

2011

Die biologische Wirkung des Lichtes

Autor: Michael Liffers,
Luxerna LED Lighting GmbH

[DIE BIOLOGISCHE WIRKUNG DES LICHTES]

Im Jahre 2002 entdeckten Wissenschaftler einen dritten Fotorezeptor im Auge, der keine visuellen Aufgaben hat.

Die Sonne, als einzige Energiequelle, spielt in der Entwicklung der Lebewesen eine zentrale Rolle. In Folge der Evolution passte sich nicht nur der Mensch an den immer wiederkehrenden Tag – Nacht Rhythmus und den wiederkehrenden Gezeiten, wie Winter und Sommer, an. Der Mensch in seiner heutigen Form existiert seit mehr als 150.000 Jahre, er beherrscht seit ca. 100.000 Jahren das Feuer. Doch erst seit ca. 100 Jahren hat der Mensch Zugang zu künstlichem Licht. Doch dieser Zugang spielt für die Evolution des Menschen keine Rolle. Anders der immer wiederkehrende Tag – Nacht Rhythmus. Diese ständigen Veränderungen haben dazu geführt, dass der Mensch ein perfektes System von inneren Uhren entwickelt hat, der sich dem sog. Circadianen Rhythmus anpasst. Schon seit den fünfziger Jahren (R.A. Weal et al. 1952 [1]) weiß man, dass Licht eine biologische Wirkung auf den Menschen hat. Formen der Winterdepressionen (SAD) werden mit einer hohen Dosis Licht behandelt. Doch erst seit 2001 entdeckte man die Zusammenhänge genau. Es handelt sich um einen dritten Photorezeptor im Auge. Diese Erkenntnis von zwei unabhängig voneinander forschenden Arbeitsgruppen um Brainard und Thapan 2001 [2,3] war deshalb so revolutionär, da diese Rezeptoren nicht auf visuelle Reize reagieren, sondern gravierenden Einfluss auf unsere Gesundheit und physiologische Aktivität haben.

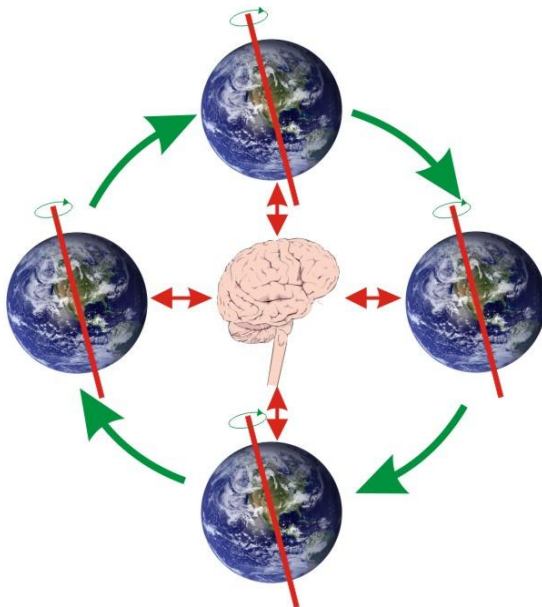


Abb. 1 Die Entwicklung im Einfluß der Gezeiten. Der immer wiederkehrende Rhythmus der Gezeiten hat unser Leben geprägt. Man unterscheidet verschiedene Rhythmen:

1. Circadianer Rhythmus = circa (ungefähr) und dias (Tag) entspricht in etwa einen Tag Nacht Rhythmus
2. Ultradianer Rhythmus = kürzer als der 24 Stunden Rhythmus, wie z.B. bei Zellteilungen
3. Infradianer Rhythmus = länger als 24 Stunden Rhythmus, wie z.B. ein Jahres Rhythmus

Jahrzehntlang glaubte man, dass die einzigen Rezeptoren im Auge die des visuellen Sehens wären. Das menschliche Auge hat ein visuelles Wirkspektrum von 380nm bis 780nm. Die Rezeptoren für das Sehen sind Zapfen und Stäbchen. Die Zapfen reagieren auf die Farben rot, grün und blau, also das Tagsehen, die Stäbchen haben nur ein Hell Dunkel Empfinden für das Nachtsehen.

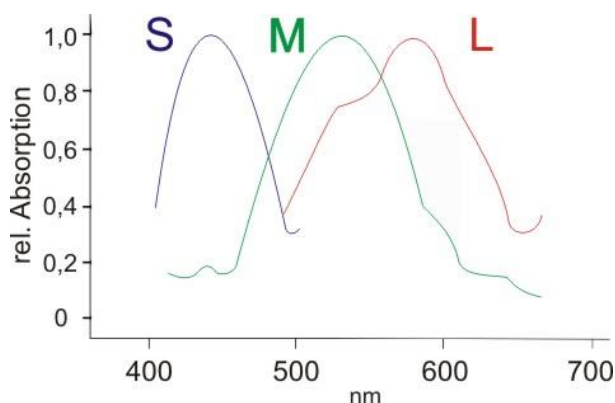


Abb. 2 Sehempfindlichkeit des menschlichen Auges, Wirkfunktion der drei Zapfen

Das Auge hat ihre empfindlichste Reizung am Tage (photopisch) bei 555nm und in der Nacht (Skotopisch) bei 505nm.

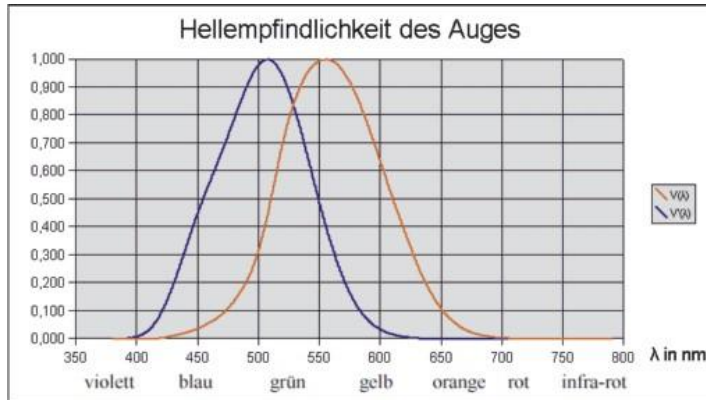


Abb. 3 Hellempfindlichkeit des Auges

blau = skotopisch, rot = photopisch

Die neu entdeckten Rezeptoren, eine spezielle Art der Ganglienzellen, haben keine visuelle Bedeutung für den Organismus. Das Auge funktioniert also nicht alleine als Sehorgan, sondern auch als Transmitter für die Chronobiologische Wirkung und somit als Taktgeber für die biologische Uhr. Ihr Wirkmaximum liegt bei ca. 460 nm, also im Blaubereich.

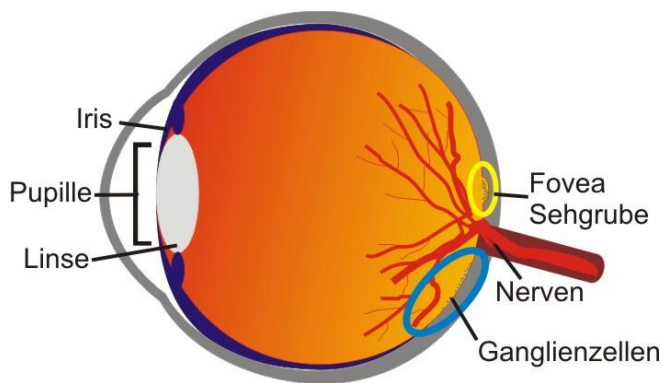


Abb. 4 Im Sehzentrum, der Fovea, finden sich konzentriert photosensitive Rezeptoren. Außerhalb der Fovea liegen gleich verteilt Ganglienzellen. Im unteren und Nasalen Bereich befinden sich Ganglienzellen mit dem lichtempfindlichen Stoff Melanopsin.

Das menschliche Auge hat eine Vielzahl von photosensitiven Rezeptoren auf der Retina. Die Sehgrube, die sog. Fovea, ist das Zentrum des Scharfsehens. Hier befinden sich konzentriert die Rezeptoren für das Sehen am Tage. Außerhalb der Fovea, gleichmäßig verteilt über die Retina, ließen sich lichtempfindliche Ganglienzellen, sog. Intrinsically photosensitive Retinal Ganglien Cells (ipRGC), nachweisen (Berson et al. 2002 [4]). Diese Ganglienzellen enthalten das Photopigment Melanopsin, welches Lichtreize an das Gehirn weiterleitet. Nur 1% der Ganglienzellen enthalten Melanopsin.

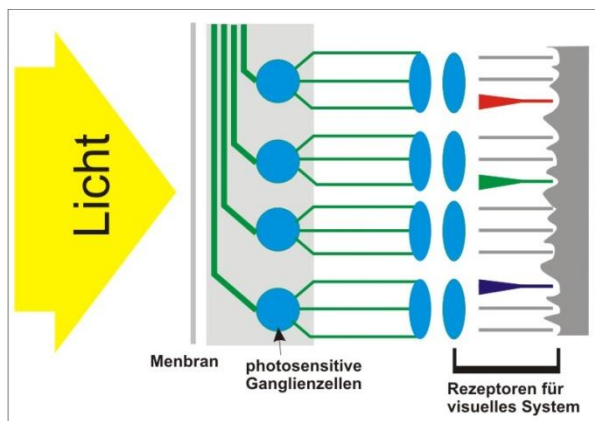


Abb. 5 Das Licht durchläuft die Membran, die Ganglienzellen, die Bi-Polar Zellen bis zu den Photorezeptoren, den Zapfen und den Stäbchen. Die Retinalen Ganglienzellen haben lange Axone, die über den retino-hypothalamatischen Trakt mit dem Supra Chiasmatischem Nucleus verbunden ist.

In das Auge einfallendes Licht durchläuft mehrere Schichten der Retina bis zu den Rezeptorzellen des visuellen Sehens. Die lichtintensiven Ganglienzellen sind mit langen Axonen über den retino-hypothalamischen Trakt mit dem Suprachiasmatischen Nucleus (SCN) verbunden. Das SCN liegt im Zentrum des Gehirns und besteht aus ca. 10.000 Nervenzellen, die wiederum jede für sich eine eigene innere Uhr hat. Läuft die Reizübertragung synchron, so verstärken sich die Nervensignale. Die Reize werden an die Epiphyse oder der Zirbeldrüse übertragen. Das SCN ist also Master Clock und reguliert so den Hormonhaushalt des Körpers, in dem er Hormone produziert oder hemmt, Enzyme aktiviert oder blockiert und bestimmte Nervensignale an- oder ausschaltet.

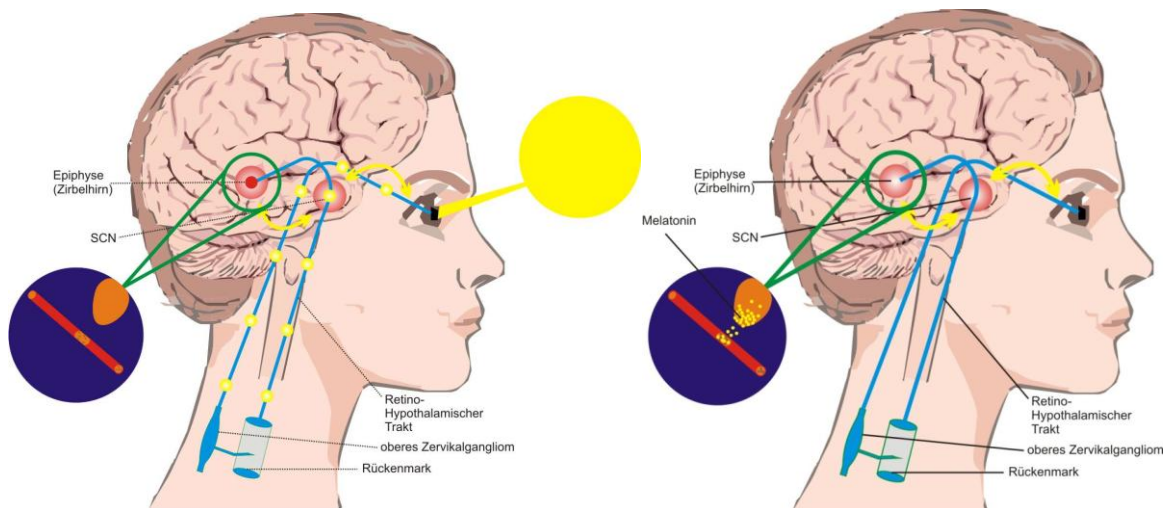


Abb. 6 Der Supra Chiasmatische Nucleus liegt oberhalb (supra) der Kreuzung (Chiasma) der Sehnerverven und besteht aus zwei reiskorngroße Gehirnkerne. Er ist über den retino hypothalamischen Trakt mit der Epiphyse verbunden und regelt über Lichtreize den Hormonhaushalt.

Diese Reizübertragung läuft wesentlich träger ab, als die Reizübertragung des visuellen Sehens. Anders als die Reaktion des visuellen Sehens, bei der der Organismus innerhalb von Millisekunden sich immer wieder auf die ständig ändernden Leuchtdichten einstellen muss, entsteht eine biologische Wirkung nicht sofort nach einer Änderung der Leuchtdichte, sondern reagiert auf den langsamen Wechsel des Tag Nacht Rhythmus. Dieses alles geschieht über den Suprachiasmatischen Nucleus, der als Regulator der inneren Uhr zählt. Er regelt über die Zirbeldrüse die Produktion des Schlafhormons Melatonin. Entscheidend für diese Regelung ist das Melanopsin in den Ganglienzellen. Im Gegensatz zu den anderen Photorezeptoren liegt die Empfindlichkeit des Melanopsin bei 464nm.

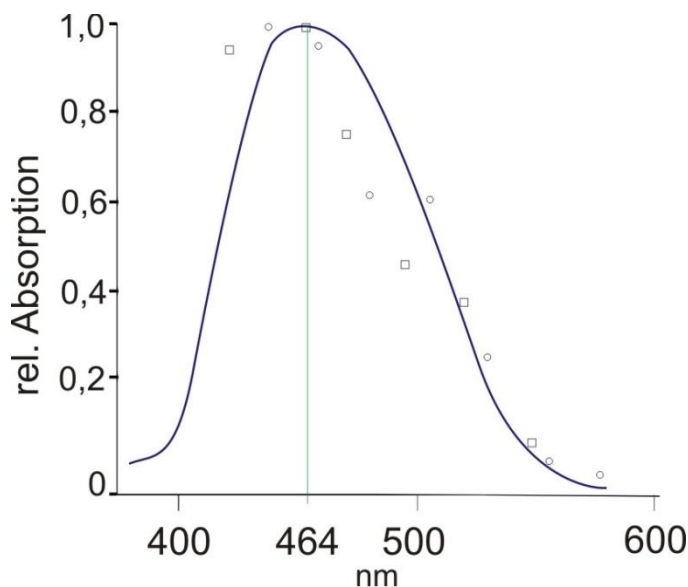


Abb. 7 Wirkfunktion der Melatoninunterdrückung nach Brainard und Thapan 2001. Wirkmaximum bei ca. 460 nm.

Wird dieser Rezeptor nun durch einen Dunkelreiz aktiviert, so wird ein Impuls über Nerven in den SCN geleitet. Der Reiz wird von hier aus weitergeleitet über das basale Vorderhirnbündel zum oberen thorakalen Rückenmark und weiter zum oberen Zervikalganglion, welches mit der Zirbeldrüse verbunden ist. Hier wird die Melatonin synthese aktiviert. Wird nun das Melanopsin durch Licht gereizt, so verhindert er die Weiterleitung des Impulses an die Zirbeldrüse und die Melatoninproduktion wird unterdrückt.

Das Melatonin

Das Melatonin [6,7,8] (N-Acetyl-5-methoxytryptamin) ist ein wichtiges Hormon des Stoffwechsels beim Menschen. Es wird in der Zirbeldrüse aus Serotonin gewonnen. Die Wirkungen des Melatonins sind vielfältig und spielt für die Steuerung des circadianen Rhythmus eine entscheidende Rolle. Die exakte Wirkung von Melatonin ist aber noch nicht genau geklärt und Gegenstand der Forschung.

1. Melatonin wird als Schlafhormon bezeichnet. Dieses gilt nicht für *alle* Lebewesen. Es regelt den Schlaf-Wach Rhythmus. Abends und in der Dunkelheit wird Melatonin ausgeschüttet und sorgt für Müdigkeit. Am Morgen durch erste Lichtstrahlen wird die Produktion gestoppt.
2. Melatonin reguliert die Körpertemperatur. Diese ist während der Schlafphase um 3.00 Uhr morgens am niedrigsten. Hier ist der Körper in der tiefsten Ruhephase.
3. Stoffwechselforgänge und Körperfunktionen werden auf ein Minimum reduziert, zugunsten der verdienten Nachtruhe. Der Blutdruck sinkt. Hier kann der Organismus seinen nächtlichen Erholungszyklus optimal nutzen und optimiert so seine Selbstreparaturleistung.
4. Melatonin zählt zu den Antioxidantien und fängt freie Radikale. Diese Wirkung soll um 60 bis 70 mal höher sein, als die des Vitamin C und E (Reiter 2002/Reiter et al. 2004 [9,10]). Melatonin steht somit in Verdacht, Krankheiten wie Krebs oder auch Alzheimer zu verhindern oder abzuschwächen.
5. Melatonin regt die weißen Blutkörperchen an Antikörper zu produzieren und stimuliert so das Immunsystem und schützt vor Herz-Kreislaufprobleme.
6. In Vivo hat das Melatonin einen onkostatistischen Effekt. Es unterdrückt und verhindert das Wachstum von Tumoren. Dabei nicht nur Mammakarzinome, sondern auch maligne Melanome. Diese Erkenntnis wird auf die Eigenschaft als Antioxidans zurückgeführt.

Das Melatonin steht dem Menschen nicht zu jeder Tageszeit in ausreichendem Maße zur Verfügung. Die Ausschüttung des Melatonins ist in der Nacht am Größten und nimmt gegen morgen wieder ab.

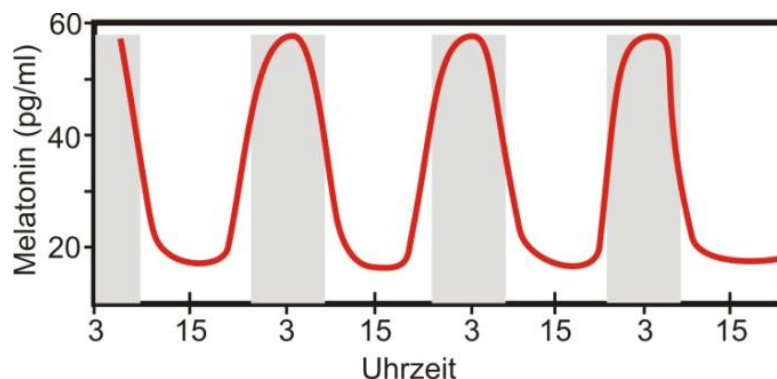


Abb. 8 . geregelter Melatoninspiegel. Um 3.00 Uhr morgens ist das Maximum der Melatoninausschüttung. Über Tag wird Melatonin weitgehend unterdrückt.

Die Konzentration des Melatonins verursacht auch eine Änderung der Konzentration anderer Hormone, wie u.a. das Stresshormon Kortisol oder das Glückshormon Serotonin. Eine Störung des circadianen Rhythmus kann daher auch zu einer Störung des Hormonhaushaltes führen.

Wirkung des Lichtes

Schon 1952 fand R.A. Weale [1] heraus, dass das Auge auf Licht im blauen Bereich sensibler reagiert, als bei anderen Wellenlängen. Licht steuert unsere biologische Uhr und synchronisiert den Tag Nacht Rhythmus immer wieder aufs Neue. Bei völliger Dunkelheit kann unsere innere Uhr nicht synchronisiert werden. Sie läuft frei. Dabei ist die Periodendauer etwa 10-20 min länger als 24 Stunden, wobei sie täglich immer mehr abweicht, d.h. sie wird desynchronisiert (Czeisler et al. 1999 [11]). Das führt zu Symptomen, die denen eines Jetlags ähneln.

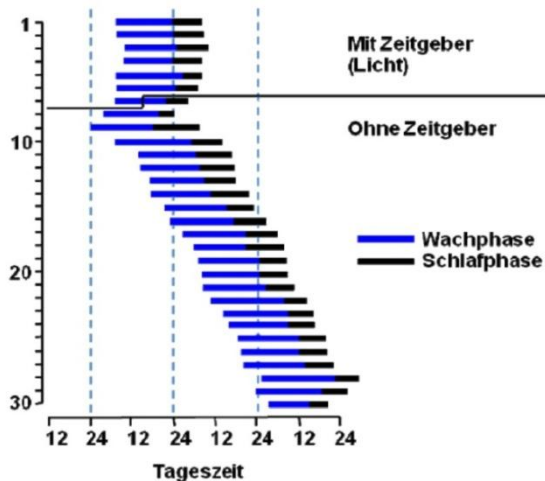


Abb. 9 Durch das Tageslicht wird unsere innere Uhr immer wieder neu synchronisiert. Bei völliger Dunkelheit läuft unsere innere Uhr frei und verschiebt sich von Tag zu Tag.

Durch den Zugang zu künstlichem Licht, entfernt der Mensch sich immer mehr von den natürlichen Rhythmen. Fast unbegrenzt steht dem Menschen künstliches Licht zur Verfügung. Die zur Verfügung stehenden Spektren der einzelnen Lichtquellen spiegeln oftmals nicht die natürliche Qualität des Tageslichtes wider. Das kann zu gravierenden Änderungen des circadianen Rhythmus führen. Der Mensch ist in seiner Evolutionsgeschichte immer im Einfluss des natürlichen Sonnenlichtes gewesen. Durch die heutigen künstlichen Lichtquellen jedoch verbringt der Mensch mehr Zeit in Räumen, als unter freiem Himmel. Ein hoher Blauanteil der natürlichen Beleuchtung über Tage führt zu einer Melatoninunterdrückung. Den meisten künstlichen Lichtquellen fehlt genau dieser Blauanteil für die biologische Wirkung. Leuchtstoffröhren der Qualität 830 oder 840 in Büros, Schulen und Arbeitsstätten weisen eine kaum bis sehr geringe biologische Wirkung auf (Gall, 2004; Rea, 2003 [12,13]). Das führt dazu, dass unser Körper Melatonin ausschüttet. Die Folge ist Müdigkeit, Unkonzentriertheit, Konzentrationsverlust und Leistungsreduzierung am Tage, bis hin zu Depressionen. Nachts fehlt dieser Anteil an Melatonin um die Tiefschlafphase zu erreichen. Das ist deswegen problematisch, da wichtige Selbstheilungsleistungen des Körpers genau in dieser Schlafphase geschehen. Freie Radikale, die im Körper Schäden an der Zell DNA verursachen, können nicht effektiv verhindert werden. Der nächtliche Erholungszyklus wird gestört. Andererseits wird genau in den Abend- und Nachtstunden oft Licht mit einem hohen Blauanteil konsumiert. Nachtschichtarbeiter oder auch Krankenschwestern sind während ihrer Nachtarbeit oftmals hohen Lichtintensitäten mit einem hohen Blauanteil ausgesetzt. Aber auch Fernsehgeräte oder auch Monitore weisen einen deutlich erhöhten Blauanteil aus, der in der Lage ist, Melatonin zu unterdrücken. Auch das führt zu Schlaflosigkeit, Müdigkeit bis hin zu Depressionen.

Im Jahre 2007 hat die International Agency for Research on Cancer (IARC) der WHO Schichtarbeit mit zirkadianer Disruption beziehungsweise Chronodisruption als wahrscheinliches Humankarzinogen eingestuft. „Die Einstufung als „wahrscheinlich krebserregend“ wurde vorgenommen, da die Belege beim Menschen zwar „begrenzt“, aber in Tierexperimenten bereits ausreichend schienen.“ (Zitat Deutsches Ärzteblatt Sep. 2010 [14]). Neueste Forschungsergebnisse (Erren TC, Reiter RJ, 2009 [15]) zeigen genau diesen Trend. Es ist auch als logisch nachzuvollziehen, dass eine Unterbrechung der hormonell wie auch physiologisch perfekt auf einander abgestimmten Prozesse, auf Dauer dem Körper schadet. Schichtarbeiter oder auch Krankenschwestern weisen ein deutlich erhöhtes Krebsrisiko aus, als Menschen mit normaler Tagesarbeit.

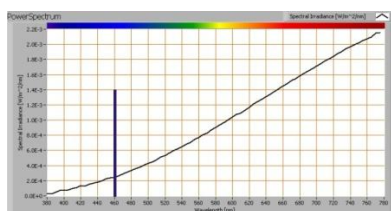
Vergleich der Lichtquellen in Effektivität und Effizienz

Gute und effektive Lichtquellen müssen dem Tageslicht angepasst sein. Sie müssen dynamisch, über den Tag verteilt, ihr Wellenlängenspektrum und Lichtintensität dem Tageslichtverlauf anpassen. Früh morgens angefangen mit einem geringen Blauanteil und hohem Rotanteil wird im Verlauf des Morgens immer mehr blau eingemischt. Der hohe Blauanteil bewirkt eine Melatonin-suppression. Der Körper muss jetzt wissen, dass es Tag ist. Je nach Aufgabenart wird die Intensität arbeitsgerecht eingestellt. Die Norm verlangt 300lx am Arbeitsplatz und 500lx am Computerarbeitsplatz. Dieses entspricht in der Norm aber leider nur die Minimalgrenze. An einem sonnigen Sommertag sind wir bis zu 100.000lx Sonnenlicht ausgesetzt. Kommen wir ins Büro, so erwarten uns gerade mal 500lx, wobei durch die Messgröße Lux noch nicht einmal der Blauanteil bestimmt ist, da sie eine photopische Größe ist. Eine biologische Wirkung des Lichtes ist daher nicht vorhersehbar, da sie eine circadiane Größe ist. Hier wird der Begriff der „biologischen Dunkelheit“ geprägt (Schierz, 2002 [16]). Ein Schritt in die richtige Richtung wäre eine radiometrische Angabe der Energie in Watt/nm, die tatsächlich auf unser Auge trifft und nicht in Lux, die nichts über die biologische Wirkung aussagt. Gute Ansätze gibt es bei Rea et al. 2003.

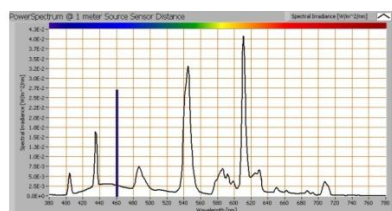
Die erste künstliche Lichtquelle ist die Glühlampe. Der durch eine Glühwendel in einem Vakuum durchlaufende Strom führt aufgrund des Widerstandes zu einer Erhitzung der Glühwendel, wobei unter anderem Licht ausgesendet wird. Dabei ist die Farbtemperatur des Lichtes genau die Temperatur, die an der Glühwendel gemessen wird. Dieses Licht enthält einen sehr hohen Rot- und Infrarotanteil. Aber nur sehr wenig blau. Sie hat eine sehr geringe biologische Wirkung. Sie ist daher für Abend und Nachtstunden gut geeignet.

Den größten Anteil an Beleuchtung macht die Leuchtstoffröhre aus. Hier sendet angeregtes Quecksilbergas UV Strahlung aus. Die UV Strahlung trifft auf einen Leuchtstoff, der die Strahlung in sichtbares Licht umwandelt. Je nach Zusammensetzung des Leuchtstoffes erhält man unterschiedliche Spektren und somit unterschiedliche Farbtemperaturen und Qualitäten.

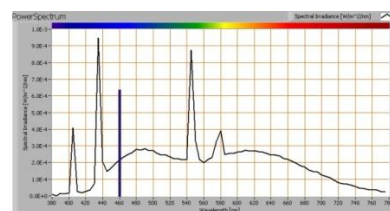
Die Lichtemission der LED beruht auf einem Effekt der Halbleitertechnik. Wird an einer Diode in Durchlassrichtung eine bestimmte Spannung angelegt, so fängt der Werkstoff an zu leuchten. Die Lichtfarbe ist abhängig vom verwendeten Werkstoff, d.h. unterschiedliche Werkstoffe, emittieren unterschiedliches Licht. Dabei emittieren sie jeweils Licht einer bestimmten Wellenlänge. Die kommerzielle Nutzung des weißen Lichtes geschieht durch blaue oder UV-LED. Diese strahlen ein kurzwelliges, höher energetisches Licht aus, welches ein photolumineszierendes Material anleuchtet und in weißes, aber niederenergetisches Licht umwandelt. Je nach Material erhält man unterschiedliche Farbtemperaturen und Lichtqualitäten.



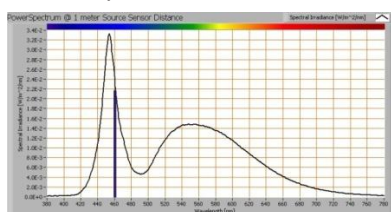
Glühlampe 60 Watt



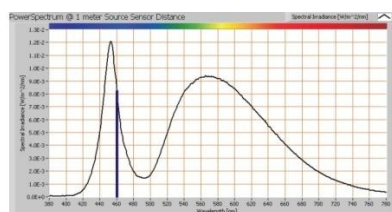
Leuchtstoffröhre 840



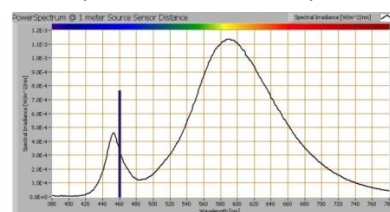
Kompaktleuchtstofflampe 955



Luxerna LED 6500K



Luxerna LED 4000K



Luxerna LED 2800K

Die klassische Glühbirne hat kaum oder nur eine sehr geringe biologische Wirkung. Sie ist sehr schlecht geeignet, Melatonin zu unterdrücken. Ihre Effizienz liegt nur bei 12 – 16 lm/w.

Die Leuchtstoffröhre ist wesentlich effizienter. Hochmoderne Systeme kommen auf 80 – 100lm/w. Die Leuchtstoffröhre gibt es in unterschiedlichen Wellenlängenzusammensetzungen. Das heißt, der Blau- und der Rotanteil können, je nach Anforderung, eingestellt werden. Die Leuchtstoffröhre ist ein Linienstrahler. Die weitverbreitete Dreibandröhre hat drei charakteristische Linien im Blau (430nm), Grün (545nm) und Orange (610nm). Somit kann die biologische Wirkung über die Intensität des Blauanteils gesteuert werden. Es gibt aber einige Nachteile, die den Einsatz der Leuchtstoffröhre in Frage stellen.

Da zur Anregung des Leuchtstoffes Quecksilber benötigt wird, handelt es sich hierbei um gefährlichen Sondermüll. Bis zu 3 mg Quecksilber werden benötigt. Quecksilber ist ein Nervengift und kann das zentrale Nervensystem schädigen. Ferner wird durch das angeregte Quecksilber UV Strahlung frei. Die Leuchtstoffröhre strahlt in einem 360° Winkel. Man benötigt Spiegel oder Raster, die das Licht dahin lenken, wo es gebraucht wird. Das führt zu energetischen Verlusten. Die Leuchtstoffröhre mit einem hohen Rotanteil ist sehr energieeffizient. Je mehr Blau eingemischt wird, je merklicher sinkt die Effizienz. Genau in dem Bereich, wo die biologische Wirkung am Größten ist, ist die Effizienz der Leuchtstoffröhre am Kleinsten.

Für eine gute biologische Wirkung und eine dynamische Farblichtänderung, ist die LED sehr gut geeignet. Da die weiße LED aus einer blauen LED mit einem Phosphor besteht, kann anhand der Phosphorkonzentration die Intensität der blauen Spektrallinien variiert werden. Je mehr Phosphor eingesetzt wird, desto mehr Blauanteil wird in sichtbares Licht umgewandelt. Das bedeutet: bei einer Farbtemperatur von 3000 K ist nur noch ein sehr geringer Blauanteil vorhanden, während bei einer 7000 K Lichtfarbe ein sehr hoher Blauanteil vorhanden ist. Aus einer Kombination dieser beiden Lichtfarben und einer geeigneten Steuerung, kann man zwischen einer Lichtfarbe mit einer hohen biologischen Wirkung und einer Lichtfarbe geringer biologischer Wirkungen wechseln. Sollte dieser Effekt verstärkt werden, so hat man die Möglichkeit, zusätzlich gezielte blaue LED einzusetzen. Dadurch lassen sich hochmoderne Beleuchtungssysteme entwickeln, die die Gesundheit nachhaltig fördern.

Die LED hat den Vorteil, dass sie im Bereich hoher biologischer Wirkung, sehr effizient ist. Außerdem erfüllt das vom Phosphor umgesetzte Licht, die Norm für die photopischen Sehaufgaben. Der blaue Anteil steuert die biologische Wirkung.

Anforderungen an Leuchten

Die Erkenntnis des neuen Photorezeptors fordert ein grundlegendes Umdenken in der Konstruktion von Leuchten. Die photosensitiven Ganglienzellen befinden sich im nasalen Bereich unterhalb der Fovea. Eine punktförmige Lichtquelle erzeugt auch nur ein punktförmiges Lichtbild auf der Retina.

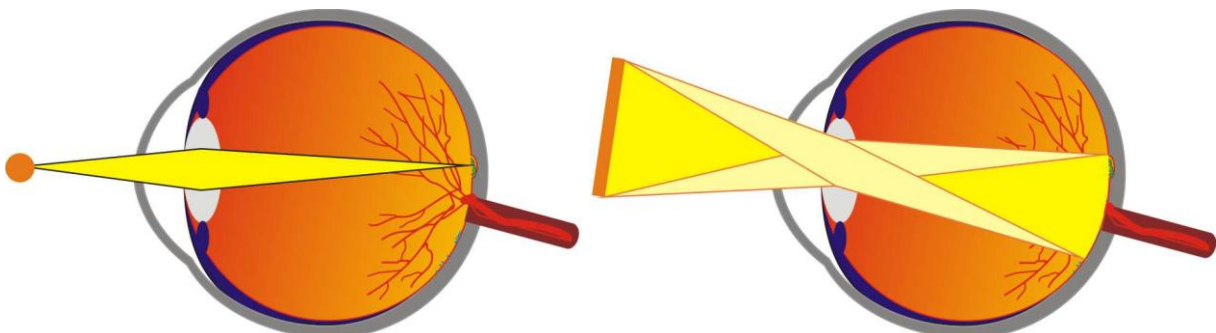


Abb. 10 Punktförmige Lichtquellen erzeugen keinen biologischen Lichtreiz. Erst eine genügend große Leuchtfläche erfüllt diese Anforderung.

Eine große Leuchtfläche erzeugt auch einen flächigen Reiz auf der Retina. Es ist daher darauf zu achten, dass die abstrahlende Leuchtfläche groß genug ist, um auch die circadianen Rezeptoren zu reizen. Die heutigen überwiegend eingesetzten Leuchten haben entweder einen sehr hellen Lichtpunkt, wie Halogenstrahler, oder, wie bei Leuchtstoffröhren, Raster, die die abstrahlende Leuchtfläche, aufgrund der Blendung und Leuchtdichtereduzierung, bei 65° verdecken. Aber genau bei diesem Eintrittswinkel in das Auge hat man die beste biologische Wirkung.

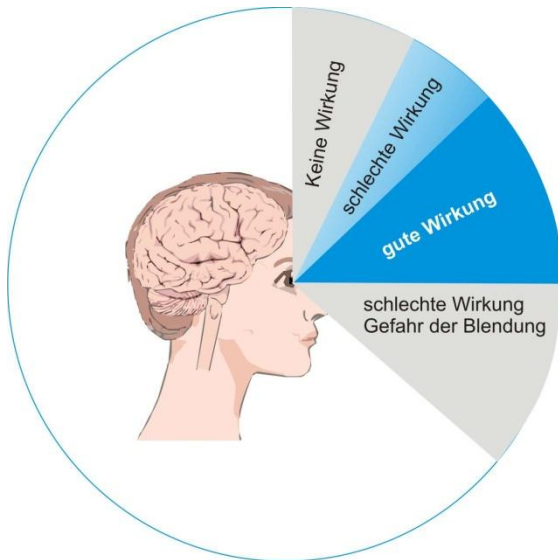


Abb. 11 Die beste biologische Wirkung des Lichtes erhält man, wenn das Licht in einem Winkel zwischen 45° und 90° in das Auge fällt.

Wünschenswert wären großflächige Deckenleuchten, die man aneinanderreihen kann. Hier haben sich Leuchten mit prismatischen Kunststoffplatten bewährt. Die in den Platten eingelagerten Mikroprismen haben bei 65° entblendende und leuchtdichtereduzierende Eigenschaften, die aber dabei im 65° Winkel großflächig leuchten. Eine weitere Möglichkeit wäre ein großer Anteil indirekter Strahlung zur Decke und Wand in einem Raum.

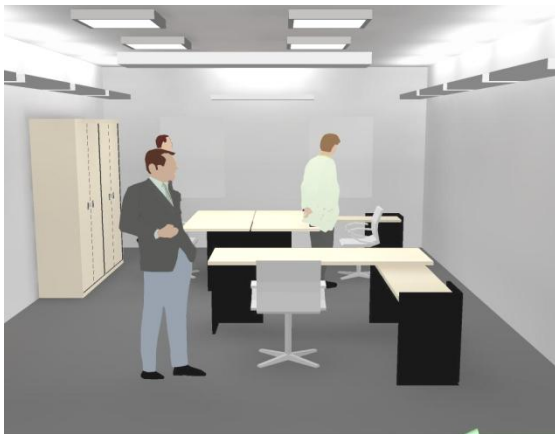


Abb. 12a . Direkte und indirekte Beleuchtung in einem Büro. Diese Beleuchtungssituation ermöglicht eine gute biologische Wirkung.



Abb. 12b Deckenaufbauleuchten mit Spiegelraster haben keine große Leuchtfläche. Beim optimalen Beleuchtungswinkel von 65° verdecken sie die Leuchtmittel

Literaturhinweise

1. R.A. Weal „Spectral Sensitivity and Wave-length discrimination of the peripheral Retina“ 1952
2. Brainard “Action Spectrum for melatonin regulation in Humans: Evidence for a novel circadian Photoreceptor” Journal of Neuroscience 2001
3. Thapan K, Arendt J, Skene DJ. An action spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. Journal of Physiology 2001; 535: 261–267.
4. Berson, D.M., F.A. Dunn and M. Takao “Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock” Science, 2002. 295(5557): p. 1070-3.
5. Wolfgang Ehrenstein. Das Auge stellt die biologische Uhr des Menschen - Konsequenzen für Lichtnutzung und Lichttechnik - Angewandte Physiologie (140), Universität Hohenheim,TUB Symposium "Licht und Gesundheit", 21.22. Febr. 2002
6. Robert Koch Institut, „Melatonin in der umweltmedizinischen Diagnostik im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern (EMF)“ Umweltmed Forsch Prax 12 (3) 181 – 184 (2007)
7. Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lerchl, „Die Melatonin-Hypothese. Eine Einführung.“ Edition Wissenschaft Juni 2002
8. Univ. Prof. Dr. W. Schobersberger, V. Gufler, G. Hoffmann; „Wieviel Licht braucht der Mensch? – Bedeutung von Licht für die Gesundheit“, Institut für Urlaubs-, Reise- und Höhenmedizin an der UMIT
9. Reiter, R.J., Tan, D.X., Gitto, E., Sainz, R.M., Mayo, J.C., Leon, J., Manchester, L.C., Kilic, E. Kilic, U. 2004: “Pharmacological utility of melatonin in reducing oxidative cellular and molecular damage”. Pol.J.Pharmacol. 56, 159–170.
10. Reiter, R.J. 2002: “Potential biological consequences of excessive light exposure: melatonin suppression, DNA damage, cancer and neurodegenerative diseases”. Neuro.Endocrinol.Lett. 23, Suppl 2, 9–13
11. Czeisler, C. A., Duffy, J. F., D. W., Ronda, J. M., Silva, E. J., Allan, J. S., Emens, J. S., Dijk, D. J. & Kronauer, R. E. 1999: “Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker”. Science 284, 2177–2181.
12. Dietrich Gall, “Die Messung circadianer Strahlungsgrößen” Technischwe Universität Illmenau, 2004
13. Mark S. Rea, M. Figuero, J. Bullough “Spectral sensitivity of the Circadian System” 2003 Lighting Research Center, NY
14. Erren, Thomas C.; Falaturi, Puran; Morfeld, Peter; Knauth, Peter; Reiter, Russel J.; Piekarski, Claus „Schichtarbeit und Krebs: Hintergründe und Herausforderungen“ Dtsch Arztebl Int 2010; 107(38): 657-62
15. Erren TC, Pape HG, Reiter RJ, Piekarski C: “Chronodisruption and cancer”. Naturwissenschaften 2008; 95: 367–82
16. Christoph Schierz „Leben wir in einer biologischen Dunkelheit?“ Licht 2002 in Maastrich, Tagungsband S. 381-389