst für 32-jährige Nutzer nicht erreicht werden.

Im Fall b) mit flächigen Einlegeleuchten:

- Eine ausreichende aktivierende Wirkung durch die künstlichen Beleuchtung kann für 32-jährige Nutzer bei einer erhöhten Beleuchtungsstärke von 900 lx knapp erreicht werden.
- Bei gedimmtem Betrieb auf die minimale normgerechte Beleuchtungsstärke von 500 lx wird sie bei Weitem nicht erreicht.

Im Fall c) mit direkt-indirekt strahlenden Hängeleuchten bei einer Farbtemperatur von 4.000 K:

- Bei einer Beleuchtungsstärke gemäß der Anwendung der in der Norm DIN EN 12464-1 [51] eingeführten Kontextmodifikatoren auf 1.000 lx kann eine ausreichende aktivierende Wirkung auch für 50-jährige Nutzer vollständig erreicht werden.
- Bei gedimmtem Betrieb auf die minimale normgerechte Beleuchtungsstärke von 500 lx wird eine ausreichende aktivierende Wirkung für 32-jährige Nutzer weiterhin erreicht. Für 50-jährige Nutzer kann sie bei 500 lx nicht mehr erreicht werden.

Im Fall d) mit direkt-indirekt strahlenden Hängeleuchten bei variabler Farbtemperatur bis zu 6.000 K:

- Eine ausreichende aktivierende Wirkung durch die künstlichen Beleuchtung kann bei einer normgerechten minimalen Beleuchtungsstärke von 500 lx für 32-jährige Nutzer sehr gut erreicht und selbst für 50-jährige Nutzer knapp erreicht werden.
- Bei einer Erhöhung der Beleuchtungsstärke gemäß der Anwendung der in der Norm DIN EN 12464-1 [51] eingeführten Kontextmodifikatoren auf 1.000 lx kann eine ausreichen-

de aktivierende Wirkung für 50-jährige Nutzer sehr gut erreicht werden.

Eine Beleuchtungsanlage wie in Abbildung 3.13 d kann zusätzlich um direktstrahlende Komponenten (ggf. mit fester Farbtemperatur) ergänzt werden. Es muss dabei natürlich sichergestellt werden, dass auch die Unterstützung der Sehaufgabe am jeweiligen Arbeitsplatz sowie alle weiteren visuellen Kriterien der Beleuchtung jederzeit eingehalten werden.



(a) Büroraum mit Downlights, bei 4.000 K
 \bar{E}_h im Arbeitsbereich: 703 lx
 E_v am Arbeitsplatz: 324 lx
 $a_{mel,v}$ am Arbeitsplatz: 0,56
 $MEDI(32)$ am Arbeitsplatz: $324 \text{ lx} \cdot 0,56 \cdot 1,104 \cdot 1 = 200 \text{ lx}_{MEDI}$
 $MEDI(50)$ am Arbeitsplatz: $324 \text{ lx} \cdot 0,56 \cdot 1,104 \cdot 0,66 = 132 \text{ lx}_{MEDI}$



(b) Büroraum mit flächigen Einlegeleuchten, bei 4.000 K
 \bar{E}_h im Arbeitsbereich: 909 lx
 E_v am Arbeitsplatz: 380 lx
 $a_{mel,v}$ am Arbeitsplatz: 0,56
 $MEDI(32)$ am Arbeitsplatz: $380 \text{ lx} \cdot 0,56 \cdot 1,104 \cdot 1 = 235 \text{ lx}_{MEDI}$
 $MEDI(50)$ am Arbeitsplatz: $380 \text{ lx} \cdot 0,56 \cdot 1,104 \cdot 0,66 = 155 \text{ lx}_{MEDI}$



(c) Büroraum mit arbeitszonal angeordneten Hängeleuchten, direkt-indirekt strahlend, bei 4.000 K
 \bar{E}_h im Arbeitsbereich: 1.258 lx
 E_v am Arbeitsplatz: 1.013 lx
 $a_{mel,v}$ am Arbeitsplatz: 0,56
 $MEDI(32)$ am Arbeitsplatz: $1.013 \text{ lx} \cdot 0,56 \cdot 1,104 \cdot 1 = 626 \text{ lx}_{MEDI}$
 $MEDI(50)$ am Arbeitsplatz: $1.013 \text{ lx} \cdot 0,56 \cdot 1,104 \cdot 0,66 = 413 \text{ lx}_{MEDI}$



(d) Büroraum mit arbeitszonal angeordneten Hängeleuchten, direkt-indirekt strahlend, bei 6.000 K
 \bar{E}_h im Arbeitsbereich: 1.258 lx
 E_v am Arbeitsplatz: 1.013 lx
 $a_{mel,v}$ am Arbeitsplatz: 0,84
 $MEDI(32)$ am Arbeitsplatz: $449 \text{ lx} \cdot 0,56 \cdot 1,104 \cdot 1 = 939 \text{ lx}_{MEDI}$
 $MEDI(50)$ am Arbeitsplatz: $1.013 \text{ lx} \cdot 0,84 \cdot 1,104 \cdot 0,66 = 620 \text{ lx}_{MEDI}$

Abbildung 3.13: Vergleich unterschiedlicher Beleuchtungskonzepte in einem Büroraum bzgl. ihrer melanopischen Wirksamkeit ($MEDI(A) = E_v \cdot MDER \cdot k_{mel}(A)$) siehe Kapitel 3.3.2, Werte für $a_{mel,v}$ siehe Abbildung 3.8)

Anforderungen an den Raum

Human Centric Lighting basiert auf einer interdisziplinären und integralen Planungsweise. Idealerweise in guter Abstimmung mit sämtlichen Fachplanern. Einen Ansatz hierzu beschreibt der Lighting-System-Design-Prozess, welcher in der DIN CEN/TS 17165 [15] „Licht und Beleuchtung – Planungsprozess für Beleuchtungssysteme“ veröffentlicht ist. Insofern ist es für ein gutes Planungsergebnis, mit Blick auf die Wirkung durch die Lichtlösung, essentiell notwendig, dass sich die Raumarchitektur mit der Lichtplanung im Detail abstimmt. Anders als für die Erfüllung der meisten Sehaufgaben sind für die melanopische Lichtwirkung die vertikale Beleuchtungsstärke E_v und die Beleuchtungsstärke am Auge des Nutzers ausschlaggebend. Farbgebung und Reflexionsgrade im Raum sollten diese Verteilung unterstützen (siehe Beispiel in der Abbildung 3.8).

Aufgaben des Planers

Um eine zielgerichtete, langfristige Wirkung auf den Menschen, seine Gesundheit, sein Wohlbefinden und seine Leistungsfähigkeit zu erzielen, muss die nicht-visuelle Wirkung von Licht so früh wie möglich in den Planungsprozess mit einbezogen werden. Für den Planer bedeutet das, im Vorfeld die nicht-visuellen Rahmenbedingungen für den zukünftigen Nutzer der Beleuchtungsanlage zu berücksichtigen, danach zu planen und abschließend zu dokumentieren (siehe Abbildung 3.14).

Für den Entscheidungsprozess benötigt der Planer Informationen über:

- Nutzer
- Sehaufgabe
- Nutzungszeit
- Räumlichkeiten.

Die folgenden Fragen geben einen Themenrahmen und sollte der verantwortungsvolle Planer für eine melanopische Beleuchtungsplanung beantworten können:

- Welcher Nutzergruppe dient die fertige Anlage?
 - Handelt es sich um:
 - ein privates Umfeld?
 - eine Schule mit unterschiedlichen Ansprüchen für Lehrer und Schüler?
 - Arbeitnehmer in Büroumgebung oder Produktion?
 - Patienten in Krankenhäusern, Bewohner in Pflegeheimen oder Pflegepersonal?
 - Leitwarten und sicherheitsrelevante Tätigkeiten?
 - Wie Alt sind die Nutzer im Durchschnitt?
 - In welcher Alterspanne?
- Welche Sehaufgabe muss erfüllt werden?
 - Vgl. ASR A3.4 und DIN EN 12464-1
 - Wie ist die Hauptblickrichtung des Nutzers?
 - Im Wesentlichen nach unten geneigt
 - Im Wesentlichen horizontal
 - Mit wechselnden Blickrichtungen
 - Welche sicherheitsrelevanten Aspekte sind zu berücksichtigen?
 - Vgl. Gefährdungsbeurteilung
 - Besteht erhöhtes Unfallrisiko?

<p>Nutzer</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Festlegung der Nutzergruppe</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Alter der Gruppe</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Altersspanne der Gruppe</div>	<p>Sehaufgabe</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Festlegen der Sehaufgabe</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Hauptblickrichtung</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Sicherheitsrelevanz</div>
<p>Nutzungszeit</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Dauer des Aufenthalts</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Zeitraum</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Schichtarbeit</div>	<p>Raum</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Tageslichtversorgung und Verfügbarkeit</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Nutzungsart</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Raumoberfläche</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Objekte und deren Oberflächen</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Raumabmessungen</div>

Abbildung 3.14: Für die Planung nach DIN/TS 67600 relevant

- Wie ist die Nutzungszeit der Beleuchtungsanlage?
 - Dauer des Aufenthalts:
 - Bis 30 Minuten
 - Bis 4 Stunden
 - Über 4 Stunden
 - Für welchen Zeitraum?
 - Morgens
 - Mittags
 - Abends
 - Nachts
 - In Verbindung mit Schichtarbeit?
 - ggf. Gefährdungsbeurteilung
- Wie ist der Raum beschaffen?
 - Ist Tageslicht vorhanden?
 - Einfluss von Fenstern berücksichtigen
 - Größe der Tageslichtöffnung
 - Spektrale Transmission der Verglasung
 - Ausrichtung des Gebäudes
 - Verbauung
 - Sonnen- und Blendschutz
 - Wie wird der Raum genutzt?
 - Wohnraum, Büro, Produktion, Schulraum, usw.
 - Wie sind die Raumbooberflächen beschaffen?
 - Wirken sich die Reflexionseigenschaften auf den MEDI aus?
 - Wirkt sich die Einrichtung auf den MEDI aus?
 - Welche Abmessungen hat der Raum?
- durchschnittliches Alter und Altersverteilung der Nutzer, soweit diese für die Ermittlung von Planungswerten herangezogen wurden
- Farben reflektierender Raumflächen und Einrichtungen
- melanopische Reflektions- und Transmissionsgrade
- die Lage, Anzahl und Art der Fenster und Dachoberlichter
- Transmissionsgrad und Farbwirkung der Verglasung
- Angaben zu Sonnenschutzvorrichtungen (Wärme- und Blendschutz)
- gegebenenfalls Angaben zur tageslichtabhängigen Steuerung.

Eine Checkliste sowie Anwendungsbeispiele finden sich in der DIN/TS 67600 [48].

3.3.7 Melatonin

Das Regulativ vieler organischer Vorgänge im Menschen ist die Änderung der Melatoninkonzentration im Blutserum. Melatonin ist ein Hormon, das in der Zirbeldrüse (Epiphyse) im Zentralgehirn produziert wird. Der Melatoninspiegel wird als signifikanter Indikator für die Aktionsfähigkeit des Menschen, als Indikator für das Schlafbedürfnis und für die biologische Uhr angesehen.

Die Höhe des Melatoninspiegels wird direkt von der auf die Netzhaut auftreffenden Lichtenergie gesteuert. Wenig Licht bedeutet eine hohe Melatoninausschüttung und damit hohes Schlafbedürfnis. Die Körpertemperatur sinkt. Umgekehrt wird durch Licht die Melatoninproduktion unterdrückt und die Vitalität und Wachsamkeit gesteigert.

Bestandteil einer vollständigen Planung ist eine ausführliche Dokumentation. Diese macht die Planung auch nach Jahren nachvollziehbar und bildet die Grundlage für die Installation und Wartung.

Die Dokumentation der Planung beinhaltet neben den allgemeinen Planungsparametern und Berechnungen folgende Angaben zur Berücksichtigung der nicht-visuellen Wirkung:

- bzgl. der Beleuchtungsstärken, Lichtfarben, MEDI und a_{mel} -Werte der verwendeten Lichtquellen:
 - den zeitlichen Verlauf für alle einstellbaren Parameter
 - die Werte der festen Vorgaben

Untersuchungen mit Schichtarbeitern führten zu der Erkenntnis, dass durch das Angebot hoher Beleuchtungsstärken und neutralweißer bzw. kaltweißer Lichtfarbe der Melatoninspiegel gesenkt und das Schlafbedürfnis und damit Müdigkeit, Konzentrationsmängel und Arbeitsfehler in

der Nachtschicht signifikant verringert werden können.

Allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass im Sinne der Gesundheitsförderung, insbesondere im Schichtbetrieb, eine Unterstützung des circadianen Rhythmus angestrebt werden sollte (siehe Kapitel 3.3.1 „Human Centric Lighting“). Arbeitsfehler und Unfallgefahr können hier z.B. auch durch eine Erleichterung der Sehaufgabe mittels erhöhter Beleuchtungsstärken im warmweißen Spektralbereich erreicht werden. Auf melanopisch wirksame Blauanteile im Licht kann verzichtet werden. Die innere Uhr des Schichtarbeiters kann auf diesem Wege in möglichst geringem Maße „aus dem Takt“ gebracht werden.

3.3.8 Tageslicht

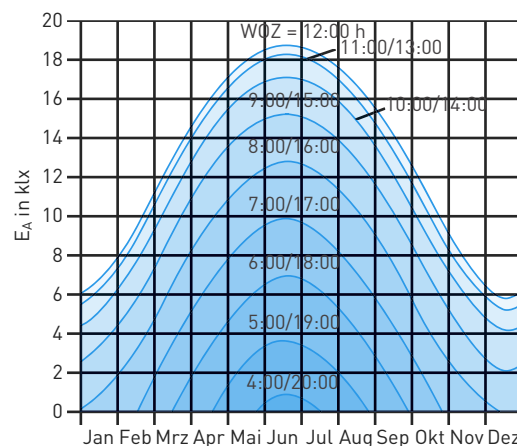
Die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke E_h des Tageslichts schwankt in weiten Bereichen. Bei bedecktem Himmel um 12:00 Uhr – je nach Jahreszeit, geographischer Ortslage und Wolken- bzw. Dunstanteil – beträgt die Beleuchtungsstärke zwischen 6.000 lx und 20.000 lx (siehe Abbildung 3.15). Bei Sonnenschein und klarem Himmel sind es sogar über 100.000 lx. Bei Mondschein messen wir etwa 0,1 lx. Diese Dynamik des Lichtangebotes wird als normal und natürlich empfunden und vermittelt dem Menschen Wohlempfinden.

In Arbeitsstätten und Aufenthaltsräumen dagegen sind Beleuchtungsstärken installiert, die zur Bewältigung der Sehaufgaben notwendig sind und in der Regel nicht höher als 500 lx liegen – ohne wesentliche Dynamik im Beleuchtungsniveau, bei Bedarf rund um die Uhr (siehe Kapitel 2.12 „Lichttechnische Kriterien der Beleuchtung, Tageslicht“). Die Lichtfarbe des Tageslichts schwankt ebenfalls in weiten Grenzen. Am frühen Morgen wird das Tageslicht mehr durch die „warmen“, d. h. langwelligen Teile des Spektrums der aufgehenden Sonne bestimmt. Wir sprechen vom Morgenrot. Bald danach wird das Tageslicht bis zur Mittagszeit mehr und mehr durch blaue, kältere Farbtöne beeinflusst, die bei blauem Himmel besonders stark ausgeprägt sind. Am Abend sind es wieder die warmen langwelligen Strahlungsanteile der untergehenden Sonne, die das Abendrot ausmachen.

Die Ursache von Morgen- und Abendrot ist die stärkere Brechung der blauen Strahlungsanteile und deren Wegreflexion in den Weltenraum auf dem verlängerten Lichtweg von der Sonne zur Erde. Die aus blauem Himmel und dem Sonnenlicht gemischte Farbtemperatur des Tageslichts durchläuft einen Bereich von etwa 10.000 Kelvin (K) am Mittag bis 3.000 K beim Abendrot. Der blaue Himmel selbst hat eine Farbtemperatur von etwa 20.000 K, die Sonne nur von etwa 5.000 K. Der Mond hat eine Farbtemperatur von etwa 4.200 K.

Für die lichttechnische Fachplanung im Sinne von HCL wird das Tageslicht als die Referenzqualität angesehen. Hierbei gibt es keine statische Lichtstimmung, sondern eine fortwährende Dynamik. Als ein markantes Merkmal lässt sich z. B. herausstellen, dass Tageslicht u. a. in Form einer Komposition aus einer flächigen, tageslichtweißen Lichtkomponente (Himmel) und einer akzentuierenden, warmweißen Lichtkomponente (Sonne) orchestriert ist.

Abbildung 3.15: Jahres- und tageszeitlicher Verlauf der mittleren horizontalen Beleuchtungsstärke im Freien bei gleichmäßig bedecktem Himmel für Orte 51° nördlicher Breite. Die Parameter der Kurven geben die wahre Ortszeit WOZ an.



3.3.9 Optische Strahlung

Als optische Strahlung wird jede elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 100 nm (Nanometer) bis 1 mm (Millimeter) bezeichnet. Die optische Strahlung wird gemäß Tabelle 3.19 in weitere Bereiche unterteilt. Die positiven wie auch negativen Wirkungen der Strahlungen auf den Menschen sind stark von der Wellenlänge und der Bestrahlung, d. h. dem Produkt aus Bestrahlungsstärke und der Einwirkungsdauer, abhängig. Im Falle schädigender Wirkungen wird der Grad der schädigenden Wirkung durch Expositionsgrenzwerte gekennzeichnet, die Bestandteil des Arbeitsschutzes sind.

Die „Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung“ vom 27. Juli 2010 betrifft den Schutz von Arbeitnehmern vor Schädigungen von Augen und Haut durch die Exposition von künstlicher, optischer Strahlung, einschließlich der Laser-Strahlung (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung). Sie gilt nicht für die natürliche Strahlung. Sie definiert die Spektralbereiche der künstlichen Strahlung, verweist auf mögliche schädigende Wirkungen (s. auch Tabelle 3.19) und legt den Expositionsgrenzwert hinsichtlich des Arbeitsschutzes fest. Die Verordnung beruht auf einer Europäischen Richtlinie (EG-Arbeitsschutzrichtlinie 2006/25/EG [136]) und ist in allen EU-Ländern in nationale Vorschriften umgesetzt worden.

Eine spezielle potentielle Gefährdung, die sich bei Einsatz von LED-Leuchtmitteln ergeben kann, ist die sogenannte „Blaulichtgefahr von Lichtquellen und Leuchten“, deren Beurteilung in der Norm DIN IEC/TR 62778:2014-03; DIN SPEC 42778:2014-03 [23] beschrieben ist. Mit Anwendung dieser Norm erfolgt eine Einteilung von Lichtquellen in Risikogruppen RG0 bis RG3. Für Leuchten sind gemäß EN 60598-1:2015-10; VDE 0711-1:2015-10 [72] die Risikogruppen RG0 bis RG2 zulässig und ggf. ist ein warnendes Bild-

zeichen an oder in der Leuchte anzubringen (siehe auch Kapitel 5.4 „Fotobiologische Sicherheit“).

Die schädigenden Wirkungen des Tages- und Sonnenlichts sind nicht Inhalt dieser Ausführungen. Sie beschäftigen Dermatologen und Klimaforscher, die zunehmend Sorgen in Bezug auf die Veränderung der spektralen Zusammensetzung der auf die Erde auftreffenden Sonnenstrahlung äußern. Ebenso hinterfragen die Verhaltensforscher Gewohnheiten, Neigungen und Bedürfnisse der Menschen und warnen – wie auch die Dermatologen – davor, Sonnenlicht aus kosmetischen und modischen Gründen unkontrolliert zu genießen, anstatt es dosiert zu nutzen.

3.3.10 Strahlungswirkungen

Schon vor vielen Jahrtausenden wurde die Sonne als Quelle des Lebens und deren gesundheitsfördernde Wirkung erkannt. In der Antike (vor ca. 3.000 Jahren) war die Lichtbehandlung Teil der Sonnenkulturen. Erst ab 1770 n. Chr. wurde die heilende Wirkung von Sonnenbädern wieder erkannt und im 19. Jh. zur Behandlung von Rachitis, von Gelenkerkrankungen und von inneren Leiden angewandt. Der Nutzen der Heliotherapie stützte sich auf Beobachtungen und Erfahrungen. Erst seit wenigen Jahrzehnten wird die therapeutische Wirkung natürlicher und künstlicher Strahlung systematisch untersucht und die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Prophylaxe, Therapie und Rehabilitation eingesetzt. Künstliche Lichtquellen mit entsprechenden Spektren sind daraufhin entwickelt worden. Solarien sind mehr als nur kosmetisch wirkende Modeerscheinungen.

Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung (siehe Abbildung 3.16) enthält nur einen sehr geringen Teil, der vom Auge als visuelle Strahlung, als Licht, wahrgenommen werden kann. Die angrenzenden Spektralbereiche haben sehr unterschiedliche Wirkungen auf den Menschen (s. a. Kapitel 5.12 „Elektromagnetische Sicherheit“).

Lichtschutz ist eine der wichtigsten Funktionen der Haut für den Aufbau eigener Schutzmechanismen. Pigmentneubildung, Pigmentdunkelung und Lichtschwiele (Verdickung der Hornschicht der Haut als Schutz gegen Eindringen von Strahlung) werden z. B. durch Solarienbesonnung aktiviert – eine gute Möglichkeit, rechtzeitig vor dem Urlaub damit zu beginnen.

Vitamin-D3-Photosynthese: Die Aufnahme von UV-B-Strahlung durch die Haut fördert die Bildung von Vitamin D3. Dieses Hormon ist die Voraussetzung für die Einlagerung von Kalzium in die Knochen. Damit kann Osteoporose (Knochenschwund) und Osteomalazie (Knochen-erweichung) vorgebeugt werden. Wissenschaftler gehen heute davon aus, dass weitaus mehr Funktionen in unserem Körper von diesem wichtigen Vitamin beeinflusst und gesteuert werden. Defizite in den sonnenarmen Wintermonaten können mit entsprechender Bestrahlung (Solarium) ausgeglichen werden.

Erhöhung der Leistungsparameter: Bestrahlung mit UV-„Licht“ kann generell zu einer Verbesserung der Blutfließeigenschaften und damit zu einer besseren Sauerstoffausnutzung führen. Es kommt dann zu einer Normalisierung der Kreislaufgrößen, wie Pulsfrequenz, Blutdruck

und Atmung. Eine spürbare Steigerung der Leistungsfähigkeit ist die Folge.

Erhöhung der Widerstandskraft: In einer maßvollen Dosierung (weit weniger als zur kosmetischen Bräunung erforderlich) kann UV-B-Strahlung zu einem allgemeinen subjektiven Wohlbefinden, zur Vorbeugung von Krankheiten und zur Stärkung des Organismus beitragen. Besondere immunorientierte Effekte steuern die körpereigene Infektabwehr, erhöhen so z. B. die Widerstandskraft gegen Erkältungskrankheiten.

Naturkosmetikum für die Haut: UV-„Licht“ von Sonne und Solarium verleiht der Haut nicht nur einen angenehm leicht gebräunten Teint, sondern kann auch zur Verbesserung des allgemeinen Hauterscheinungsbildes beitragen.

UV-Strahlung in der Therapie: Die PUVA-Photochemotherapie, eine Kombination von lichtsensibilisierenden Medikamenten (Psoralenen) mit UV-A-Bestrahlung, wird zur Behandlung der Schuppenflechte (Psoriasis) und von mehr als 20 weiteren Indikationen eingesetzt. Es sind weitere Therapieverfahren hinzugekommen, wie z. B. die SUP (selektive UV-Phototherapie), eine Bestrahlung mit speziellen UV-B-Leuchtstofflampen, jedoch ohne Sensibilisatoren (Medikamente), ferner auch die Balneo-Phototherapie, mit der das Klima des Toten Meeres zusammen mit dem Sonnen-UV simuliert wird und zu guten Therapieerfolgen – insbesondere bei Psoriasis und Neurodermitis-Effekten – geführt hat. Es werden „Totes Meer“-Badewannen mit Bestrahlungseinheiten in ambulanten Therapiezentren und auch in der Heimtherapie angewendet. Die Atopische Dermatitis (Neurodermitis) bei Kleinkindern und zunehmend auch bei Erwachsenen zu diagnostizieren und zu behandeln, erfordert viel Fachkenntnis des Dermatologen, insbesondere im Umgang mit optischer Strahlung. Auf die Phototherapie sprechen die Patienten meist recht gut an. Beginnend durch Behandlung mit dem UV-A-Spektrum künstlicher Lichtquellen kann durch Adaptation der Patienten später das positive Wirkungsspektrum sogar bis in den UV-B-Bereich erweitert werden.

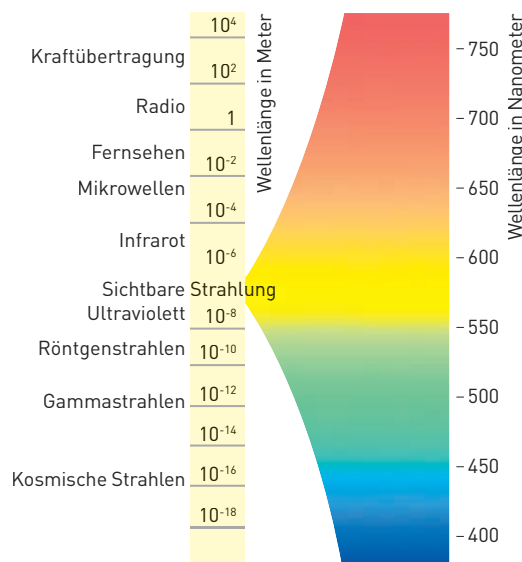


Abbildung 3.16: Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung

Saisonal abhängige Depression (SAD): War bei den bisher beschriebenen Anwendungen der Ultraviolettbereich der Strahlung die Wirkungskomponente, ist bei der SAD (Seasonal Affective Disorder) der sichtbare Bereich, also das Licht, wirksam. Unter SAD – einer Depressionsart, die auf Lichtmangel zurückzuführen ist – leiden in unseren Breiten in der dunklen Jahreszeit viele Menschen. Ein größerer Prozentsatz davon muss therapiert werden. Hohe Beleuchtungsstärken (mindestens 2.500 lx über etwa 2 Stunden) auf der Netzhaut und flimmerfreies weißes Licht sind u.a. erforderlich. Lampen und Leuchten müssen möglichst frei von ultravioletter und infraroter (Wärme-)Strahlung sein. Die Therapieerfolge sind nachweisbar, obwohl die Wirkungsmechanismen noch nicht völlig geklärt sind. Ein wesentlicher Faktor ist aber sicher der Einfluss des Lichteinfalls in das Auge auf die innere Uhr, der im Abschnitt 3.3.3 beschrieben ist.

Blaulichtbestrahlung: Entscheidend für die Photoisometrie von Bilirubin (Gallenfarbstoff, Abbauprodukt des Hämoglobins z.B. in der Leber) ist das blaue Spektrum zwischen 425 nm und 460 nm, das von Spezialstrahlern erzeugt werden kann. Neugeborene leiden gelegentlich unter einer Störung des Bilirubinspiegels, insbesondere an Ikterus (Gelbsucht), die mit dieser Spezialstrahlung erfolgreich behandelt werden kann.

Farblichttherapie: Psychologische Wirkungen durch farbiges Licht sprechen das Gefühlsleben der Menschen an, aber auch physiologische Fakten. Die Berücksichtigung dieser Aspekte ist neben der melanopischen Wirkung des Lichts ebenfalls Bestandteil des „Human Centric Lighting“ (siehe Abschnitt 3.3.1). So dringt z.B. sichtbare Strahlung tiefer in den Körper ein als UV-Strahlung und zielt daher eher auf das Gefäßsystem in der Haut. Zwar sind viele dieser menschlichen Wahrnehmungen bislang noch unerforscht, positive Erfahrungen liegen jedoch im Bereich der Seniorenbehandlung vor.

Photodynamische Therapie: Wie bei der PUVA-Therapie ist auch hier ein Photosensibilisator als Energieüberträger die wichtige Komponente. Er absorbiert im roten Bereich der sichtbaren Strahlung. Therapieerfolge sind bei der Behandlung des Blasenkarzinoms erzielt worden. Ebenso scheint Hautkrebs auf diese Weise therapierbar zu sein.

Infrarot-Behandlung: Mit der Wärmestrahlung, die sich unmittelbar an die sichtbare Strahlung anschließt (dem IR-A) lassen sich viele körperliche Beschwerden lindern oder beseitigen, denn diese Strahlungsart dringt am tiefsten in den Körper ein. In der IR-Sauna wird dieses Erkenntnis genutzt.

Hyperthermie: Bei der Hyperthermie nach dem Ardenne-Verfahren wird die Kerntemperatur des Körpers erhöht, ohne die Hautoberfläche zu temperieren. Sie wird durch gefilterte IR-A-Strahlung von Quarzrohrhellstrahlern ausgelöst. Hierdurch sind Behandlungserfolge bei der Krebstherapie möglich. Die Chemotherapie kann vielfach unterstützt oder gar ganz ersetzt werden.

Fazit: Ziel beim Einsatz von künstlicher Strahlung in der Medizin sind einerseits die Vermeidung negativer Wirkungen und andererseits das Finden neuer Anwendungen. Mögliche Risiken müssen erkannt und erforscht und somit minimiert bzw. besser noch vermieden werden. Der Vorteil der dem natürlichen Tageslicht nachgebildeten künstlichen optischen Strahlung ist die stetige Verfügbarkeit und die Möglichkeit, das Strahlungsspektrum im Hinblick auf größte Wirksamkeit und Dosierung zu optimieren. Grundsätzlich erfordert jede Art der Nutzung von Strahlung zur Therapie die Fachkenntnis des Arztes.

Bereiche der optischen Strahlung		Wellenlänge	Wirkung auf den Menschen
Ultraviolette Strahlung (UV)	UV-C, im Tageslicht nicht enthalten	100 nm bis 280 nm	Haut: Verdickung der Hornschicht, Lichtschwielen und Hautverbrennungen (Elastose), Hautentzündungen (Erythem), Hautkrebs (Melanom); Auge: Hornhautentzündungen (Konjunktivitis), Hornhautverbrennungen (Photokeratitis); Keimtötung (z. B. für die Raumluftsterilisation)
	UV-B	280 nm bis 315 nm	Nahes UV-B fördert die Vitamin-D-Bildung; Haut: Behandlung der Schuppenflechte (Psoriasis) und der Neurodermitis (Ekzem), Hautrötung (Erythem), Melanom (schwarzer Hautkrebs); Auge: Bindehautentzündung (Konjunktivitis), Katarakt (Linsentrübung, grauer Star)
	UV-A	315 nm bis 400 nm	Diverse phototherapeutische Wirkungen, siehe nachfolgender Abschnitt; Haut: oberhalb der Schwellenbestrahlungsstärke tritt Pigmentierung (Bräunung) ein, Altersflecken; Auge: Schädigung der Linse (Katarakt, Linsentrübung), Netzhautentzündung (Retinitis)
Sichtbare Strahlung		380 nm bis 780 nm	Visuelle Wahrnehmung; biologische, circadiane Wirkungen; Behandlung der Hyperbilirubinämie (Neugeborenenengelbsucht, Ikterus); Vermeidung der Winterdepression (SAD) und des Jetlag-Syndroms
Infrarote Strahlung (IR)	IR-A	780 nm bis 1.400 nm	Positive Wärmewirkung; Gefäßerweiterungen, Netzhautverbrennungen, Linsenschädigungen
	IR-B	1.400 nm bis 3.000 nm	Haut: Verbrennung; Auge: Netzhautverbrennungen, Linsenschädigungen
	IR-C	3.000 nm bis 1 mm	
Laser	UV	180 nm bis 400 nm	Photochemische und thermische Schäden des Auges, Erythem der Haut
	sichtbar	400 nm bis 700 nm	Netzhaut- und photochemische Schäden des Auges, thermische Schäden der Haut
	IR-A, IR-B, IR-C	700 nm bis 1 mm	Thermische Schäden von Auge und Haut

Tabelle 3.19: Bereiche der optischen und der Laser-Strahlung und deren Wirkungen