



Abbildung 1: Die COB-Technologie ermöglicht heute LEDs mit hoher Farbwiedergabe, relevantem NIR-Anteil und sehr geringem HEVL. Sie bilden das natürliche, thermische Spektrum klassischer Glühlampen präzise nach.

FALSCHES VERBOT?

DAS UNTERSCHÄTZTE POTENZIAL DER »GLÜHLAMPEN-LED«

Dr. med. Alexander Wunsch ist Arzt, Lichttherapeut, unabhängiger Forscher sowie wissenschaftlicher Berater und zählt zu den deutlichen Kritikern des Verbots der Glühlampe. Sein Ansatz stellt dem gesundheitlichen Nutzen über die technischen oder wirtschaftlichen Erwägungen. Er präsentiert 12+1 medizinisch-physiologische Gründe für den gesundheitsfördernden Einsatz von Glühlampen-ähnlichem Licht, das mithilfe spezialisierter COB-LEDs erzeugt wird und hier der Einfachheit halber als »Glühlampen-LED« bezeichnet wird.

In der Lichtindustrie war es lange Zeit üblich, mit hohen korrelierten Farbtemperaturen (CCT) zu arbeiten, um eine Sonnenähnlichkeit postulieren zu können. Doch Sonnenlicht in all seiner Komplexität – Intensität, zeitlicher Verlauf, Spektrum, Modulation, Farbwiedergabe – vollständig zu reproduzieren, ist selbst mit modernster Technologie unmöglich. Es müssen zwangsläufig Prioritäten gesetzt werden, welche Parameter man nachbilden möchte.

In der Ära der Leuchtstofflampen ließen sich weder eine hohe Farbwiedergabe noch große Lichtintensitäten kosteneffizient realisieren. Dadurch rückte die CCT als bevorzugter Marketingparameter für angeblich »sonnenähnliche« Lichtqualität in den Vordergrund – vor allem deshalb, weil nicht-thermische Lichtquellen kurze Wellenlängen vergleichsweise leicht und mit hoher Effizienz erzeugen können. Es war daher günstiger und technisch einfacher, Leuchtstofflampen mit Farbtemperaturen deutlich oberhalb von 3.000 K herzustellen, in Extremfällen sogar bis zu 16.000 K.

Die reale Farbtemperatur des Sonnenlichts zur Mittagszeit beträgt etwa 5.700 K, ein physikalischer Temperaturwert. Sie avancierte zum vermeintlichen Goldstandard für eine »natürliche« künstliche Lichtumgebung – allerdings nur unter der Voraussetzung, dass man die korrelierte Farbtemperatur (CCT) unkritisch mit der tatsächlichen Schwarzkörpertemperatur (CT) gleichsetzt.

Als LEDs die Leuchtstofflampen in nahezu allen Anwendungen abzulösen begannen, traten die frühen LED-Generationen mit einem kaltweißen, bläulichen Licht in Erscheinung, das für Augen, die an den warmen Schein der Glühlampe gewöhnt waren, ausgesprochen hart wirkte. Selbst viele Leuchtstofflampen erschienen im direkten Vergleich angenehmer. Verstärkt wurde dieser Eindruck dadurch, dass die etablierte westliche Lichtindustrie an überholten Annahmen festhielt: Flimmerfreiheit sei entbehrlich, ein Farbwiedergabeindex (CRI) von 80 völlig ausreichend, und die CCT lasse sich bedenkenlos mit der tatsächlichen Schwarzkörpertemperatur (CT) gleichsetzen.

In Teilen Asiens hingegen galt dies nicht. Während einige Unternehmen weiterhin den etablierten westlichen Paradigmen folgten, beschritten andere konsequent neue Wege: Sie beseitigten Flicker selbst in preisgünstigen Retrofit-Lampen, verbesserten die Farbwiedergabe erheblich und entwickelten Spektralverläufe, die der Schwarzkörperkurve so nahe kommen, wie es mit nicht-thermischen Lichtquellen technisch möglich ist.

Einige Visionäre gingen noch weiter und entwickelten die LED zum »Photonensynthesizer« weiter. Moderne LED-Technologien können heute Spektralbereiche von etwa 200 nm bis weit in den Nahinfrarotbereich (>1.000 nm) abdecken. Die COB-(Chip-on-Board-)Technik ermöglicht es, mehrere LED-Typen auf einem einzigen Substrat zu integrieren und so spektrale Lücken gezielt zu schließen. In Kombination mit neu entwickelten Phosphoren lässt sich das resultierende Spektrum bemerkenswert präzise formen – vom mittäglichen Himmelslicht über warme Abendstimmungen bis hin zur nahezu perfekten Annäherung an das Glühlampenspektrum, das weiterhin die einzige elektrische Lichtquelle mit einem vollständig natürlichen, kontinuierlichen thermischen Spektrum darstellt.

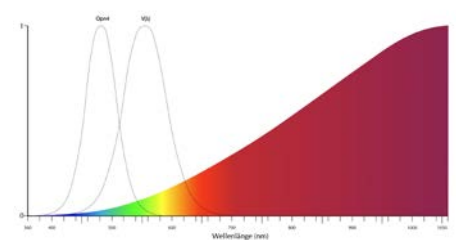
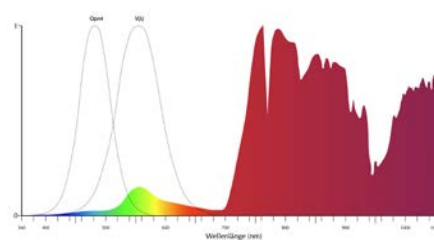
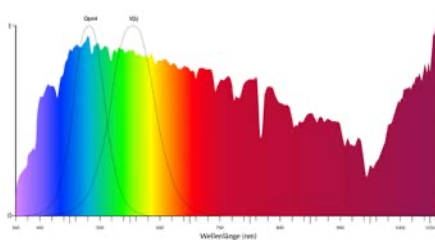
Das Glühlampenlicht – einst als »energieverschwendend« vom Markt verdrängt – ist in Wirklichkeit einzigartig: arm an energiereichem sichtbarem Licht (high energy visible light, HEVL), reich an Nahinfrarot (NIR; >700 nm) und nach wie vor unverzichtbar in der Thermo-therapie sowie in der Säuglingspflege. Als thermische Lichtquelle steht es zwischen Sonnenlicht und Feuer und folgt – wie diese – der Schwarzkörperkurve, einer Strahlungscharakteristik, an die sich der menschliche Organismus offenbar optimal angepasst hat. Entsprechend beträgt der Farbwiedergabeindex (CRI) von Feuer, Kerzenlicht, unmodifizierten Glühlampen und Sonnenlicht durchgängig 100 – unabhängig von der jeweiligen Farbtemperatur.

1. EVOLUTIONSBIOLOGISCHES REFERENZSPEKTRUM

Der Mensch ist eng mit anderen Primaten verwandt, insbesondere mit den Altweltaffen. Viele physiologische Merkmale – darunter der anatomische Aufbau, die spektrale Empfindlichkeit des Auges sowie die hormonellen Regelkreise – sind praktisch identisch. Die photopische Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ mit ihrem Maximum bei etwa 555 nm entspricht nahezu exakt der maximalen Transmission von chlorophyllhaltigen Blättern. Dies deutet darauf hin, dass sich unser visuelles System nicht primär an ungefiltertes Sonnenlicht angepasst hat, sondern an das durch Blätterkronen gefilterte Licht.

Drei archetypische Lichtumgebungen prägten die Evolution der Primaten:

- offene Landschaft mit direktem Sonnenlicht und hoher spektraler Leistungsdichte um 480 nm: Diese Wellenlängen aktivieren die melanopsinbasierten Signalwege besonders stark und fördern sympathische Reaktionen wie den Anstieg des Cortisolspiegels, die Unterdrückung der Melatoninausschüttung und eine erhöhte Wachheit (Abbildung 1a).
- Blätterdach mit grün dominiertem Spektrum und stark reduziertem Blau-Violett und Rot: Der Anteil an Nahinfrarot (NIR) ist im Verhältnis zur sichtbaren Strahlung um ein Mehrfaches höher als im offenen Sonnenlicht (Abbildung 1b). Dies fördert stressfreie, regenerative Zustände.
- Nacht – mondhell oder dunkel – mit sehr geringen Bestrahlungsstärken: praktisch HEVL-frei, ohne melanopsinrelevante Blauanteile. Das unterstützt regenerative Prozesse und Schlaf optimal. Beim Menschen veränderte sich die nächtliche Umwelt in den vergangenen rund 1 Million Jahren [1]. Denn durch den Gebrauch von Feuer kam eine nächtliche Lichtquelle mit geringer Helligkeit, aber hoher NIR-Emission hinzu (Abbildung 1c).



1a

1b

1c

Abbildungen 1a-c: Archetypische Lichtumgebungen für Primaten (einschließlich *Homo sapiens sapiens*). Links: offene Landschaft mit direktem Sonnenlicht, hohem Anteil kurzwelliger Strahlung und ausgeprägter Aktivierung sympathischer Signalwege. Mitte: Lichtspektrum unter dem Blätterdach, mit reduziertem Blau- und Rotanteil, jedoch hohem Nahinfrarot, das regenerative Zustände begünstigt. Rechts: Nacht- bzw. Feuerlicht mit geringer Beleuchtungsstärke, minimalem Blauanteil und starkem Nahinfrarot, das regenerative und erholfördernde Prozesse unterstützt. Spektraler Messbereich: 380-1050 nm, VIS + NIR, alle Spektren normalisiert. $V(\lambda)$ -Kurve mit Maximum bei 555 nm, Melanopsin-(Opn4-)-Kurve mit Maximum bei 480 nm.

Aufgrund der nahezu haarlosen Haut besteht beim Menschen eine erhöhte phototoxische Anfälligkeit. Daraus ergab sich die Notwendigkeit spezifischer Schutzmechanismen für Aufenthalte in offenen Landschaften [2]. Der Übergang von Nacht- oder Blätterdachbedingungen in eine offene Umgebung aktiviert lichtgesteuerte endokrine Schutzprogramme: Adrenalin erzeugt eine Vasokonstriktion und reduziert die erythemale Hautdurchblutung; Cortisol wirkt entzündungsdämpfend; Katecholamine stabilisieren die kardiovaskuläre Regulation; Mineralokortikoide sichern den Flüssigkeitshaushalt. Diese Reaktionen greifen sowohl systemisch als auch lokal – »from brain to skin« [3–5].

Vor diesem Hintergrund sollte die moderne künstliche Beleuchtung neu bewertet werden. Im Prinzip stehen drei spektrale Strategien zur Verfügung:

- Steppe/Wüste: hoher Blauanteil, starke sympathische Aktivierung für erhöhte Aufmerksamkeit und motorische Aktivität
- Oase unter dem Blätterdach: wenig Blau, tagsüber hoher NIR-Anteil, ausgeglichener vegetativer Tonus
- vortechnische Nacht: thermisches Schwarzkörperspektrum des Feuers – NIR-reich, HEVL-frei und mit minimalem Blau. Das sorgt für optimale Regeneration und Schlafbereitschaft.

Aus chronobiologischer Sicht entsprechen die beiden letzteren Profile wesentlich besser den heutigen Indoor-Aktivitäten. Sie vermeiden maladaptive Stressreaktionen und unterstützen langfristig die physiologische Stabilität.

2. GERINGER HEVL-ANTEIL

Hochenergetisches sichtbares Licht (HEVL, etwa 400–470 nm) besitzt die höchste Photonenenergie des sichtbaren Spektrums (ca. 3,1 eV bei 400 nm) und steht in engem Zusammenhang mit photooxidativem Stress in Auge und Haut.

Ophthalmologische Aspekte

In der Netzhaut wird HEVL insbesondere von Lipofuszin und anderen Chromophoren im retinalen Pigmentepithel (RPE) sowie in den Photorezeptoren absorbiert. Die dadurch ausgelöste Blaulichtbelastung – unzureichend durch die klassische Blue-Light-Hazard-(BLH-) Funktion beschrieben – wirkt kumulativ und beschleunigt die Entstehung altersabhängiger Makuladegeneration (AMD) und grauen Stars (Katarakt). Kinderaugen sowie Augen mit Linsenimplantaten filtern weniger kurzwellige Strahlung, sodass ihr Netzhaut-Schädigungsrisiko deutlich höher liegt, als es die Standard-BLH-Kurve vermuten lässt.

Dermatologische Aspekte

HEVL dringt tiefer in die Haut ein als UV-Licht und erreicht die obere Dermis (Lederhaut), wo es die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) fördert. Dadurch werden Kollagenabbau, Hyperpigmentierung und Photoaging beschleunigt. Der Schaden entsteht primär über oxidative Mechanismen und nicht über direkte DNA-Schädigung – er ist daher kumulativ und klinisch oft über Jahrzehnte schwer zu erfassen.

Überexposition in Innenräumen

Im Sonnenlicht wird HEVL durch starke Rot- und NIR-Anteile teilweise ausgeglichen, die oxidativen Stress modulieren [6–10]. Standard-LEDs hingegen, insbesondere solche mit CCT >4.000 K, zeigen ausgeprägte HEVL-Peaks um 450 nm ohne begleitendes NIR. Dadurch entsteht für Menschen, die viel Zeit in Innenräumen verbringen, eine relevante kumulative Belastung. Die Reduktion des 400–470 nm-Anteils mindert den okulären und dermalen oxidativen Stress [11] – besonders bei:

- Kindern (klare Augenmedien, große Pupillen)
- Patienten nach Kataraktoperation (höhere Kurzwellendurchlässigkeit der Implantatlinsen)
- älteren Personen mit erhöhtem AMD-Risiko
- lichtsensitiven Hauterkrankungen

Vorteil glühlampenähnlicher LEDs

Glühlampen-LEDs erzeugen ein kontinuierliches Spektrum mit minimalem HEVL-Anteil und ohne den typischen 450-nm-Peak (Abbildung 4). Es ähnelt stark dem evolutionär geprägten Spektrum des Feuers und reduziert die kumulative photooxidative Belastung, ohne die visuelle Leistungsfähigkeit einzuschränken.

Balance statt Eliminierung

Im Gegensatz zu HEVL ist Blaulicht im Bereich um 480 nm essenziell für die circadiane Synchronisation. Kurzwellige Anteile sollten daher nicht generell aus der Innenraumbelichtung verbannt werden. Entscheidend ist eine ausgewogene und zeitlich passende Anwendung: ausreichend, um nicht-visuelle Funktionen zu unterstützen, ohne die melanopische Signalachse chronisch zu überstimulieren oder oxidative Belastungen zu verstärken. Für eine nachhaltige circadiane Stabilisierung können tageslichtähnliche Spektren mit höherer CCT (>4.000 K), betontem 480-nm-Anteil und reduziertem HEVL intermittierend (also nur kurzzeitig) eingesetzt werden – idealerweise begleitet von ausreichenden NIR-Komponenten.

3. WIEDERHERSTELLUNG VON NAHINFRAROT

In Sonnenlicht und Feuer macht Nahinfrarot (NIR; >700 nm) mindestens 40 % der gesamten Strahlungsenergie aus [9]. Obwohl unsichtbar, dringt es tief in Gewebe ein [12], interagiert mit Wasser, Blutfarbstoffen und Mitochondrien (»Zellkraftwerke«) und spielt eine zentrale Rolle in der zellulären Physiologie.

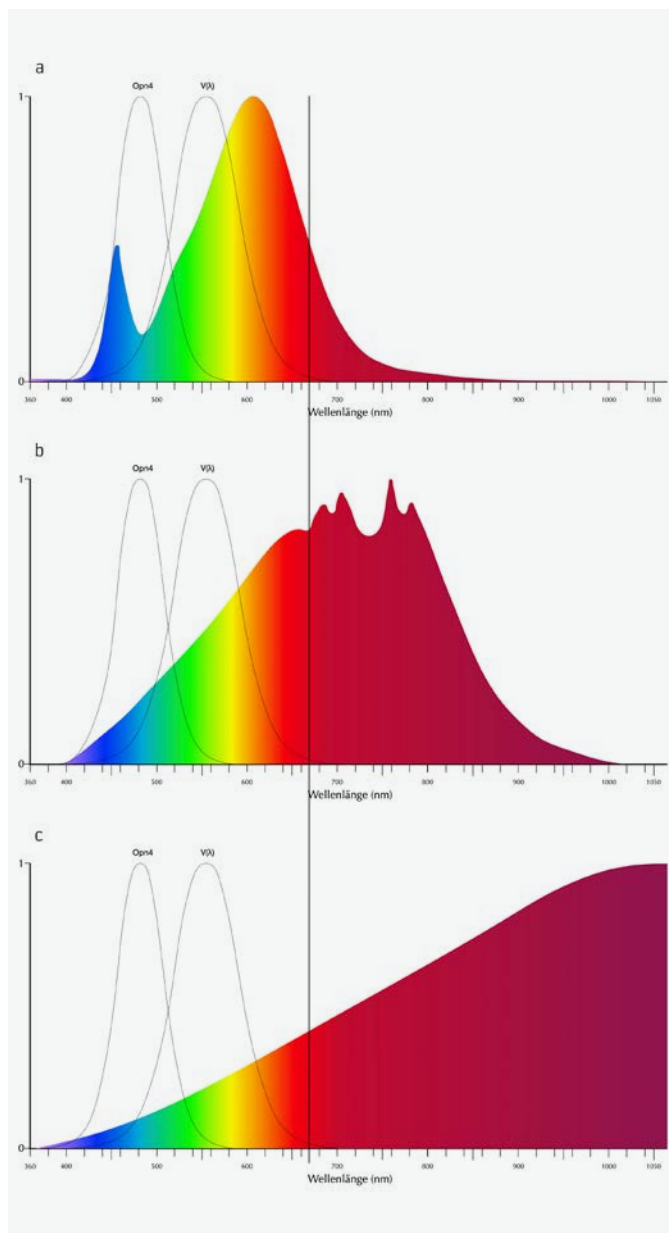
Physiologische Relevanz

NIR wird in den Mitochondrien von optisch aktiven Molekülen, insbesondere von Cytochrom-c-Oxidase, absorbiert. Dies steigert die zelluläre Energieproduktion (ATP), verbessert die Mikrozirkulation und stärkt antioxidative Schutzmechanismen [6]. Auf diese Weise fördert Nahinfrarot die Geweberegeneration [13], moduliert Entzündungsprozesse und kann in der Netzhaut oxidativen Stress durch energiereiches sichtbares Licht (HEVL) abmildern [14]. Bereits niedrige Intensitäten (8 mW/cm²) von tiefrotem/NIR-Licht (~670 nm) verbessern nachweislich die Netzhautsensitivität und die mitochondriale Effizienz bei alternden Augen [15].

Moderne künstliche Lichtquellen, insbesondere phosphorkonvertierte LEDs, brechen ihr Spektrum meist oberhalb von ~630–700 nm ab.

Grund dafür ist die auf $v(\lambda)$ -Effizienz getrimmte Lichttechnik – mit dem Ergebnis eines chronischen NIR-Mangels für Menschen, die sich überwiegend in Innenräumen aufhalten und zudem hinter »klima-freundlichen« Fenstern sitzen, die aus energetischen Gründen NIR stark herausfiltern.

Glühlampen-LEDs können dagegen relevante Mengen an NIR bereitstellen, oft mit einem Spektralanteil bis etwa 1.000 nm – ausreichend für lichtbiologisch wirksame Effekte, jedoch ohne die starke Wärmebelastung durch längerwelliges Infrarot (Abbildung 2). Der NIR-Anteil lässt sich an den jeweiligen Einsatzzweck anpassen, was selbstverständlich auf Kosten der nominellen Energieeffizienz geht.



Abbildungen 2a-c: Spektralvergleich zwischen Standard-LED (a), NIR-angereicherter Glühlampen-LED (b) und klassischer Glühlampe (c). Die Spektralkurven der Glühlampe und der Glühlampen-LED ähneln sich im sichtbaren Bereich in Bezug auf Kontinuität und Schwarzkörpereigenschaften nahezu vollständig - im deutlichen Gegensatz zum oben dargestellten Standard-LED-Spektrum. Der NIR-Anteil der Glühlampen-LED ist so optimiert, dass er eine möglichst geringe thermische Abstrahlung erzeugt.

Biologische Implikationen

NIR kann Gewebe auf HEVL-Risiken »vorbereiten« (z. B. 630–850 nm) und damit die Widerstandskraft von Haut und Auge erhöhen.

Die Integration von NIR in die tägliche Innenraumbelichtung führt eine natürliche Spektralkomponente wieder ein, die in modernen Lebensumgebungen weitgehend verloren gegangen ist.

4. VERBESSERTE PHOTOBIOLOGISCHE SICHERHEIT

Konventionelle weiße LEDs weisen einen ausgeprägten Anteil an energiereichem sichtbarem Licht (HEVL; ~400–470 nm) auf, der in Augen- und Hautgewebe die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) fördert. In okulären Strukturen trägt dies zu kumulativem oxidativem Stress im retinalen Pigmentepithel (RPE), in den Photorezeptoren und in der Augenlinse bei. Die negativen Auswirkungen herkömmlicher LEDs auf die Augengesundheit wurden von Beginn an unterschätzt; wachsende Evidenz [16–18] wurde durch Normungsgremien und Regulierungsbehörden systematisch relativiert oder ignoriert [19–20].

Glühlampen-LEDs hingegen enthalten nur minimale HEVL-Anteile und sind reich an Nahinfrarot, wodurch ein deutlich ausgewogeneres Spektrum entsteht. NIR ist bei üblichen Bestrahlungsstärken nicht phototoxisch und aktiviert die mitochondriale Cytochrom-c-Oxidase. Dies verbessert den zellulären Stoffwechsel, stärkt antioxidative Schutzmechanismen und unterstützt Reparaturprozesse.

Durch die Kombination aus geringem HEVL-Anteil und reichlich NIR reduzieren Glühlampen-LEDs phototoxischen Stress und fördern gleichzeitig die Geweberegeneration. Damit rückt künstliche Beleuchtung näher an eine photobiologische Sicherheitsarchitektur heran, die mit der evolutionären Anpassung des menschlichen Organismus übereinstimmt.

5. HORMONELLE NEUTRALITÄT

Licht wirkt zugleich als visueller und als endokriner (non-visueller) Reiz. Der Anteil kurzwelliger Strahlung beeinflusst das hormonelle Gleichgewicht maßgeblich über die intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGCs), deren Absorptionsmaximum nahe 480 nm liegt. Diese Zellen projizieren in den suprachiasmatischen Nucleus (SCN), steuern die Melatoninproduktion der Zirbeldrüse und lösen weiterreichende neuroendokrine Reaktionen aus [3, 21, 22].

Melanopische Stimulation unterdrückt nicht nur Melatonin, sondern aktiviert auch die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HPA-Achse), was zu erhöhten Cortisol-, Adrenalin- und Noradrenalinspiegeln führt. Blauangereichertes Licht zur falschen Zeit oder in der falschen Situation kann so zu einer chronischen Sympathikusaktivierung beitragen und langfristig Herz-Kreislauf-Belastungen, Stoffwechselstörungen und Immunsuppression begünstigen [4, 23, 24].

Bereits in den 1970er-Jahren zeigte Fritz Hollwich, dass durch die künstlichen Spektren von Leuchtstofflampen veränderte Hormonausscheidungsmuster – insbesondere erhöhte Katecholamin-Abbauprodukte – auftreten, ein Hinweis auf gesteigerte sympathische Aktivität [25–27]. Diese Befunde wurden später durch die Entdeckung und Zuordnung des ipRGC-SCN-Systems bestätigt. Bis zur vollständigen ►

Beschreibung der neuronalen Signalwege im Jahr 2001 [28] bestritt die Lichtindustrie solche vegetativen Effekte; danach wurden sie überwiegend auf »Melatonin-suppression« verengt, wodurch der Einfluss auf die HPA-Achse und die Stresshormonregulation unterschätzt wurde.

Hormonneutral gestaltetes Licht erfüllt visuelle Anforderungen, ohne melanopische und nicht-visuelle Reize über physiologische Grenzen hinaus zu verstärken. Glühlampenähnliche Spektren, einschließlich moderner Glühlampen-LEDs, zeichnen sich durch niedrige melanopische/photopische Verhältnisse und minimalen HEVL-Anteil aus. Dadurch werden Melatonin-suppression und Aktivierung der Stressachsen reduziert und die hormonelle Individualität unterstützt.

Dies ist besonders relevant für

- Kinder und Jugendliche mit empfindlichen, sich entwickelnden endokrinen Systemen
- Herz-Kreislauf-Patienten, bei denen zusätzliche Sympathikusreize kontraindiziert sind
- Menschen mit Schlaf-, Stimmungs-, Depressions- oder Angststörungen [29, 30]

6. INDIVIDUELLE VERTRÄGLICHKEIT

Die endokrinen Wirkungen von Licht variieren stark in Abhängigkeit von Alter, Geschlecht, Genetik, Chronotyp, Augenstatus, Gesundheitslage und Medikamenteneinnahme. Dadurch ist »Einheitsbeleuchtung« grundsätzlich suboptimal – und für bestimmte Personengruppen potenziell schädlich.

Relevante Einflussfaktoren

- Chronotyp: Abendtypen reagieren empfindlicher auf kurzweilige Abendeinwirkung, die ihre circadiane Phase verzögert.
- Alter: Kinder besitzen wasserklare Linsen, haben größere Pupillen und absorbieren dadurch mehr Blau/HEVL – mit entsprechend höherem Schädigungspotential von blauverstärktem Licht [11].
- Linsenstatus: Nach Kataraktoperationen lassen klare bzw. blau-durchlässige Intraokularlinsen mehr kurzweilige Strahlung auf die Netzhaut; das AMD-Risiko steigt [31, 32].
- Geschlechtshormone: Sie werden lichtabhängig beeinflusst, teils stark moduliert durch Helligkeit und Blauanteil [33, 34].
- Medikamente: Betablocker, Kortikosteroide, Antidepressiva und andere Präparate verändern hormonelle Lichtantworten, indem sie etwa die Stressachse modulieren oder die Melatoninproduktion beeinflussen.

Risiken blauangereicherten Lichts

Morgentliche Exposition kann bei gesunden Erwachsenen stimmungsfördernd wirken, bei empfindlichen Personen jedoch Sympathikustonus, Blutdruck oder Einschlaf latenz ungünstig verändern. Die Wirkung hängt sowohl vom melanopischen/photopischen Verhältnis als auch vom individuellen Ausgangszustand ab.

Klinische Implikationen

Ein Spektrum, das für eine Person förderlich ist, kann für eine andere belastend wirken. Konventionelle Allgemeinbeleuchtung berücksichtigt

diese interindividuelle Variabilität kaum, sodass zahlreiche Nutzer zwangsläufig Spektren ausgesetzt sind, die ihre endokrin-vegetativen Rhythmen eher stören als unterstützen.

Glühlampen-LEDs, deren Spektren nur geringe Auswirkungen auf die hormonelle und vegetativ-endokrine Integrität haben, stellen daher eine besonders geeignete Option dar – etwa in Kindergärten, Schulen, Krankenhäusern, Pflegeeinrichtungen, Demenzbereichen oder Arbeitsumgebungen mit geringer motorischer Aktivität.

7. ALTERSÜBERGREIFENDE VERTRÄGLICHKEIT

Photobiologische Sicherheitsstandards orientieren sich überwiegend an gesunden (männlichen) Erwachsenen und berücksichtigen weder die spektralen Besonderheiten noch die anatomischen Unterschiede von Kindern, älteren Menschen oder postoperierten Kataraktpatienten [35].

Die kindliche Augenlinse ist für kurzweilige Strahlung – einschließlich violettem Licht und UVA – besonders durchlässig. Diese hohe Transmission findet sich im Erwachsenenalter auch bei Personen mit klaren, ungefilterten Intraokularlinsen wieder. Für beide Gruppen bildet die aphake (linsenlose) Blue-Light-Hazard-Kurve (BLH) das reale Risiko für die Netzhaut wesentlich besser ab als die Standardkurve, da sie die erhöhte Durchlässigkeit für HEVL- und UVA-Strahlung berücksichtigt.

Ab etwa 500 nm nähern sich die Transmissionskurven älterer, junger und aphaker Augen einander an [36]. Die oft wiederholte Empfehlung, die Beleuchtungsstärke für ältere Menschen »auf das Drei- bis Vierfache« zu erhöhen, bezieht sich fast ausschließlich auf kurzweilige Bereiche. Oberhalb von 500 nm wäre für denselben visuellen Nutzen lediglich eine höchstens zweifache Erhöhung erforderlich.

Daraus lässt sich folgern:

- Warme, HEVL-reduzierte Spektren können den Helligkeitsbedarf älterer Menschen mit weniger als der Hälfte des sonst angenommenen Energieaufwands decken.
- HEVL-reduziertes Licht bietet besonders für Kinder und für Menschen nach einer Kataraktoperation einen deutlich besseren Schutz vor phototoxischen Belastungen der Netzhaut.
- Ein warmweißes, HEVL-armes Spektrum ist somit über alle Altersgruppen hinweg am sichersten und zugleich energieeffizient – es bietet gute Sehbedingungen bei minimalem vermeidbarem Risiko.

8. SCHÄRFERES SEHEN

Die Sehschärfe wird durch die optische Abbildungsqualität und durch chromatische Aberration begrenzt – also durch die Tatsache, dass unterschiedliche Wellenlängen im Auge auf unterschiedlichen Schärfestufen fokussiert werden. Diese longitudinale chromatische Aberration (LCA) beträgt zwischen 400 nm und 700 nm insgesamt etwa 2 Dioptrien: Kurzweilige Anteile (Violett/Blau) werden deutlich vor der Netzhaut fokussiert (Abbildung 3a).

Ungefähre LCA bezogen auf 555 nm:

- 400–450 nm: +1,5 bis +1,0 dpt → deutlich erhöhte Unschärfe, Farbsäume, Blendung, Kontrastverlust
- 450–500 nm: +1,0 bis +0,5 dpt → merkliche Unschärfe
- 500–600 nm: minimale LCA → schärfste Abbildung
- 600–700 nm: –0,3 bis –0,5 dpt → leicht verringerte Schärfe

Die durch kurze Wellenlängen verursachte Unschärfe erhöht die Lichtstreuung auf der Netzhaut und reduziert den wahrgenommenen Kontrast – besonders bei blauintensiven Umgebungen wie kalten LEDs, Schneeflächen oder spiegelnden Wasseroberflächen. In Präzisionssituationen wie Luftfahrt, Segeln, Skifahren oder Schießsport verbessern gelbe/amberfarbene Filter unterhalb von 500 nm spürbar die Kontrast- und Konturerkennung (Abbildung 3b).

Warme, HEVL-arme Lichtquellen wie Glühlampen-LEDs reduzieren diese chromatische Unschärfe bereits spektralbedingt und steigern so Sehkomfort und Sehschärfe ganz ohne zusätzliche Filter.

9. HERVORRAGENDE FARBWIEDERGABE

Die Farbwiedergabe beschreibt, wie naturgetreu eine Lichtquelle Farben im Vergleich zu einem natürlichen Referenzlicht zeigt. Der Mensch entwickelte sich unter kontinuierlichen thermischen Spektren – Sonnenlicht und Feuer –, die alle auf der planckschen Kurve liegen und nahezu perfekte CRI-Werte von 100 erzielen. Diese Spektren stimulieren alle drei Zapfentypen (S, M, L) in ausgewogenen Verhältnissen, was zu natürlicher Farbwahrnehmung und minimalen metamerischen Fehlinterpretationen führt.

Der allgemeine Farbwiedergabeindex CRI (R_a) kann schmalbandige oder spektral »gezackte« Lichtquellen wie Leuchtstofflampen oder Standard-LEDs nur unzureichend abbilden. Alternativen wie IES TM-30 (Rf/

Rg) oder die neueren CIE-Methoden erfassen Farbwiedergabe differenzierter, bevorzugen jedoch ebenfalls glatte, kontinuierliche Spektren.

Nicht-thermische Lichtquellen können so abgestimmt werden, dass sie hohe CRI-Werte für standardisierte Testfarben erreichen, im Alltag aber dennoch schlecht performen – vor allem bei gesättigten Rottönen (R9) oder tiefen Blautönen, die in Medizin, Gastronomie und Kunst entscheidend sind. Zudem kann die Optimierung biologisch wichtiger Parameter – etwa eine Reduktion von HEVL oder eine Verstärkung des Rot- und NIR-Anteils – den nominalen CRI verringern, obwohl Farbwiedergaben über 90 oder sogar 95 weiterhin möglich bleiben.

Entlang der Schwarzkörperkurve erzeugen Glühlampen-LEDs ein vollständiges Spektrum bis in tiefe Rottöne (>600 nm), ohne künstliche Peaks. Dadurch entstehen natürliche Hauttöne, konsistente Objektfarben und eine geringere kognitive Belastung durch »intrinsische farbliche Korrektur«, was den visuellen Komfort bei längerer Tätigkeit deutlich verbessert.

10. FLIMMERFREIE LICHTABGABE

Glühlampen zeigen am Wechselstromnetz nur eine geringe Modulation von etwa 3–5 % bei 100/120 Hz, verursacht durch das thermische Trägheitsverhalten des Glühfadens. LEDs hingegen können – abhängig vom Treiberdesign – alles erzeugen: von ausgeprägtem, teils stroboskopartigem Flicker über mehrere Frequenzen bis hin zu nahezu vollständiger Flimmerfreiheit.

Lichtflimmern, ob sichtbar oder unterhalb der Wahrnehmungsschwelle, kann Kopfschmerzen, Augenbelastung, reduzierte visuelle Leistungsfähigkeit sowie Migräne, photosensitive Epilepsie und Stimmungsschwankungen verstärken [37–40]. Selbst ohne bewusste

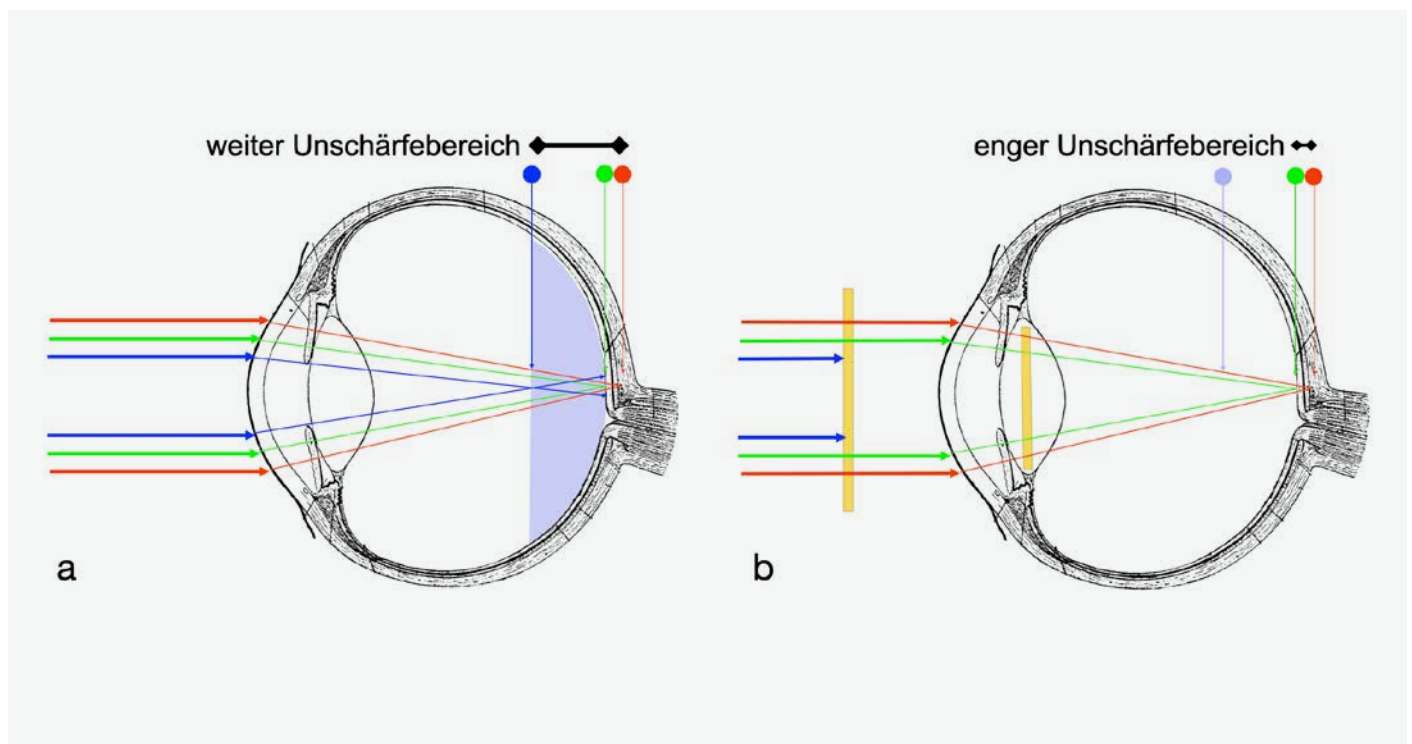


Abbildung 3: Longitudinale chromatische Aberration und die daraus resultierende Unschärfe bei blauhaltigen (a) und blaugefilterten (b) Bedingungen.

Wahrnehmung können kortikale Reaktionen ausgelöst und die Stabilität und Präzision der Augenbewegungen beeinträchtigt werden [39–41].

Da LEDs grundsätzlich mit Niederspannung betrieben werden, ist eine elektronische Ansteuerschaltung ohnehin erforderlich. Diese kann so ausgelegt werden, dass praktisch keine Helligkeitsmodulation/Flickeraktivität entsteht. Technisch ist das problemlos realisierbar und heute kein nennenswerter Kostenfaktor mehr. Auf diese Weise lässt sich einer der am meisten unterschätzten biologischen Stressoren vollständig ausschalten, anstatt über Grenzwerte für Frequenz und Modulationstiefe zu streiten.

11. PSYCHO-EMOTIONALE VORTEILE

Licht beeinflusst den emotionalen Zustand, die soziale Wahrnehmung und das Selbstbild. Warmweiße, kontinuierliche Spektren, wie sie Glühlampen-LEDs erzeugen, wirken einladend, schmeicheln der Haut und fördern Entspannung sowie eine positive kommunikative Interaktion.

Blauangereicherte Beleuchtung (~470–490 nm) erhöht die Aktivität der Amygdala, verstärkt Wachsamkeit und kann dadurch Angstreaktionen fördern [42, 43]. Ästhetisch betont blaureiches Licht oberflächliche Blutgefäße, lässt die Haut kälter und blasser erscheinen und reduziert warme Reflexionen. Warmtonige Spektren hingegen verbessern die subdermale Lichtstreuung, kaschieren Gefäße und erzeugen ein natürlicher wirkendes Hautbild.

Solche psycho-emotionalen und ästhetischen Effekte beeinflussen Stimmung, Kommunikation und Produktivität. Beleuchtung, die sowohl physiologische als auch psychologische Bedürfnisse berücksichtigt, sollte daher für moderne Innenräume verpflichtend sein.

Eine wichtige Publikation konnte einen Zusammenhang zwischen mangelhafter Lichtumgebung (»malillumination«) und einer erhöhten Prävalenz bestimmter psychischer Störungen zeigen [30]. Um diese Erkenntnisse in die Praxis zu übertragen, braucht es hormonell neutrale Lichtquellen – wie Glühlampen-LEDs, insbesondere mit niedrigen Farbtemperaturen –, die die melanopische Stimulation reduzieren und den neuroendokrinen Haushalt möglichst wenig beeinflussen.

12. WAHRE KOSTENEFFIZIENZ

Energieeffizienzkennzahlen berücksichtigen in der Regel nicht die gesundheitlichen Folgekosten einer chronischen Exposition gegenüber biologisch unausgewogenem Licht. Solche Beleuchtungsumgebungen können das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen (CVD), altersbedingte Makuladegeneration (AMD), bestimmte Krebsarten, metabolische Störungen sowie psychische Erkrankungen erhöhen [44–47]. Die daraus entstehenden Kosten übersteigen die geringen Stromersparnisse der effizientesten – physiologisch jedoch suboptimalen – Lichtquellen bei weitem.

Beispiel 1: AMD-Therapiekosten im Vergleich zum Energieverbrauch einer Lampe

Die Behandlung einer feuchten AMD kostet in Deutschland rund 30.000 € pro Jahr. Eine 100-W-Glühlampe, die rund um die Uhr

betrieben wird, verbraucht 876 kWh pro Jahr – das entspricht bei 0,30 €/kWh etwa 263 €. Für den Preis eines einzigen Jahres AMD-Behandlung könnten also rund 114 Glühlampen ein Jahr lang durchgehend betrieben werden – oder eine einzelne Lampe über mehr als ein Menschenleben.

Beispiel 2: Herz-Kreislauf-Behandlungskosten vs. nationale Einsparungen durch effiziente Leuchtmittel

Herz-Kreislauf-Erkrankungen verursachen in Deutschland jährliche Kosten von etwa 80 Mrd. €. Der Umstieg von einer Glühlampen-LED auf eine etwas effizientere, biologisch jedoch ungünstigere LED spart pro Leuchte vielleicht 5 € pro Jahr. Hochgerechnet auf 100 Millionen Leuchten ergibt das 0,5 Mrd. € pro Jahr – also weniger als 0,7 % der jährlichen Behandlungskosten. Schon ein geringfügiger Anstieg der Krankheitslast würde diese Einsparungen um ein Vielfaches zunichtemachen.

Fazit

Geringfügige Zugewinne in der Lichtausbeute rechtfertigen keine Spektren, die die Gesundheit beeinträchtigen. Glühlampen-LEDs – mit niedrigem HEVL-Anteil, hohem NIR-Anteil, exzellenter Farbwiedergabe und evolutionärer Kompatibilität – sind unter Einbezug der Gesundheitskosten langfristig die deutlich kosteneffizientere Beleuchtungslösung.

12+1. REGULATORISCHE PERSPEKTIVE

Nach europäischem wie auch internationalem Verständnis gilt jedes Instrument, Gerät oder sonstige Produkt als Medizinprodukt, wenn es vom Hersteller mit dem Zweck vorgesehen ist, beim Menschen zu Diagnose-, Präventions-, Überwachungs-, Behandlungs- oder Linderungszwecken eingesetzt zu werden. In der EU umfasst die Medical Device Regulation (MDR 2017/745) ausdrücklich auch Produkte, deren Hauptwirkung durch physikalische Mittel – etwa Licht – erzielt wird, sofern dieses Licht für einen gesundheitlich relevanten physiologischen Effekt bestimmt ist.

Diese Definition führt zu einer regulatorischen Grauzone für moderne, »biologisch aktive« Beleuchtungstechnologien. Wird eine Lichtquelle so gestaltet oder vermarktet, dass sie gezielt physiologische Parameter beeinflusst – etwa Melatoninsekretion, Wachheit oder zirkadiane Phasenlage –, müsste sie prinzipiell als Medizinprodukt eingestuft werden. Dies würde Anforderungen auslösen wie:

- klinische Nachweise zu Sicherheit und Wirksamkeit
- ein umfassendes Qualitätsmanagementsystem in der Produktion
- CE-Kennzeichnung gemäß MDR, ggf. mit höherer Risikoklasse als Klasse I
- kontinuierliche Marktüberwachung (Post-Market-Surveillance)

Das Paradox der »Human-Centric-Lighting«-Systeme

»Human Centric Lighting« bzw. dynamische Lichtsysteme sind ausdrücklich dafür vorgesehen, nicht-visuelle physiologische Funktionen zu modulieren – häufig beworben mit Aussagen zu besserer Stimmung, höherer Leistungsfähigkeit oder optimaler zirkadianer Abstimmung.

Streng juristisch betrachtet könnte eine solche Zweckbestimmung diese Systeme in die Kategorie der Medizinprodukte führen, besonders wenn therapeutische oder präventive Gesundheitsclaims gemacht werden. Die Durchsetzung ist jedoch uneinheitlich, und die meisten dieser Produkte gelangen derzeit ohne MDR-Konformitätsbewertung auf den Markt.

Warum die Glühlampen-LED eine Ausnahme darstellt

Die Glühlampen-LED liefert ein Spektrum, das klassischen Glühlampen sehr nahekommt. Ihre primäre Funktion ist die Bereitstellung optimaler Sehbedingungen bei weitgehender endokrin-vegetativer Neutralität, ohne eine beabsichtigte medizinische Wirkabsicht. Daher ist sie regulatorisch nicht als Medizinprodukt einzustufen. Ihre physiologische Verträglichkeit ergibt sich als Nebenprodukt ihrer neutralen spektralen Eigenschaften – nicht durch gezielte Stimulation photobiologischer Signalwege.

Aus regulatorischer Sicht ist dies bedeutsam:

- Kein zusätzlicher Konformitätsaufwand: Sie bleibt ein Standardbeleuchtungsprodukt unter der Niederspannungs- und EMV-Richtlinie (und ggf. Ökodesign), nicht unter MDR.
- Minimale physiologische Eingriffe: Durch das Vermeiden extremer spektraler Manipulationen sind hormonelle, retinale und vaskuläre Beeinflussungen gering.
- Kein Risiko der claim-basierten Reklassifizierung: Ohne therapeutische oder präventive Aussagen überschreitet das Produkt nicht die Schwelle zur medizinischen Zweckbestimmung.

Strategischer Vorteil

Für Planer und Betreiber – insbesondere in Krankenhäusern, Pflegeeinrichtungen, Schulen und Arbeitsplätzen – bietet die Glühlampen-LED eine klare regulatorische Position bei gleichzeitig biologisch vorteilhaftem, weil neutralem Spektrum. Sie umgeht die rechtlichen Unsicherheiten, die bei biologisch aktiven Beleuchtungssystemen zukünftige Bewertungen mit sich bringen könnten, und liefert dennoch die gesundheitsbezogenen Qualitäten, die in vielen Einrichtungen gefragt sind.

13. ZUSAMMENFASSUNG

Die COB-Technologie ermöglicht heute LEDs, die das natürliche, thermische Spektrum klassischer Glühlampen präzise nachbilden – mit hoher Farbwiedergabe, relevantem NIR-Anteil und sehr geringem HEVL. Ihr primärer Zweck besteht darin, im Innenraum naturnahe, physiologisch kompatible Lichtumgebungen bereitzustellen. Als spektral ausgewogene, hormonell neutrale und visuell komfortable Lichtquelle steht diese Technologie bereits jetzt für Anwendungen zur Verfügung, in denen gesundheitliche Verträglichkeit, altersübergreifender Sehkomfort und biologische Stimmigkeit im Vordergrund stehen. ■

Weitere Informationen

Autor: Dr. med. Alexander Wunsch

Fotos: Fotoagenten, Heidelberg, www.fotoagenten-hd.de

Aufmacher: [patpitchaya](https://www.patpitchaya.com) / [shutterstock.com](https://www.shutterstock.com)



Abbildung 4: Der Forschungsschwerpunkt von Dr. med. Alexander Wunsch liegt auf den physiologischen und pathologischen Wirkungen von Licht auf den Menschen. Er zählt zu den deutlichen Kritikern des Verbots der Glühlampe. Foto: Fotoagenten

LITERATUR

- [1] Berna F et al. Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2012;109:E1215–E1220.
- [2] Jablonski NG. The evolution of human skin pigmentation involved the interactions of genetic, environmental, and cultural variables. *Pigment Cell Melanoma Res*. 2021;34:707–729.
- [3] Robertson-Dixon I et al. The influence of light wavelength on human HPA axis rhythms: a systematic review. *Life (Basel)*. 2023;13:1968.
- [4] Petrowski K et al. Increase in cortisol concentration due to standardized bright and blue light exposure on saliva cortisol in the morning following sleep laboratory. *Stress*. 2021;24:331–337.
- [5] Slominski AT et al. How UV light touches the brain and endocrine system through skin, and why. *Endocrinology*. 2018;159:1992–2007.
- [6] Barolet D et al. Infrared and skin: friend or foe. *J Photochem Photobiol B*. 2016;155:78–85.
- [7] Barolet D et al. LED photoprevention: reduced MED response following multiple LED exposures. *Lasers Surg Med*. 2008;40:106–112.
- [8] Barolet AC et al. Low-intensity visible and near-infrared light-induced cell signaling pathways in the skin: a comprehensive review. *Photobiomodul Photomed Laser Surg*. 2023;41:147–166.
- [9] Barolet D. Near-infrared light and skin: why intensity matters. *Challenges Sun Prot*. 2021;55:374–384.
- [10] Françon A et al. Repeated exposure to low doses of light induces retinal damage in vivo in a wavelength-dependent manner. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2025;290:117605.
- [11] Behar-Cohen F et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye? *Prog Retin Eye Res*. 2011;30:239–257.
- [12] Jeffery G et al. Longer wavelengths in sunlight pass through the human body and have a systemic impact which improves vision. *Sci Rep*. 2025;15:24435.

Die vollständige Literaturliste kann beim Verlag angefragt werden.

References

- [1] Berna, F. et al. Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, E1215–E1220 (2012).
- [2] Jablonski, N. G. The evolution of human skin pigmentation involved the interactions of genetic, environmental, and cultural variables. *Pigm Cell Melanoma R* 34, 707–729 (2021).
- [3] Robertson-Dixon, I., Murphy, M. J., Crewther, S. G. & Riddell, N. The Influence of Light Wavelength on Human HPA Axis Rhythms: A Systematic Review. *Life* 13, 1968 (2023).
- [4] Petrowski, K., Bühner, S., Albus, C. & Schmalbach, B. Increase in cortisol concentration due to standardized bright and blue light exposure on saliva cortisol in the morning following sleep laboratory. *Stress* 24, 331–337 (2021).
- [5] Slominski, A. T., Zmijewski, M. A., Plonka, P. M., Szaflarski, J. P. & Paus, R. How UV Light Touches the Brain and Endocrine System Through Skin, and Why. *Endocrinology* 159, 1992–2007 (2018).
- [6] Barolet, D., Christiaens, F. & Hamblin, M. R. Infrared and skin: Friend or foe. *J Photochem Photobiology B Biology* 155, 78–85 (2016).
- [7] Barolet, D. & Boucher, A. LED photoprevention: Reduced MED response following multiple LED exposures. *Laser Surg Med* 40, 106–112 (2008).
- [8] Barolet, A. C., Villarreal, A. M., Jfri, A., Litvinov, I. V. & Barolet, D. Low-Intensity Visible and Near-Infrared Light-Induced Cell Signaling Pathways in the Skin: A Comprehensive Review. *Photobiomodulation, Photomed., Laser Surg.* 41, 147–166 (2023).
- [9] Barolet, D. Near-Infrared Light and Skin: Why Intensity Matters. *Challenges Sun Prot* 55, 374–384 (2021).
- [10] Françon, A., Jonet, L., Behar-Cohen, F. & Torriglia, A. Repeated exposure to low doses of light induces retinal damage in vivo in a wavelength-dependent manner. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 290, 117605 (2025).
- [11] Behar-Cohen, F. et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye? *Prog Retin Eye Res* 30, 239–257 (2011).
- [12] Jeffery, G. et al. Longer wavelengths in sunlight pass through the human body and have a systemic impact which improves vision. *Sci. Rep.* 15, 24435 (2025).
- [13] Neto, R. P. M. et al. Photobiomodulation therapy (red/NIR LEDs) reduced the length of stay in intensive care unit and improved muscle function: A randomized, triple-blind, and sham-controlled trial. *J. Biophotonics* e202300501 (2024) doi:10.1002/jbio.202300501.
- [14] Jeffery, G. & Barrett, E. LED lighting undermines visual performance. (2025) doi:10.21203/rs.3.rs-6540877/v1.
- [15] Shinjmar, H., Hogg, C., Neveu, M. & Jeffery, G. Weeklong improved colour contrasts sensitivity after single 670 nm exposures associated with enhanced mitochondrial function. *Sci Rep-uk* 11, 22872 (2021).
- [16] Françon, A., Behar-Cohen, F. & Torriglia, A. The blue light hazard and its use on the evaluation of photochemical risk for domestic lighting. An in vivo study. *Environ. Int.* 184, 108471 (2024).
- [17] Françon, A. et al. Phototoxicity of low doses of light and influence of the spectral composition on human RPE cells. *Sci. Rep.* 14, 6839 (2024).
- [18] Hunter, J. J. et al. The susceptibility of the retina to photochemical damage from visible light. *Prog Retin Eye Res* 31, 28–42 (2012).
- [19] SCHEER. Opinion on Potential Risks to Human Health of Light Emitting Diodes (LEDs). (2018).
- [20] ICNIRP. ICNIRP GUIDELINES ON LIMITS OF EXPOSURE TO INCOHERENT VISIBLE AND INFRARED RADIATION. (2013).
- [21] Lucas, R. J. Mammalian Inner Retinal Photoreception. *Curr Biol* 23, R125–R133 (2013).
- [22] Lucas, R. J. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends Neurosci* 37, 1–9 (2014).
- [23] Mekschrat, L., Göring, M., Schmalbach, B., Rohleder, N. & Petrowski, K. The influence of light on Interleukin-10: A preliminary study. *Brain, Behav., Immun. - Heal.* 42, 100887 (2024).
- [24] Cheung, I. N. et al. Morning and Evening Blue-Enriched Light Exposure Alters Metabolic Function in Normal Weight Adults. *Plos One* 11, e0155601 (2016).
- [25] Hollwich, F. The Influence of Ocular Light Perception on Metabolism in Man and Animal. (Springer, New York, Heidelberg, Berlin, 1979). doi:10.1007/978-1-4612-6132-2.
- [26] Hollwich, F. THE INFLUENCE OF LIGHT VIA THE EYES ON ANIMALS AND MAN. *Ann Ny Acad Sci* 117, 105–128 (1964).
- [27] Hollwich, F. & Dieckhues, B. Augenlicht und Nebennierenrindenfunktion* 1. *Dtsch. Med. Wochenschr.* 92, 2335–2341 (1967).
- [28] Berson, D. M., Dunn, F. A. & Takao, M. Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. *Science* 295, 1070–1073 (2002).
- [29] Liu, Y., Chen, M. & Li, N. Correlation of Melatonin and Cortisol in Bipolar Depression: A Preliminary Small-Sample Study. (2024) doi:10.21203/rs.3.rs-4446297/v1.
- [30] Burns, A. C. et al. Day and night light exposure are associated with psychiatric disorders: an objective light study in >85,000 people. *Nat. Ment. Heal.* 1–10 (2023) doi:10.1038/s44220-023-00135-8.
- [31] Algvare, P. V., Marshall, J. & Seregard, S. Age-related maculopathy and the impact of blue light hazard. *Acta Ophthalmol Scan* 84, 4–15 (2006).
- [32] Nagai, H. et al. Prevention of increased abnormal fundus autofluorescence with blue light-filtering intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 41, 1855–1859 (2015).
- [33] Danilenko, K. V. & Samoilova, E. A. Stimulatory Effect of Morning Bright Light on Reproductive Hormones and Ovulation: Results of a Controlled Crossover Trial. *Plos Clin Trials* 2, e7 (2007).
- [34] Yang, Z. et al. Disruption of central and peripheral circadian clocks and circadian controlled estrogen receptor rhythms in night shift nurses in working environments. *FASEB J.* 38, e23719 (2024).
- [35] Kessel, L., Lundeman, J. H., Herbst, K., Andersen, T. V. & Larsen, M. Age-related changes in the transmission properties of the human lens and their relevance to circadian entrainment. *J Cataract Refract Surg* 36, 308–312 (2010).
- [36] Shady, S., MacLeod, D. I. A. & Fisher, H. S. Adaptation from invisible flicker. *Proc National Acad Sci* 101, 5170–5173 (2004).
- [37] Sheppard, A. L. & Wolffsohn, J. S. Digital eye strain: prevalence, measurement and amelioration. *Bmj Open Ophthalmol* 3, e000146 (2018).
- [38] Lehman, B. & Wilkins, A. J. Designing to Mitigate the Effects of Flicker in LED Lighting. *IEEE Power Electron. Mag.* 1, 18–26 (2014).
- [39] Wilkins, A., Veitch, J. & Lehman, B. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update. 2010 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. 171–178 (2010) doi:10.1109/ecce.2010.5618050.
- [40] Lehman, B., Wilkins, A., Berman, S., Poplawski, M. & Miller, N. J. Proposing Measures of Flicker in the Low Frequencies for Lighting Applications. 2011 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. 2865–2872 (2011) doi:10.1109/ecce.2011.6064154.
- [41] Vandewalle, G. et al. Spectral quality of light modulates emotional brain responses in humans. *Proc National Acad Sci* 107, 19549–19554 (2010).
- [42] Vandewalle, G. et al. Brain Responses to Violet, Blue, and Green Monochromatic Light Exposures in Humans: Prominent Role of Blue Light and the Brainstem. *PLoS ONE* 2, e1247 (2007).
- [43] James, P. et al. Outdoor Light at Night and Breast Cancer Incidence in the Nurses' Health Study II. *Environ Health Persp* 125, 087010 (2017).
- [44] Schernhammer, E. S., Kroenke, C. H., Laden, F. & Hankinson, S. E. Night Work and Risk of Breast Cancer. *Epidemiology* 17, 108–111 (2006).
- [45] Hatori, M. et al. Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies. *Npj Aging Mech Dis* 3, 9 (2017).
- [46] Ward, E. M. et al. Carcinogenicity of night shift work. *Lancet Oncol* 20, 1058–1059 (2019).
- [47] Artigas, J. M., Felipe, A., Navea, A., Fandiño, A. & Artigas, C. Spectral Transmission of the Human Crystalline Lens in Adult and Elderly Persons: Color and Total Transmission of Visible Light. *Investig. Ophthalmology Vis. Sci.* 53, 4076 (2012).



Dr. Alexander Wunsch, MD, PhD

Dr. Alexander Wunsch, MD, PhD, is a physician, light therapist, independent researcher, and scientific consultant. From 2008 to 2019, he served as a lecturer in the Master of Arts program in Architectural Lighting Design at Wismar University of Applied Sciences. His research is focused on the physiological and pathological effects of light on humans, and he has been a vocal critic of the ban on incandescent lamps. His work advocates for a paradigm shift in the field of photobiology and calls for a health-centered redefinition of lighting standards. Dr. Wunsch emphasizes the necessity of shifting from the utilization of energy efficiency as the predominant criterion for indoor lighting, promoting instead the adoption of salutogenic lighting concepts grounded in human biology. This approach prioritizes the beneficial impact on health over considerations of technical or economic feasibility.

wunschart@gmail.com