



Tages- und Kunstlicht im Kontext von Gesundheitsbauten – eine Literaturanalyse zur Wirkung von Licht auf die menschliche Gesundheit.

Bachelorthesis im Studienfach Umweltingenieurwesen
Technische Universität München (TUM)
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Bauphysik
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Peter Sedlbauer

Vyacheslav Parkhayev
geboren am 16. Mai 1991 in Rivne (Ukraine)
Jankstraße 4
81929 München

Betreuerin: Viktoria Krastel M. Sc. M. Sc., Lehrstuhl für Bauphysik, TUM

09.10.2017

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der gesundheitlichen Auswirkungen von Licht auf den Menschen. Insbesondere wird dabei der Fokus auf gesundheitsfördernde Einrichtungen gelegt: Krankenhäuser, Kliniken, Alters- und Pflegeheime. Entsprechend der Einschränkungen resultieren hieraus zwei zu betrachtende Gruppen: Patienten und deren Pflegepersonal.

Diese Arbeit basiert auf einer reinen Literaturrecherche. Hierfür kamen insbesondere die Datenbanken *Scopus*, *PubMed* und *Sciencedirect* zum Einsatz. Nach einer allgemeinen Recherche der Lichteinflüsse auf die menschliche Gesundheit, wurden die Schlagwörter bei der Suche spezifiziert, um so gezielt Literatur für die genannten Zielgruppen zu erlangen. Dabei kristallisierten sich drei durch Licht bedingte Einflussfelder heraus: Melatonin, Vitamin D und Flimmern durch künstliche Lichtquellen.

Licht hat einen direkten Einfluss auf die Ausschüttung des menschlichen Hormonhaushaltes. In Abhängigkeit der durch das Auge absorbierten Farbtemperatur kann die Produktion beziehungsweise Hemmung des Melatonin Hormons bewirkt werden. Die Verwendung von falschen Farbtemperaturen zur falschen Uhrzeit irritiert den natürlichen Kreislauf der Hormonausschüttung und stört den zirkadianen Rhythmus. Mit diesem einhergehend können zahlreiche Gefahren eintreten. So kann sie zu verminderter Schlafqualität und Schlafstörungen führen. Außerdem gibt es einen engen Zusammenhang mit Depressionen und Krebsrisiko. Des Weiteren haben die Forscher in der jüngsten Zeit positive Ergebnisse bei Behandlung von demenzkranken Patienten entdeckt.

Außerdem wird mithilfe von Licht, genaugenommen der UV-B Strahlung, 90 Prozent des Vitamin D Hormons im menschlichen Körper produziert. Dessen Mangel kann vielseitige Krankheitsbilder mit sich bringen. So unterstützt das essentielle Hormon den Knochenbau des Menschen. Bei einem Mangel kann bei Kindern Rachitis und bei Erwachsenen Osteomalazie, Osteoporose oder Arthrose entstehen. Außerdem wird ein Mangel ebenfalls mit Depressionen und Krebs in Zusammenhang gebracht.

Künstliches Licht ist in der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Dieses kann jedoch bedingt durch die Vorschaltel Elektronik und der Wechselspannung der Steckdose ein Flimmern erzeugen. Obwohl der daraus entstehende stroboskopische Effekt für das Auge nicht sichtbar ist, kann er gesundheitliche Schäden mit sich bringen. So assoziieren Forscher Kopfschmerzen, Leistungs- und Konzentrationsminderung mit einem erhöhten Flimmeranteil. Im Extremfall können sogar epileptische Anfälle ausgelöst werden.

Licht als gesundheitsförderndes Mittel in Form von Lichttherapie kommt nun schon länger in der Medizin zum Einsatz. Doch spätestens seit der jungen Entdeckung der intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen im Jahre 2001 und der damit verbundenen nicht-visuellen Wirkungen von Licht, verändert sich das menschliche Bewusstsein dessen möglichen Folgen gegenüber. So werden insbesondere in Gesundheitsbauten immer häufiger gesamtgesundheitliche Konzepte, wie das *Human Centric Lighting*, angeboten

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	II	
Inhaltsverzeichnis	I	
Abbildungsverzeichnis	III	
Abkürzungsverzeichnis	IV	
Glossar	V	
1.	Einleitung	6
1.1	Hintergrund und Motivation	6
1.2	Problemstellung und Zielsetzung	6
1.3	Methodik	7
1.4	Einschränkung	7
1.5	Überblick	7
2.	Grundlagen - Licht, Mensch und Raum	9
2.1	Licht als bauphysikalische Größe	9
2.2	Funktion des Auges	9
2.3	Neuentdeckung des dritten Photorezeptors	10
2.4	Photometrie und ihre neue Größe	11
2.5	Licht im Raum	14
3.	Auswirkungen von Licht auf die Gesundheit des Menschen in Gesundheitsbauten	15
3.1	Melatonin und Serotonin	15
3.1.1	Melatoninproduktion	15
3.1.2	Melanopische Wirkung	16
3.1.3	Gesundheitliche Auswirkungen in Abhängigkeit von Melatonin	17
3.1.3.1	Melatonin und Schlafstörungen	17
3.1.3.2	Melatonin und Depression	19
3.1.3.3	Melatonin und Krebs	20
3.1.3.4	Melatonin und Demenz	21
3.2	Vitamin D	23
3.2.1	Vitamin D Synthese	24
3.2.2	Vitamin D und Knochenschwund	24
3.2.3	Vitamin D und Depression	27
3.2.4	Vitamin D und Krebs	27

Inhaltsverzeichnis

3.3	Flimmern bei künstlicher Beleuchtung	31
3.3.1	Flimmeranteil	31
3.3.2	Gesundheitliche Einschränkungen durch Lichtflimmern	31
3.3.2.1	Kopf- und Augenlidschmerzen bei Flimmern	31
3.3.2.2	Flimmern und Konzentration	32
3.3.2.3	Epilepsie	33
4.	Gesundheitsfördernder Einsatz von Licht in der Praxis	34
5.	Bewertung	35
6.	Schlussfolgerung und Ausblick	38
7.	Literaturverzeichnis	39
8.	Anhangsverzeichnis	43
Anhang A:	Lebensmittel mit hohem Vitamin D Gehalt	44
Anhang B:	Wirkungsspektrum für melanopische Wirkung von Licht $S_{mel}(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ	45
Anhang C:	Melanopische Wirkungsfaktoren $a_{mel,v}$ und Korrekturfaktoren $k_{mel,trans}$ für altersabhängige Linsentransmission bei unterschiedlichen Lichtquellen	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Absorptionsspektrum von Stäbchen und Zapfen (Telleen, n.d.).....	10
Abbildung 2: Aufbau der Retina (Martin Mißfeldt, n.d.).....	11
Abbildung 3: Darstellung lichttechnischer Messgrößen (Prof. Jürgen Platte, n.d.).....	12
Abbildung 4: Biologischer Wirkungsfaktor für typische Leuchtmittel (Schierz, Bieske & Vandahl, 2011).....	12
Abbildung 5: Wirkungsfunktion für die Melatoninunterdrückung nach Messdaten von Brainard und Thapan und die Wirkungsfunktion des photopischen Sehens (Schierz, Bieske & Vandahl, 2011).....	13
Abbildung 6: Linsentrübung in Abhängigkeit vom Alter (Schierz, Bieske & Vandahl, 2011).....	14
Abbildung 7: Melatoninsynthese aus Tryptophan (Waßmer, Bieg, & Maelicke, n.d.).....	16
Abbildung 8: Kurven der Melatoninkonzentration in Abhängigkeit vom absorbierenden Licht (Kunz, 2014).....	17
Abbildung 9: Melatoninspiegel der beiden Probandengruppen (Chang et al., 2014)	18
Abbildung 10: Verlauf der Körpertemperatur bei Nutzung unterschiedlicher Bildschirme (Heo et al., 2016).....	19
Abbildung 11: Farbanteil der beiden Bildschirme (Heo et al., 2016).....	19
Abbildung 12: Relatives Risiko von Brustkrebserkrankungen von Schichtarbeiterinnen im Krankenhaus (Lie, Roessink & Kjærheim, 2006)	21
Abbildung 13: Gemeinschaftsraum nach lichttechnischen Umbauten (Kirsch, 2016)	23
Abbildung 14: Vitamin D Synthese (Dr. Schweikart, n.d.).....	24
Abbildung 15: Studienergebnisse (Chapuy et al., 1994).....	25
Abbildung 16: Knochenbrüche im Laufe der Beobachtungsphase (Dawson-Hughes et al., 1997)	26
Abbildung 17: Knochenbrüche im Laufe der Beobachtungsphase (Trivedi, Doll, & Khaw, 2003)	26
Abbildung 18: weltweite Mortalitätsrate (Hoffmann, 1915)	28
Abbildung 19: Mortalitätsrate in Abhängigkeit vom Breitengrad modifiziert nach Hoffman (Apperly, 1941).....	28
Abbildung 20: Mortalität und agrikulturelle Beschäftigung (Apperly, 1941)	29
Abbildung 21: Soziale Strahlung und Brustkrebsmortalität (Garland, Garland & Young, 1990)	29
Abbildung 22: Mittlere solare Strahlung in den USA (Garland & Garland, 2006)	30
Abbildung 23: Todesfallrate an Dickdarmkrebs in Abhängigkeit von der mittleren solaren Strahlung (Garland & Garland, 2006).....	30
Abbildung 24: Ergebnisse der Kopfschmerzrate (Wilkins, Smith & Slater, 1989).....	32

Abkürzungsverzeichnis

ADHS	Aufmerksamkeits-Defizit-Hyperaktivitäts-Störung
BioWi	Biologische Wirkung von Licht
CCT	<i>Correlated color temperatur</i>
Cd	Candela
E	Beleuchtungsstärke
EEG	Elektoenzephalografie
Hz	Hertz
ipRGC	Intrinsisch photosensitive retinale Ganglienzellen
Lm	Lumen
LuG	Licht und Gesundheit
Lx	Lux
SAD	<i>Saisonal affected depression</i>
SCN	Suprachiasmatischer Nucleus
WHO	Weltgesundheitsorganisation

Glossar

Absorption	Aufnahme einer Welle oder eines Teilchens durch einen absorbierenden Stoff.
Behaglichkeit	Wohlfühlrahmen des Menschen
Chronotransmitter	Biochemische Stoffe, welche die zeitgebenden Informationen von einer Nervenzelle zur anderen Nervenzelle weiterleiten
Emission	Emission von Licht – herausgeben, abschicken von Licht
Melanopsin	Sehpigment der intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen für die nicht-visuellen Wirkungen
Melatonin	Hormon – verantwortlich für die Entspannungsphase und der damit verbundenen Funktionen
Monochromatisches Licht	Licht einer Wellenlänge
Neurotransmitter	Biochemische Stoffe, welche Reize von einer Nervenzelle zur anderen Nervenzelle weiterleiten
Photon	Lichtteilchen – Bestandteil der elektromagnetischen Strahlung
Photopsin	Sehpigment der Zapfen für das Farbsehen
Rhodopsin	Sehpigment der Stäbchen für das Nachtsehen
Serotonin	Hormon – verantwortlich für die Aktivitätsphase und der damit verbundenen Funktionen
Wellenlänge λ	Die Wellenlänge λ ist die Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenbergen (oder -tälern) und wird in der Einheit Meter angegeben

1. Einleitung

Dieses Kapitel beginnt mit der Einleitung zum Thema „Tages- und Kunstlicht im Kontext von Gesundheitsbauten – eine Literaturanalyse zur Wirkung von Licht auf die menschliche Gesundheit“. Hierbei wird die Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit geschildert. Anschließend werden die ausgewählte Methodik und Einschränkungen aufgezeigt.

1.1 Hintergrund und Motivation

Licht übt in vielen Hinsichten Einfluss auf den menschlichen Organismus aus, wobei die Folgen sehr weitgreifend sind. Die sehr junge Entdeckung der photosensitiven Rezeptoren auf der Netzhaut des Auges zeigt zudem, wie neu die Erkenntnisse in der Medizin über die nicht-visuellen Wirkungen sind (Brainard et al., 2001; Thapan, Arendt, & Skene, 2001). Auf dem jährlichen Symposium BioWi (Biologische Wirkung von Licht) in Berlin referiert Professor Plischke, dass jedes Licht, ob künstlich oder natürlich, biologisch wirksam ist (Plischke, 2016). Durch die Wirkung des Lichtes können somit gesundheitliche Risiken entstehen. Nichts desto trotz kann man die biologische Wirkung von Licht auch als Chance auf positive Gesundheitseffekte nutzen. Wenn Licht negative Wirkungen ausüben kann und somit ungesund für den Menschen ist, gibt es dementsprechend auch gesundes Licht mit seinen positiven Einflüssen.

Nach einer kurzen Recherche stellt man fest, dass die Folgen bei Gebrauch vom falschen Licht zur falschen Zeit gravierend sein können. Gleichzeitig ist Licht in seiner natürlichen, aber auch künstlichen Form in der heutigen Gesellschaft essentiell. So ist es doch anzustreben, den Umgang mit Lichtsystemen zu perfektionieren, die gesundheitlichen Risiken zu minimieren und gleichzeitig die menschliche Gesundheit zu unterstützen oder diese gar zu fördern.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Der Einfluss von Licht auf die menschliche Gesundheit ist seit langer Zeit bekannt. Doch die sehr junge Entdeckung der dritten Art der Photorezeptoren im Auge zeigt, dass der Wissensstand in diesem Fachbereich die Sättigung noch lange nicht erreicht hat. Seit der Entdeckung der nicht-visuellen Wirkung von Licht im Jahre 2001 hat der medizinische Markt im Hinblick auf lichtunterstützende Gesundheitsförderung an Dynamik gewonnen. Positive Ergebnisse bei Behandlungen neuer Krankheitsbilder werden erkannt. Dazu verändert sich das Bewusstsein der Menschen im Hinblick auf die lichttechnische Nutzung.

So ist das Ziel dieser Arbeit, den Leser mit den Wirkungen von Licht vertraut zu machen. Außerdem sollen zusammenfassend neben möglichen Risiken, gesundheitsfördernde Chancen dargestellt werden.

1.3 Methodik

Die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf einer reinen Literaturanalyse. Dazu wurde für die lichttechnischen Definitionen Fachliteratur verwendet. Studien wurden mithilfe ausgesuchter Schlagwörter in Datenbanken recherchiert. Dabei kamen *Scopus*, *PubMed* und vor allem *ScienceDirect* zum Einsatz.

Anfangs wurde allgemeingültig recherchiert, um herauszufinden, wie weitgreifend das Licht überhaupt auf den Menschen wirkt. Aufgrund vorwiegend englisch sprachiger Literatur kamen folgende Suchbegriffe zum Einsatz: „*light*“, „*health*“, „*effect*“, „*human*“. Auf diese Weise konnte man allgemeine Auswirkungen erfassen. Weiterhin wurde die Suche spezifiziert. So wurden den soeben erwähnten Basis-Suchbegriffen konkretisierte Krankheitsfelder und Zielgruppen hinzugefügt. Zusätzliche Schlagwörter waren folgende: „*patient*“, „*hospital*“, „*care houses*“, „*cancer*“, „*depression*“, „*melatonin*“ und ähnliche. Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, speziell auf Gesundheitsbauten einzugehen: Krankenhäuser und Kliniken, gesundheitsfördernde Einrichtungen und Pflegeheime. Dabei entstanden zwei zu betrachtende Zielgruppen: Patienten und Pflegepersonal.

1.4 Einschränkung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit konnten nicht alle gesundheitlichen Einflüsse des Lichtes auf den Menschen bearbeitet werden. So wurde der Einfluss von Vitamin D auf Autoimmunerkrankungen wie Multiple Sklerose oder Diabetes nicht bearbeitet, da die betroffene Gruppe vergleichsweise klein ist. Der Einfluss auf das Herz-Kreislauf-System durch einen Vitamin D Mangel wurde aufgrund eines erheblich großen Bearbeitungsrahmens ausgeschlossen. Zudem wurde die Intoxikation durch einen Vitamin D Überschuss aufgrund des raren Vorkommens ebenfalls nicht erörtert.

Die Wirkung von Melatonin auf den Herz-Kreislauf wurde ebenfalls aufgrund der Größe der Thematik nicht bearbeitet.

Im Hinblick auf die Studien war es in dieser Arbeit nicht immer möglich auf die genannten Zielgruppen und Gesundheitsbauten einzugehen. So herrscht ein Literaturmangel im Falle der Flimmerwirkung auf die menschliche Gesundheit hinsichtlich der betroffenen Gruppen. Dennoch können Krankheitsbilder anhand von anderen Studien abgeleitet werden.

1.5 Überblick

Die Arbeit ist aufgeteilt in sechs Kapitel.

Beginnend mit der Einleitung als erstes Kapitel, folgt im zweiten Kapitel die Vorbereitung des Lesers auf die bevorstehende Arbeit. Hierzu werden zunächst alle wichtigen bauphysikalischen Größen und medizinische Begriffe erläutert. Dazu wird der Zusammenhang zwischen diesen Größen aufgezeigt. Zusätzlich wird die Interaktion des Menschen mit Licht im Raum dargestellt.

Einleitung

Im dritten Kapitel werden die Auswirkungen von Licht auf den menschlichen Organismus anhand von wissenschaftlichen Studien erörtert und belegt. Dabei wird - falls möglich - auf die bereits erwähnten Zielgruppen eingegangen.

Im vierten Kapitel wird übergreifend der Gebrauch von gesundheitsförderndem Licht aus der Praxis beschrieben.

In den letzten beiden Kapiteln werden die gesundheitlichen Auswirkungen nochmals kurz zusammengefasst und bewertet, um anschließend einen Ausblick für die Zukunft auszusprechen.

2. Grundlagen - Licht, Mensch und Raum

2.1 Licht als bauphysikalische Größe

Ohne Licht wäre ein Leben auf der Welt nicht möglich. Die Sonne spendet der Erde wertvolle Energie, durch welche das Leben überhaupt hätte entstehen können. Genauer betrachtet ist Licht elektromagnetische Strahlung, welche von der Sonne ihren Weg auf die Welt findet. In Form einzelner Photonen ist sie für das menschliche Auge nicht sichtbar. Erst wenn die Strahlung auf Oberflächen auftrifft und in unser Auge reflektiert wird, wird dort eine Sehempfindung ausgelöst. Die visuellen Sinneszellen reagieren jedoch nur auf einen beschränkten Bereich. Ab circa 380 Nanometer (nm) ist das Auge erst in der Lage die Reflektion der kurzwelligen Strahlung als violettes Licht zu sehen. Wellenlängen kleiner als 380 nm werden vom optischen Apparat absorbiert, da diese als energiereiche Photonen zellschädigend für das Auge sind. Das Maximum des sichtbaren Lichts liegt bei circa 780 nm im roten langwelligen Farbbereich. Die Wellenlängen darüberhinaus sind zu energiearm, um Sehpigmente gut aktivieren zu können (Gall, 2007). Nun kann der Mensch Farben, Formen und Strukturen erkennen, welche auf der zentimeterkleinen Netzhaut projiziert werden. So nimmt der Mensch Licht als die Emission von unterschiedlichen Lichtquellen unserer Umgebung und anschließende Absorption von einzelnen Photonen im Auge wahr (Smith, King & Wilkins, 2007).

2.2 Funktion des Auges

Über das Auge erfährt unser Körper die meisten sensorischen Informationen. Durch den Lichteinfall auf die Retina werden Lichtreize in elektrische Signale umgewandelt. Dies kann mithilfe der in den Photorezeptoren enthaltenen Sehpigmente ausgelöst werden. Aufgrund unterschiedlicher Sinneszellen besitzt das Auge unterschiedliche Empfindlichkeitsmaxima. Zum einen sind Stäbchen mit einer Anzahl von 120 Millionen pro Auge für das skotopische Sehen, also für das Nachtsehen, verantwortlich. Mit ihrem Sehpigment Rhodopsin können diese keine Farben unterscheiden, sondern viel mehr die Helligkeitsempfindung regulieren. Bei nicht ausreichender Beleuchtung sind diese aktiv und der Mensch erkennt lediglich Formen in ihren Grautönen. Deren Empfindlichkeitsmaximum liegt bei 498 nm. Erst ab einer bestimmten Helligkeit wird das Sehpigment Photopsin in den 6 Millionen Zapfen aktiv, welche für das photopische Sehen verantwortlich sind. Ihr Empfindlichkeitsmaximum für das Farbsehen liegt bei 555 nm Wellenlänge. Der Mensch kann Farben unterscheiden, weil im Auge innerhalb der Zapfen unterschiedliche Photopsinarten existieren. Je nach absorbierender Wellenlängen werden die Blau-, Grün- und Rotzapfen gewichtet aktiviert (Behrends et al., 2010). Der Young-Helmholtz-Theorie oder auch der Dreifarbentheorie nach lässt sich jede Farbe aus monochromatischem rotem, blauem und grünem Licht erzeugen. Das menschliche Sehsystem scheint der Vorreiter dieser Theorie zu sein. Die Sehpigmente der Zapfen weisen ebenfalls unterschiedliche Absorptionsspektren mit unterschiedlichen Absorptionsmaxima auf, sodass am Ende jede Farbgestaltung möglich ist (Behrends et al., 2010). Die Abbildung 1 zeigt die Absorptionsspektren für das skotopische Sehen der Stäbchen (engl. Rods) und der drei Photopsinarten der Zapfen (engl. Cones) für das photopische Sehen.

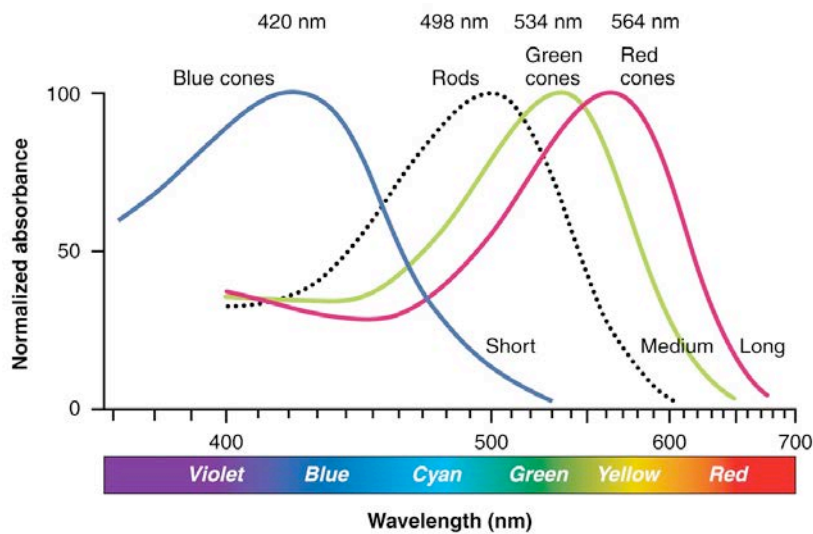


Abbildung 1: Absorptionsspektrum von Stäbchen und Zapfen (Telleen, n.d.)

2.3 Neuentdeckung des dritten Photorezeptors

Bis vor nicht all zu langer Zeit kannte man das Auge als ein ausschließlich visuelles Organ. Erst im Jahre 2001 wurde der Befund der lichtempfindlichen melanopsinhaltigen Rezeptoren beim Menschen bestätigt. Zuvor experimentierte man mit Mäusen und Fröschen, bei welchen man ebenfalls das Sehpigment auf der Netzhaut fand (Brainard et al., 2001; Thapan et al., 2001). Die sogenannten intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC) besitzen ein weiteres Sehpigment, das Melanopsin. Dieses ist besonders empfindlich auf Wellenlängen im blauen Bereich, sodass es ihr Absorptionsmaximum bei circa 490 nm aufweist (Phototransduction, 2008). Sie interagieren zwar auf eine komplexe Weise mit den Zapfen und Stäbchen, sind jedoch vor allem für die Verarbeitung der nicht visuellen Wirkungen im Körper zuständig (Lucas et al., 2016). Die Abbildung 2 zeigt den retinalen Aufbau des Auges mit den Zapfen, Stäbchen und ipRGCs. Melanopsin reagiert auf die Umgebungshelligkeit und leitet diese Informationen weiter an den Nucleus Suprachiasmaticus (SCN), ein Nerv im Gehirn, welches für das Zeitgefühl verantwortlich ist. Abgeleitet von den absorbierten Wellenlängen koordiniert dieser die Zeit und mit ihr verbunden viele komplexe Hormonausschüttungen und Körperfunktionen. Dabei spielt der Hormonhaushalt des Melatonin und Serotonin eine wichtige Rolle in der menschlichen Gesundheit.

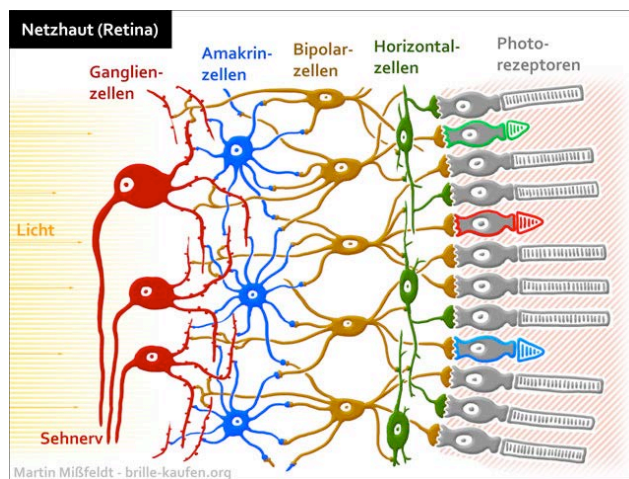


Abbildung 2: Aufbau der Retina (Martin Mißfeldt, n.d.)

2.4 Photometrie und ihre neue Größe

Licht ist messbar. Mithilfe der Photometrie kann der Mensch Licht sowohl quantitativ, als auch qualitativ festhalten. Man benutzt außerdem photometrische Größen, um Konsens bei lichttechnischen Planungen in bestimmten Bauarten zu finden. Dabei ist Lichtstärke der physikalische Grundbaustein der Messtechnik. Sie ist die einzige Grundeinheit in der Photometrie, von welcher alle anderen abgeleitet werden. Mit der Einheit Candela (cd) beschreibt sie die Strahlungsleistung einer Lichtquelle pro Raumwinkel (siehe Abbildung 3). Der Lichtstrom mit der Einheit Lumen (lm) hingegen gibt an, wie viel Licht von einer Lichtquelle in alle Richtungen, also insgesamt von einem Leuchtmittel, ausgeht. In der photometrischen Messtechnik ist die Beleuchtungsstärke E mit der Einheit Lux (lx) die wohl bedeutendste Messeinheit. Sie gibt die Menge des Lichtstroms pro Fläche an. So beschreibt sie die von einer Fläche effektiv absorbierte Menge an Licht. In der Lichttechnik arbeitet man mit dieser Größe, um bei planungstechnischen Vorgängen Einheit zu gewähren. Sie ermöglicht es, Beleuchtungsklassen zu definieren, um so beispielsweise nötige Mindestwerte an Arbeitsplätzen oder in Gesundheitsbauten zu garantieren. Man setzt bestimmte Mindestwerte voraus, um den Arbeitern höchste Arbeitssicherheit zu garantieren. Dabei hat man bis vor kurzem nur auf ausreichende Beleuchtungsstärke E geachtet.

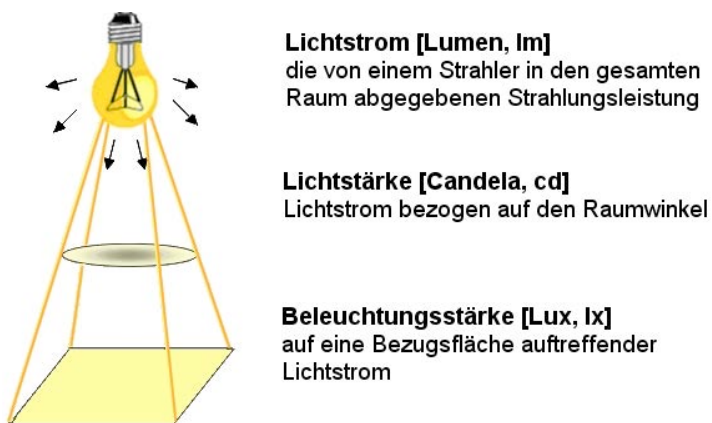


Abbildung 3: Darstellung lichttechnischer Messgrößen (Prof. Jürgen Platte, n.d.)

Nun kommt aber eine neue Messgröße dazu. Die melanopische Wirkung durch Licht gewinnt immer mehr an Bedeutung. Sie wird mit der Maßzahl a_{msv} ausgedrückt. Diese drückt die biologische Wirksamkeit des gegebenen Lichtes aus. Dabei kommt es vor allem auf das vorliegende Farbspektrum des Leuchtmittels an. Dieses wird näherungsweise mit der Farbtemperatur in Kelvin angegeben. Dabei spiegelt eine niedrige Kelvinzahl ein Licht mit hohem Rotanteil wieder. Hingegen hohe Farbtemperaturen sprechen für ein blaulastiges Licht. Bei Temperaturstrahlern, wie der Glühlampe oder der Sonne, verändert sich die Farbtemperatur mit der Beleuchtungsstärke. Hingegen bei LEDs oder Energiesparlampen ist es nicht zwingend der Fall. Bei gleichbleibender Farbtemperatur kann die Beleuchtungsstärke geändert werden. Aus diesem Grund ist darauf zu achten, dass das Verhältnis zwischen Lichtfarbe und Beleuchtungsstärke im Rahmen der menschlichen Behaglichkeit liegt (Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, 2016). Dafür wird die ähnlichste Farbtemperatur CCT (=correlated color temperature) verwendet (Schierz, Bieske & Vandahl, 2011). Die folgende Abbildung 4 zeigt typische Lichtfarben mit ihren ähnlichsten Farbtemperatur CCT. Zusätzlich dazu sind die Werte der melanopischen Wirkung in Abhängigkeit von der Farbtemperatur gegeben.

CCT	3000 K	4000 K	6500 K	8000 K
Lichtfarbe	warmweiß	neutralweiß	tageslichtweiß	skywhite
a_{msv}	0,34	0,52	0,9	0,98

Abbildung 4: Biologischer Wirkungsfaktor für typische Leuchtmittel (Schierz, Bieske & Vandahl, 2011)

Die DIN SPEC 67600 und die DIN SPEC 5031-100 drücken die dazu gewonnenen Erkenntnisse in mathematischen Formeln aus, um den Gesundheitsfaktor bei der Lichtplanung messbar zu machen. Der a_{msv} Wert stellt das Verhältnis der spektralen Verteilung des biologisch wirksamen Lichts $S_{mel}(\lambda)$ zu der Spektralverteilung des photopischen Sehens $V(\lambda)$. Er beschreibt wie stark der Einfluss des Lichts sich auf die Unterdrückung des Melatonins auswirkt. Je höher der Faktor, desto höher die Melatoninsuppression im

Körper, wobei der Wert 1,0 das Maximum kennzeichnet (Deutsches Institut für Normung e.V., 2013; 2015). Die Abbildung 5 zeigt die interpolierte Wirkungsfunktion $S_{msl}(\lambda)$ nach den Daten von Brainard und Thapan (Brainard et al., 2001; Thapan et al., 2001). Zum Vergleich wird das Absorptionsspektrum des photopischen Sehens $V(\lambda)$ dargestellt. Außerdem kann man im Anhang B den maximalen Wirkungsgrad von $a_{msv} = 1,0$ bei 490 nm Wellenlänge herauslesen, was dem Absorptionsmaximum der melatonischen Wirkungsfunktion $S_{msl}(\lambda)$ entspricht.

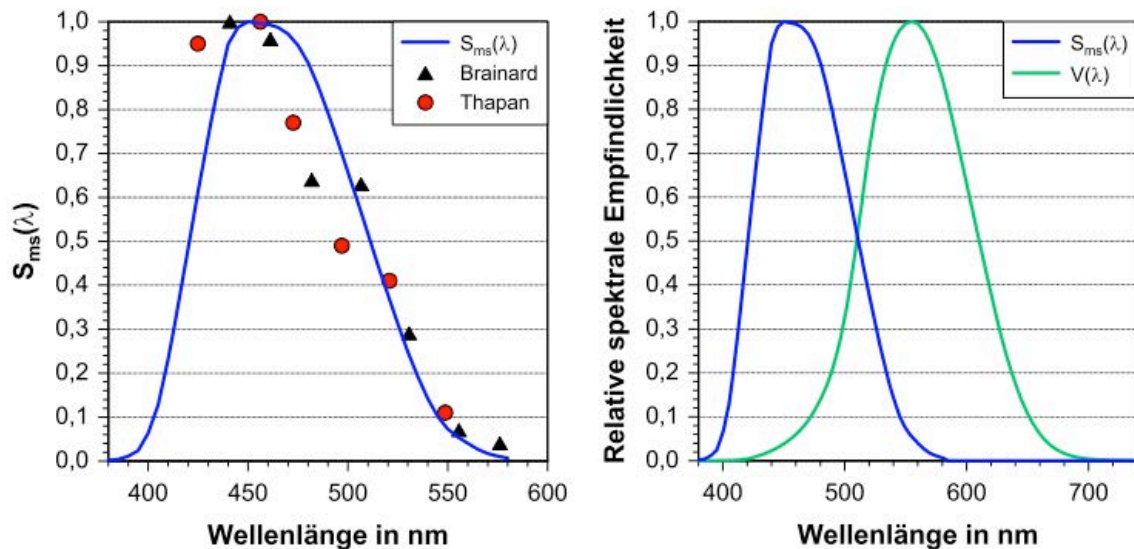


Abbildung 5: Wirkungsfunktion für die Melatoninunterdrückung nach Messdaten von Brainard und Thapan und die Wirkungsfunktion des photopischen Sehens (Schierz, Bieske & Vandahl, 2011)

Bei einem gegebenen Absorptionsspektrum eines Leuchtmittels kann man mit der folgenden Formel den melanopischen Wirkungsgrad a_{msv} berechnen:

$$a_{msv} = \frac{\int X_{e\lambda}(\lambda) \cdot S_{ms}(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}$$

Zudem muss man beachten, dass die melatoninunterdrückende Wirkung altersabhängig ist. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, findet mit dem Alter eine Vergilbung der Linse im Auge statt. Dadurch wird ein Teil des blauen Lichtes wie durch eine gelbe Schutzbrille absorbiert und erreicht nicht die Retina. Zusätzlich erfährt der Mensch im Laufe des Lebens eine Verkleinerung der Pupille. Der daraus resultierende Transmissionsgrad der Linse ist in der Norm ebenfalls berücksichtigt. Laut der DIN SPEC 5031-100 orientiert man sich an der Linse einer 32-jährigen Person. Wie im Anhang C zu sehen ist, ist der $k_{mel,trans}$ für eine 32-jährige Person $k_{mel,trans}(32) = 1,0$. Aufgrund des mit dem Alter abnehmenden Transmissionsgrades benötigt der Mensch im höheren Alter höhere Beleuchtungsstärken, um den gleichen melanopischen Effekt

zu erzeugen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2015). Dies muss bei lichtplanerischen Vorgängen berücksichtigt werden.

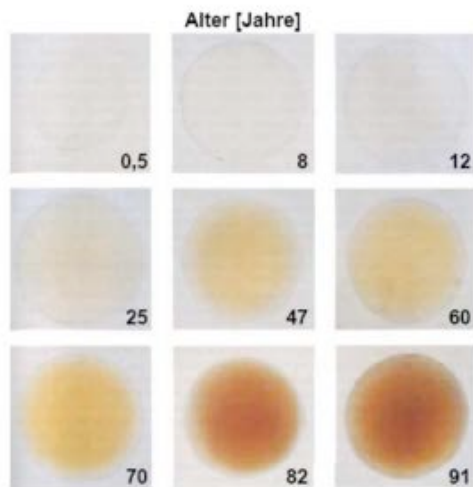


Abbildung 6: Linsentrübung in Abhängigkeit vom Alter (Schierz, Bieske & Vandahl, 2011)

2.5 Licht im Raum

Aufgrund der Tatsache, dass das Licht ohne reflektierte Flächen nicht sichtbar ist, ist es von dem Raum abhängig. Die Bedingungen in einem Raum machen es überhaupt erst möglich sowohl visuelle als auch nicht visuelle Wirkungen auf den Menschen zu erzeugen. Dabei ist Raum ein breit gefächertes Begriff. Dieser kann ökologischer Natur im Sinne eines Habitats interpretiert werden. Architektonisch teilt man ihn in den Innen- und Außenraum. Aus soziologischer Sicht kann es der Wohnraum oder die Arbeitsstätte eines Menschen sein. Man kann ihn sogar mathematisch interpretieren in Form einer bestimmten Dimension (Bosse, 2016). Für den Raum gibt es keinen definierten Begriff. Im Rahmen dieser Arbeit muss man deshalb ein eigenes Bild von seinem Raum machen. Jenen Raum, der von Licht und zugleich von Mensch bestimmt ist. Seit der Industrialisierung hat sich die Menschheit größtenteils zu einer Innenraumgesellschaft entwickelt. Circa 90 Prozent der Zeit verbringen Menschen durchschnittlich in verschlossenen Räumlichkeiten (Hammer, 2013) - zuhause, in der Arbeit, in öffentlichen Einrichtungen. Hier spielt die künstliche Beleuchtung eine besondere Rolle, wobei der Eintrag des natürlichen Lichtes durch die Fassade des Gebäudes nicht unterschätzt werden darf.

3. Auswirkungen von Licht auf die Gesundheit des Menschen in Gesundheitsbauten

Im folgendem Abschnitt werden die gesundheitlichen Auswirkungen von Licht diskutiert. Dabei stehen drei Themen im Vordergrund: Haushalt des Melatonin- und Serotoninhormons und vor allem die mit ihm verbundene Störung des zirkadianen Rhythmus aufgrund falscher Lichtexposition zur falschen Uhrzeit. Zudem werden die gesundheitlichen Konsequenzen aufgrund eines Vitamin D Mangels erläutert. Zuletzt werden die möglichen Folgen von erhöhten Flimmeranteilen im künstlichen Licht erörtert.

3.1 Melatonin und Serotonin

Im Laufe der Millionen jahrelangen Evolution des Menschen hat sich der Organismus auf den Rhythmus der Sonne eingestellt. Mit dem Aufgang der Sonne erwacht der Mensch und bereitet sich in einem leistungsfähigen Zustand für den Alltag vor. Mit dem Sonnenuntergang kommt der Körper zur Ruhe und schließt den Tag mit der Schlafphase ab. Dieser alltägliche Ablauf spiegelt sich in dem menschlichen Hormonhaushalt wieder. Serotonin und sein Gegenspieler Melatonin regulieren stets die Aktivitätsphasen und eine Vielzahl damit verbundener Körperfunktionen. So hängen mit der Schlafroutine verbundene Müdigkeit und Aufmerksamkeit, Schmerz- und Stresswahrnehmung, Wohlbefinden und die Körpertemperatur vom Hormonhaushalt ab (Cheers, 2001; Völker, 2016).

3.1.1 Melatoninproduktion

N-Acetyl-5-methoxy-tryptamin ist die chemische Bezeichnung für das Hormon, welches als Melatonin bekannt ist. Oft wird es auch als Schlafhormon bezeichnet, da es maßgeblich die Entspannungsphase des Menschen reguliert. Aus einer hohen Melatoninausschüttung resultiert das Herunterfahren der Körperfunktionen, wie beispielsweise die Senkung des Energieverbrauchs des Menschen (Nagel, 2014). So steigt die Melatoninkonzentration im Blut ab Nachmittag zum Abend an mit einem Maximum zwischen zwei und drei Uhr nachts. Das Minimum findet sich in unserem Körper um die Mittagszeit, wenn der menschliche Körper am aktivsten ist. Die aktive Phase wird vor allem von dem Gegenspieler Serotonin gesteuert. Dieses zählt zu den wichtigsten Neurotransmittern im zentralen Nervensystem und wirkt als Gewebshormon auf vielfältige körperliche Prozesse. Es ist das Hormon, das den Menschen erweckt und aktiviert (Raue, 2011). Der Grundbaustein für die Produktion ist L-Tryptophan, welches vor allem in proteinhaltigen Nahrungsmitteln zu finden ist. Zunächst wird es mithilfe von Enzymen zu 5-Hydroxy-Tryptophan umgewandelt. Anschließend kann Serotonin aus diesem in der Zirbeldrüse synthetisiert werden (Zentrum der Gesundheit, 2017b). Am Mittag findet die höchste Serotoninproduktion statt, denn der strahlend blaue Himmel unterdrückt die Melatoninproduktion. Das blaulastige Licht, welches vom Auge absorbiert wird, signalisiert dem SCN, dass es Zeit ist für den Menschen aktiv zu sein. Die Melatoninproduktion in der Zirbeldrüse wird gehemmt. Zum Abend hin verschiebt sich das Farbspektrum des natürlichen Lichts in den roten Bereich. Der Organismus

nimmt wahr, dass der Tag sich dem Ende neigt. Aufgrund des geringen Blauanteils des absorbierenden Farbspektrums kann die Produktion von Melatonin nicht weiter unterdrückt werden. Die Zirbeldrüse produziert nun vermehrt Melatonin. Dabei entsteht das Melatonin aus Serotonin, wie in der Abbildung 7 dargestellt ist. Das bedeutet, dass eine ausreichende Produktion an Serotonin tagsüber für einen ausgewogenen Melatoninspiegel als voraussetzend gilt.

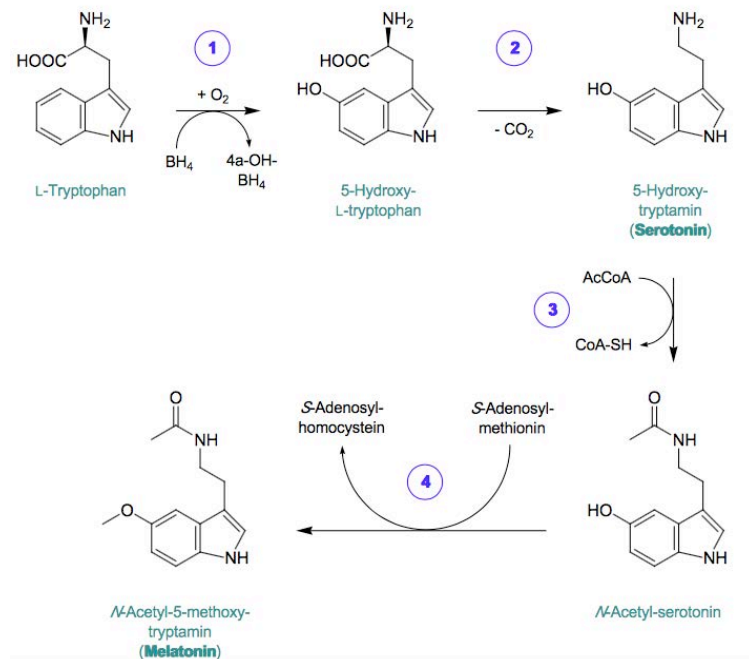


Abbildung 7: Melatonsynthese aus Tryptophan (Waßmer, Bieg, & Maelicke, n.d.)

3.1.2 Melanopische Wirkung

Mit der Neuentdeckung der dritten Art der Photorezeptoren auf der Netzhaut im Jahre 2001 (Brainard et al., 2001; Thapan et al., 2001) hat man festgestellt, dass das Auge nicht nur für die visuelle Koordination zuständig ist, sondern ebenfalls nicht-visuelle Funktionen übernimmt. Sie funktionieren als Chronotransmitter, die die innere Uhr steuern. Mit einem Absorptionsmaximum bei 490 nm liegen sie im blauen Bereich und sind somit besonders empfindlich auf blaues Licht. Mit ihrem Sehpigment Melanopsin senden sie Informationen weiter an den SCN, um über die Umweltbedingungen zu berichten (Lewy et al., 1980). Somit hängt die Melatoninproduktion vom absorbierenden Licht ab. In einem Versuch mit verschiedenen Farbtemperaturen haben Wissenschaftler die Melatoninspiegel der Probanden gemessen und einen eindeutigen Anstieg der Melatoninkonzentrationen im Blut mit sinkender Farbtemperatur feststellen können. Die Abbildung 8 beschreibt die dazu gewonnenen Ergebnisse (Kunz, 2014). Das bedeutet, dass das Licht einen direkten Einfluss auf den menschlichen Hormonhaushalt hat. Dieser, in Form eines komplementären Zusammenspiels aus Melatonin und Serotonin, spiegelt sich in dem zirkadianen Rhythmus

wieder. Wie der Name schon sagt, beträgt er eine ungefähre Länge von einem Tag. Ohne jegliche Umwelteinflüsse hat er eine Dauer zwischen 24 und 25 Stunden. Die Rhythmik würde aber nur in der Isolation auf diese Weise ablaufen. Im Alltag wird sie jedoch von externen Taktgebern beeinflusst. Dabei ist der wichtigste Einfluss das Licht, welches durch die melanopsinhaltenen retinalen Ganglienzellen die endogene Information der Umwelt an den SCN meldet. Dieser leitet die Information an die Zirbeldrüse weiter, welche beim Einfall von blaulastigem Licht die Melatoninsekretion bewirkt. Ein Wechselspiel des Serotonin- und Melatonin hormons reguliert größtenteils unser Wohlbefinden in Bezug auf die Phasen der Aktivität und der Entspannung (Silbernagl, 2007).

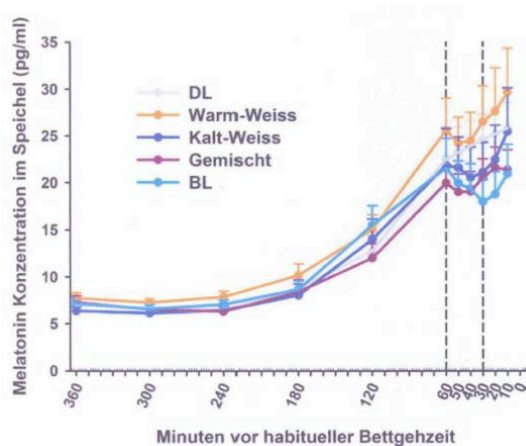


Abbildung 8: Kurven der Melatoninkonzentration in Abhängigkeit vom absorbierenden Licht (Kunz, 2014)

3.1.3 Gesundheitliche Auswirkungen in Abhängigkeit von Melatonin

3.1.3.1 Melatonin und Schlafstörungen

Ein unstabiler Schlaf-Wach-Rhythmus kann sich negativ auf den menschlichen Schlaf auswirken. Dieser kann infolge von Lichtexposition zu ungewöhnlichen Zeiten verschoben werden. Spätestens seit der Erfindung der elektrischen Glühbirne durch Thomas Alva Edison im Jahre 1879 (Hargadon, 2001) hat es der Mensch geschafft, den Tag zu verlängern oder zu mindestens diesen verschieben zu können. Die extremste zeitliche Verschiebung entsteht durch Nacht- und Schichtarbeiten. Mit einem Anteil von 17 Prozent gehört Schichtarbeit zu einem volkswirtschaftlich wichtigem Instrument (Lennings, 2012). Hierbei ist eine stetig steigende Tendenz zu erkennen. Aber auch schon eine kurze Lichtexposition von falsch ausgewählten Leuchtmitteln kurz vor dem Schlaf kann den zirkadianen Rhythmus verschieben und mit ihm die Schlafqualität vermindern. Eine US amerikanische Studie berichtet darüber, dass circa 90 Prozent der Amerikaner mindestens ein paar Mal wöchentlich für mindestens eine Stunde am Abend elektronischen Geräten ausgesetzt sind.

Das klinische Forschungsinstitut vom „Brigham and Women’s Hospital“ hat anhand einer Studie eine mangelhafte Schlafqualität mit dem Aussetzen von blaulastigem Licht kurz vor der Schlafphase assoziiert.

Zwölf gesunde Teilnehmer wurden über 14 Tage getestet. Dabei haben die Probanden über vier Stunden lang vor der Schlafphase einerseits ein Buch bei Licht mit der Farbtemperatur von 4100 K und einem Absorptionsmaximum von 612 nm gelesen. Die andere Testgruppe nutzte einen eReader, welcher ein Absorptionsmaximum von 452 nm aufwies, welches einem Licht mit hohem Blauanteil gleicht. Diese Teilnehmer wiesen eine deutliche Melatoninunterdrückung im Blut auf nach dem Benutzen des eReaders, im Vergleich zu den Lesern des Buches (siehe Abbildung 9). Entsprechend hatten sie eine längere Einschlafphase von circa zehn Minuten und Probandenaussage nach am nächsten Morgen länger gebraucht, um sich fit und munter zu fühlen. Dies kann ebenfalls infolge einer verschlechterten Schlafqualität interpretiert werden, die mit einer Elektroenzephalografie (EEG) gemessen wurde. Mit dieser Untersuchungsmethode überprüft man die Hirnaktivität des Patienten während des Schlafes. Dabei hat man auf die REM Phasen des Schlafenden geachtet. Zusätzlich hat man bei den bücherlesenden Probanden deutlich weniger Zucken mit den Augenlidern in der REM Phase festgestellt, welche als besonders wichtig für die Ruhephase während des Schlafes gilt (Chang et al., 2014).

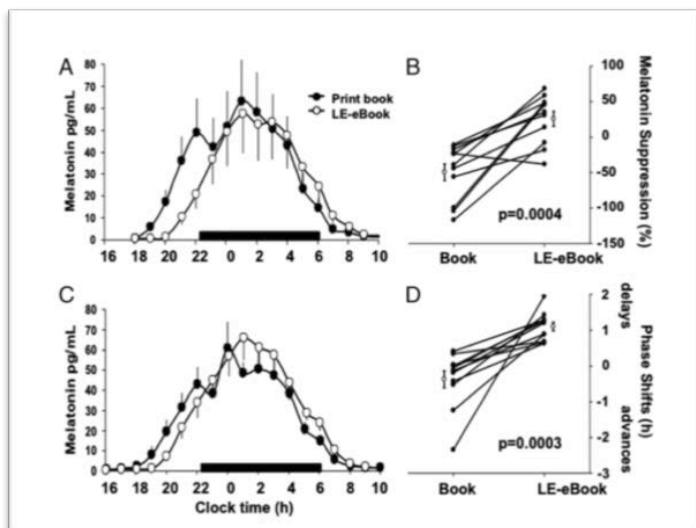


Abbildung 9: Melatoninspiegel der beiden Probandengruppen (Chang et al., 2014)

Eine andere aktuelle Studie zeigt ebenfalls negative Wirkung bei Benutzung von blaulastigen Bildschirmen vor dem Schlaf. Die Ergebnisse zeigen deutlich wie der hormonelle Haushalt beim Aussetzen von blaulastigem Licht beeinflusst wird. Die Probanden haben 150 Minuten lang vor dem Schlaf auf unterschiedlichen Bildschirmen Video Spiele gespielt (siehe Abbildung 11). Nach dem Spielen auf dem blaulastigen Bildschirm hat man einen um knapp 15 Minuten verzögerten DLMO50% Wert erhalten. Dieser Wert beschreibt die Zeit, in der der Melatoninspiegel um 50 Prozent gewachsen ist. Zusätzlich wurde, wie in Abbildung 10 aufgezeigt, ein Temperaturanstieg um $0,1^{\circ}\text{C}$ festgestellt. Dies verdeutlicht ebenfalls die Aktivierung der Körperfunktionen vor dem Schlaf, wodurch der zirkadiane Rhythmus verschoben wird (Heo et al., 2016).

c) Body Temperature

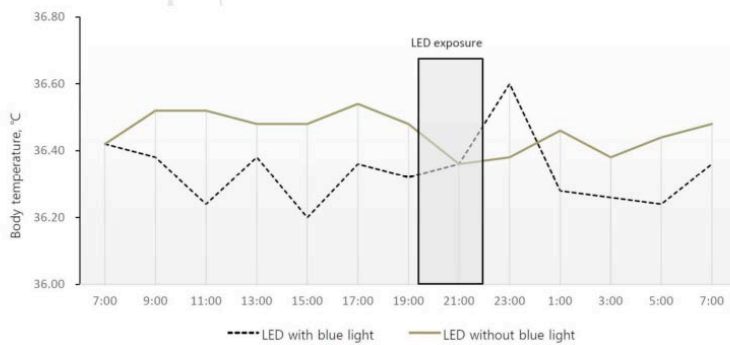


Abbildung 10: Verlauf der Körpertemperatur bei Nutzung unterschiedlicher Bildschirme (Heo et al., 2016)

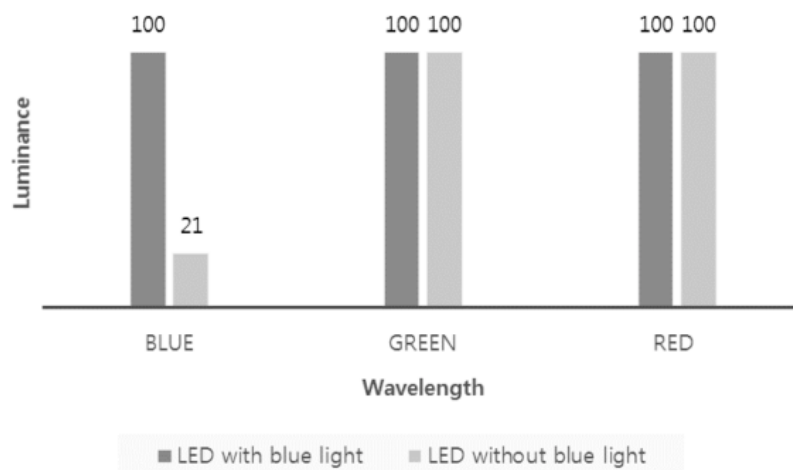


Abbildung 11: Farbanteil der beiden Bildschirme (Heo et al., 2016)

3.1.3.2 Melatonin und Depression

Winterblues, Winterdepression oder auch saisonal abhängige Depression (SAD, engl.: seasonal affected depression). Diese Art der Depression wird durch Mangel an Sonnenlicht insbesondere in den Herbst- und Wintertagen hervorgerufen. Die Betroffenen fühlen sich dabei niedergeschlagen und antriebslos (Cheers, 2001). Im Gegensatz zu der herkömmlichen Depression, welche oft mit Schlaflosigkeit verbunden ist, sind die Betroffenen schnell müde und haben morgens Schwierigkeiten das Bett zu verlassen. Oft überfällt sie Heißhunger, weshalb SAD Patienten in den Herbst- und Wintermonaten oft an Gewicht zunehmen, da sie ihre Lust nach Kohlenhydraten stillen wollen.

Seit den 1980er Jahren haben jedoch Ärzte und Psychotherapeuten ein Instrument, der zeitbeschränkten Erkrankung erfolgreich entgegen zu wirken: Therapie mit Licht (Cheers, 2001; Desan et al., 2007). Um dem jahreszeitbedingten Entzug von Licht entgegenzuwirken, entwickelte man diese Methode der Therapie. Mithilfe intensiver Lichtexposition wird versucht den circadianen Rhythmus des Patienten zu stabilisieren und die Serotoninproduktion anzukurbeln. Dies haben Wissenschaftler schon früh erkannt. So war Rosenthal mit seinen Kollegen bereits im Jahr 1984 davon überzeugt, dass sich verminderte Lichtexposition auf die Stimmung auswirken kann. Im Extremfall kann diese sogar zu einer SAD führen (Rosenthal et al., 1984). Dabei kann man bei der Behandlung mit der Beleuchtungsstärke und der Bestrahlungszeit variieren. Die Wissenschaftler Kripke, Craig und Janowsky untersuchten im Jahre 1983 diese Wirkung mit unterschiedlichen Farbspektren. Sie sind dabei zu den Ergebnissen gekommen, dass hell weißes Licht mit höherer Farbtemperatur effektiver in der Behandlung, als gedimmt rötliches Licht ist (Craig, 1983).

In aktuellen Studien konnten andere Wissenschaftler sogar bei der klassischen Depression positive Ergebnisse erzielen (Eniola et al., 2016). In einer davon war eine Lichttherapie sogar wirkungsvoller als medikamentöse Behandlung. Dabei haben Probanden sich unterschiedlichen Therapien unterzogen: Lichttherapie, Antidepressiva, Kombination aus beiden und Placebo, wobei die erfolgreichste Wirkung die Kombinationsgruppe erfuhr. Anzumerken ist, dass die Gruppe der Lichttherapie bessere Ergebnisse erzielte, als die mit Antidepressiva (Lam et al., 2016).

3.1.3.3 Melatonin und Krebs

Etwa jeder zweite erkrankt im Laufe seines Lebens einmal an Krebs, wobei für jeden vierten die Erkrankung tödlich endet. Das zeigen aktuelle Statistiken des Robert-Koch Instituts. Dabei sind Männer mit 51 Prozent etwas mehr betroffen als Frauen, wobei Prostata- und Lungenkrebs die häufigsten Fälle aufweisen. Mit einem geringeren Risiko von 43 Prozent sind Frauen betroffen, wobei Brustkrebs zu der häufigsten Krebsart zählt. Hierbei weisen die Forscher auf eine steigende Tendenz hin (Parkin, Bray, & Devesa, 2001). Die Krebsrate hat nicht nur aufgrund der demographischen Verteilung zugenommen, sondern hängt von vielen einzelnen Faktoren in der Gesellschaft ab. Ungesunde Ernährung, Übergewicht, natürliche und anthropogene Schadstoffe im Boden und der Luft (Robert-Koch Institut, 2016). So fügt auch der durch Licht gestörte hormonelle Haushalt ihren Teil hinzu. Laut einer Gruppe US-amerikanischer Krebsforscher wachsen Krebszellen um bis zu 2,6-mal so schnell allein bei gedämpftem Licht gegenüber kompletter Dunkelheit. Mithilfe eines Versuches an Ratten haben sie die Aktivität und Wachstum der Krebszellen getestet. Sie gehen davon aus, dass der Grund hierfür die unterschiedlichen Melatoninkonzentrationen aufgrund verschiedener Lichtverhältnisse sind (Dauchy et al., 2014). So hat sogar die Weltgesundheitsorganisation (WHO) bereits 2007 manche Arten von Nacht- und Schichtarbeit als krebbsgefährdend eingestuft, da diese besonders zur zirkadianen Verschiebung und Störung des Hormonhaushaltes führen (International Agency for Research on Cancer, 2007).

Eine breite Reihe an Studien mit Schichtarbeiterinnen und Schichtarbeitern unterstützt diese Vermutung. In einer Studie, auch bekannt als die „Nurses' Health Study“, wurden 78 562 Krankenschwestern zu ihren Arbeitszeiten befragt. Anschließend wurde Sie in Gruppen in Abhängigkeit von der Arbeitsdauer eingeteilt.

Die erste Gruppe repräsentierte Personal, welches noch nie Schichtarbeit betrieben hat, die zweite Gruppe eine Dauer zwischen 15 und 29 Jahren und die dritte Gruppe die, die mit über 30 Jahren Nachtschichtfahrung dabei waren. Nach zehn Jahren Beobachtung haben die Wissenschaftler eine steigende Tendenz zwischen potenziellen Brustkrebsrisiko und Länge der Nachtschichtarbeit herausgefunden. Diese wurde als relatives Risiko gegenüber der ersten Gruppe ausgedrückt (Schernhammer et al., 2001).

Die „Nurses’ Health Study II“ wurde im ähnlichen Ausmaße gestaltet und bestätigt die Ergebnisse der vorherigen Beobachtungen. Im ähnlichen Verfahren wurde das Krankenhauspersonal in Gruppen aufgeteilt. Hierbei haben die statistischen Auswertungen ergeben, dass Krankenschwester, die länger als 20 Jahre mindestens dreimal die Woche Nachtschicht betrieben, ein 79 Prozent höheres relatives Risiko gegenüber denen haben, die noch nie nachts gearbeitet haben. (Schernhammer et al., 2006).

Im Gegensatz zu den zwei zuvor erwähnten Studien haben Wissenschaftler aus Norwegen versucht das altersbedingte Risiko der Brustkrebserkrankung zu minimieren. Zusätzlich zu der Dauer der Arbeitserfahrung in Schichtarbeit wurden diese in Altersklassen unter 50 Jahren und über 50 Jahren aufgeteilt. Trotz allem erkennt man eine klare Tendenz des relativen Risikos einer Brustkrebserkrankung in Abhängigkeit der Länge der Nachtschichtarbeit, wie in Abbildung 12 zu sehen ist (Lie, Roessink & Kjærheim, 2006).

All ages (years)							
0	50	1.00	Reference		1.00	Reference	
>0–14	362	1.02	0.73–1.41		0.95	0.67–1.33	
15–29	101	1.26	0.85–1.85		1.29	0.82–2.02	
30+	24	1.95	1.08–3.51	$p = 0.01$	2.21	1.10–4.45	$p = 0.01$
Age < 50 (years)							
0	21	1.00	Reference		1.00	Reference	
>0–14	185	1.17	0.71–1.91		1.02	0.60–1.71	
15+	13	1.50	0.68–3.26	$p = 0.16$	1.72	0.56–5.26	$p = 0.52$
Age 50+ (years)							
0	29	1.00	Reference		1.00	Reference	
>0–14	177	0.87	0.56–1.36		0.86	0.54–1.37	
15–29	88	1.12	0.70–1.80		1.17	0.68–2.00	
30+	24	1.72	0.90–3.26	$p = 0.02$	2.01	0.95–4.26	$p = 0.02$

Abbildung 12: Relatives Risiko von Brustkrebserkrankungen von Schichtarbeiterinnen im Krankenhaus (Lie, Roessink & Kjærheim, 2006)

3.1.3.4 Melatonin und Demenz

Laut der Deutschen Alzheimer Gesellschaft e.V. leben derzeit mit einer steigenden Tendenz knapp 1,6 Millionen demenzerkrankte Patienten. Prognosen zur Folge wird die Anzahl an Erkrankten aufgrund der demographischen Verteilung bis zum Jahr 2050 auf drei Millionen steigen, falls es keinen Durchbruch in der Therapie oder noch besser in der Prävention gibt. Allein zwei Drittel der Erkrankten in Deutschland leiden an Demenz (Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V., 2015). Laut Schätzungen der WHO und Alzheimer Disease International waren es im Jahre 2015 weltweit 46,8 Millionen Betroffene (Prince et al., 2016). Bei der Alzheimer-Demenz kommt es zu einem fortschreitenden Schwund des Gehirngewebes, wobei die

Betroffenen bis zu 20 Prozent der Gehirnmasse verlieren können (Cheers, 2001). Im frühen Stadium überfällt den Patienten eine zunehmende Vergesslichkeit. Mit dem Voranschreiten der Erkrankung nehmen dazu alle kognitiven Funktionen ab. Rechnen, Schreiben oder gar Lesen fallen immer schwerer. Routineaufgaben wie das Ankleiden werden zu einer Herausforderung, sodass im späteren Verlauf der Erkrankung Patienten hochgradig pflegebedürftig sind (Behrends et al., 2010). Zusätzlich haben Alzheimer Patienten einen extrem gestörten Schlafrythmus (Witting et al., 1990). In bis zu 44 Prozent der Fälle ist die Krankheit mit nächtlicher Unruhe und ständigem Erwachen verbunden (Mccurry et al., 2000). Der Körper kann in der für ihn so wichtigen Schlafphase nicht das volle Potential an Erholung und Regeneration ausschöpfen. Dies wirkt sich zusätzlich auf die Stimmung und das aggressive Verhalten gegenüber anderen Beteiligten, wie den Familienangehörigen oder dem Pflegepersonal, aus.

Um die Schlafqualität zu verbessern, haben niederländische Forscher versucht den Schlaf-Wach-Rhythmus der Patienten zu stabilisieren. Dabei verglichen sie die Wirkung von Melatonin als Nahrungsergänzungsmittel vor dem Schlaf und die Auswirkung von zwei unterschiedlichen Lichtsituationen. Dafür wurden in ausgewählten Pflegeheimen biodynamische Lichtsysteme installiert mit einer Spitzenbeleuchtung von 1000 lx am Tag gegenüber der alten Situation mit nur 300 lx. Um das volle Spektrum an Ergebnissen zu erhalten, wurden die Probanden in vier Gruppen aufgeteilt. Eine Gruppe wurde getestet bei unveränderter Lichtsituation von 300 lx und Melatonin Placebo. Die Zweite mit ebenfalls der ursprünglichen Lichtsituation und realem Melatonin als Nahrungsergänzungsmittel. Ergänzend gab es jeweils eine Gruppe bei neuen Lichtverhältnissen mit Placebo und realem Melatonin.

Eine gesamt betrachtende Verbesserung ergab die kombinierte Gruppe von Melatonin und der neuen Lichtsituation. Zusätzlich hat man festgestellt, dass zwar die depressive Stimmung bei allen Probanden sich verschlechterte, jedoch bei dieser Gruppe am geringsten (Swaab und Hoogendijk, 2014).

Ein weiteres Forschungsteam hat ebenfalls durch bauliche Maßnahmen positive Ergebnisse in einem Pflegeheim für Demenzkranke erzielen können. Nach dem Umbau der Lichtsituation hat man bereits in der frühen Testphase erhöhte Kommunikation feststellen können. Zudem hat sich das agitierte Verhalten der Betroffenen reduziert. Die Wissenschaftler assoziieren diese Reduktion gleichzeitig mit einem erhöhten Maß an Entspannung und Wohlbefinden der Patienten (Sust et al., 2014).

Für einen weiteren Versuch hat das Unternehmen Trilux in einem Alzheimer Pflegeheim den Gemeinschaftsraum der Patienten auf ein dynamisches Lichtsystem umgebaut (siehe Abbildung 13). Die Leuchtmittel ahmen die Farbtemperatur der Sonne im Laufe des Tages zwischen 3000K und 6500K nach. Infolgedessen wurden die Aktivitäts- und Ruhephasen, insbesondere die Schlafphase, aktimetrisch überwacht. Laut der Tracker hat sich die Schlafphase um knapp eine Stunde pro Tag verlängert, wobei die Patienten in der Nacht zugleich seltener aufwachten. Dies erklärt Dr. Raphael Kirsch, Lighting Application Specialist bei Trilux wie folgt:

„Durch eine dynamische Lichtlösung, die sich in der Lichtfarbe und -Intensität am natürlichen Tagesverlauf der Sonne orientiert, lässt sich der Schlaf-Wach-Rhythmus stabilisieren“.

Anhand des „Neuropsychiatric Incentory“ Fragebogens hat das Pflegepersonal eine reduzierte Verhaltensauffälligkeit und verminderte Angstzustände notiert. Dies erwies sich als ein großer Erfolg nicht nur aufgrund des verbesserten Wohlbefinden der Patienten, sondern auch als eine Erleichterung für den Pflegedienst und Familienangehörige (Kirsch, 2016).



Abbildung 13: Gemeinschaftsraum nach lichttechnischen Umbauten (Kirsch, 2016)

3.2 Vitamin D

Vitamin D ist im eigentlichen Sinne gar kein Vitamin, sondern viel mehr ein Hormon. Im Gegensatz zu Vitaminen kann der Körper dieses selbst herstellen, wobei er auf externe Einflüsse angewiesen ist. Ein kleiner Teil von circa zehn Prozent kann über die Nahrung aufgenommen werden. Wie im Anhang A zu sehen ist, zählen zu den Vitamin D reichen Produkten vor allem frischer Fisch, Leber, Ei, Käse oder Butter (Dr. Schweikart, n.d.). Die restlichen 90 Prozent unseres Vitamin D Haushaltes werden über die Sonneneinstrahlung auf unserer Haut synthetisiert. Dafür ist der Wellenlängenbereich der solaren Strahlung von 290 nm bis 315 nm notwendig (Holick, 2007). Vitamin D Mangel kann zu einer breiten Reihe an Erkrankungen führen. Aber auch der Überschuss kann toxisch auf den menschlichen Körper wirken. Deshalb sollten Vitamin D Ergänzungspräparate nur unter ärztlicher Aufsicht eingenommen werden (Cheers, 2001).

Forscher haben herausgefunden, dass insbesondere ältere Patienten aus Pflege-, Altersheimen und Krankenhäusern unter einem Vitamin D Defizit leiden. Krankheitsbedingt eingeschränkte Mobilität oder gar Bettlägerigkeit können dafür die Ursache sein. Anhand verschiedener Studien weist speziell diese Zielgruppe in 25 bis 57 Prozent der Probanden einen Mangel an diesem wertvollen Hormon auf (Gloth et al., 1995; Goldray et al., 1989; Thomas et al., 1998; Ringe, 2010; Roe, Birge, & Morris, 2006).

3.2.1 Vitamin D Synthese

Durch die UV-B Strahlung der Sonne entsteht in der Haut aus 7-Dehydrocholesterin, welches bei Menschen natürlicherweise in den Hautzellen vorkommt, über eine Zwischenstufe (Prävitamin) das Cholecalciferol. Anschließend verarbeitet die Leber es weiter zu dem biologisch inaktiven 25-Hydroxycholecalciferol. Dies ist im Übrigen auch das Molekül, welches bei einer Vitamin D Messung im Blut gemessen wird. Im letzten Schritt wandelt die Niere dieses in das biologisch wirksame 1,25-Dihydroxycholecalciferol, welches man auch als das Vitamin D₃ Hormon kennt (Behrends et al., 2010).

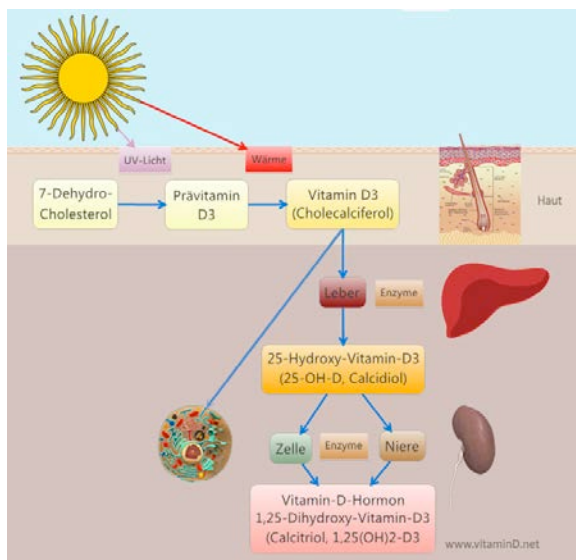


Abbildung 14: Vitamin D Synthese (Dr. Schweikart, n.d.)

3.2.2 Vitamin D und Knochenschwund

Das Vitamin D Hormon unterstützt unter anderem die hormonelle Regulation des Kalzium- und Phosphathaushaltes. Dabei ist Kalziumphosphat CaPO_4 der wichtigste Baustein für Knochen und Zähne. Vitamin D unterstützt die Phosphatresorption und sorgt dafür, dass CaPO_4 langfristig mobilisiert wird. Aus einem Vitamin D Mangel resultiert eine mangelnde Resorption mit gleichzeitig erhöhter Freisetzung von Ca^{2+} aus den Knochen (Silbernagl, 2007). Vor allem im jungen Alter kann ein Vitamin D Mangel für ungenügende Mineralisierung der Knochen sorgen. Rachitis kann als mögliche Folge auftreten, eine unzureichende Verwachsung der Knochenfugen. In Deutschland ist sie jedoch seit der Vitamin D Vorsorge bei Kindern kaum mehr vorzufinden (Behrends et al., 2010). Im erwachsenen Alter kann es im Falle der Osteomalazie lediglich zu demineralisiertem Knochenbau kommen, da die Fugen schon verwachsen sind. Die Knochen verlieren an Dichte und werden brüchiger. Hingegen bei der Osteoporose baut der Körper gesamte Knochenmatrix ab. Im Gegenzug zur Osteomalazie bleibt die Knochendichte dabei konstant (Behrends et al., 2010). Arthrose beschreibt einen anderen Fall von abgenutzter Knochenstruktur im hohen Alter. Bei der Erkrankung handelt es sich um eine degenerative Gelenkerkrankung, welche meist durch langjährige Überbelastung ihre Knorpel- und Knochenstruktur verändern. Dabei zählt die Abnutzung der Knorpel in

Gelenken in Deutschland mit circa fünf Millionen Betroffenen zu den bedeutsamsten chronischen Erkrankungen (Wirkus, n.d.).

American College of Rheumatology hat im Jahr 2005 eine Studie veröffentlicht, die einen Zusammenhang zwischen dem Serum 25-Hydroxycholecalciferol und Arthrose beschreibt. In einer bevölkerungsbasierten Studie wurde bei 228 Betroffenen der Vitamin D Spiegel gemessen. Ein Vitamin D Gehalt von <15 µg/L wurde als Mangel definiert. Dem Wert zwischen 16 und 32 µg/L wurde Insuffizienz zugesprochen und der Wert >32 µg/L als ausreichend angenommen. Bei einem Durchschnittsalter von 74,4 Jahren hat man feststellen können, dass mit sinkender Konzentration des Serums im Blut die Knochendichte bei den Probanden abnahm. Gegenüber der Gruppe mit dem Vitamin D Mangel hatten die Teilnehmer der Insuffizienz- und Ausreichend-Gruppe einen höheren Knochenmineralisierungsgrad (KMG) feststellen können. Der KMG der Insuffizienz Gruppe war um 7,3 Prozent höher gegenüber der Mangel-Gruppe, wobei war der KMG der ausreichenden Gruppe sogar um 8,5 Prozent höher lag. Zusätzlich zu den positiven Ergebnissen zeigt die Studie eine steigende Proportionalität zwischen dem gemessenen Vitamin D Spiegel und dem KMG (Felson, 2005).

Im Rahmen anderer Untersuchungen wurden in Frankreich 180 Altenheime über einen Zeitraum von 18 Monaten beobachtet. Dabei wurde eine repräsentative Anzahl von 3270 älteren Frauen beobachtet. Die Hälfte von Ihnen hat eine tägliche Dosis von 1200 mg Kalzium in Kombination mit 800 IU verabreicht bekommen. Dabei entspricht 1 µg = 40 IU Vitamin D₃. Die andere Hälfte erhielt ein Placebo Präparat. Anschließend wurden diese die folgenden 36 Monate beobachtet und ihre Knochenbrüche fest gehalten. Wie die Abbildung 15 zeigt, haben die nicht-placebo Teilnehmer ein deutlich reduziertes Risiko der Hüftfraktur (-29%) und anderer nicht Wirbelsäule betreffenden Brüche in den Folgemonaten vorgewiesen (-24%) (Chapuy et al., 1994).

Effects of cholecalciferol and calcium supplementation on numbers of fractures in elderly women

	Cholecalciferol-calcium	Placebo	P value*
<i>Active treatment analysis†</i>			
No of women‡	872	893	
Hip fractures:			
Total No	109	155	
No of subjects with ≥ 1	109	153	<0-01
Fractures:			
Total No	218	284	
No of subjects with ≥ 1	205	270	<0-01
<i>Intention to treat analysis‡</i>			
No of women‡	1176	1127	
Hip fractures:			
Total No	138	184	
No of subjects with ≥ 1	137	178	<0-02
Fractures:			
Total No	301	368	
No of subjects with ≥ 1	255	308	<0-02

Abbildung 15: Studienergebnisse (Chapuy et al., 1994)

Ähnliche Ergebnisse zeigt eine ebenfalls Placebo-kontrollierte Studie aus Amerika. Hierbei haben die Beteiligten entweder 500 mg Kalzium mit 700 IU Vitamin D oder Placebo verabreicht bekommen. Bei diesem Versuch wurde der Zufallsparameter der Knochenbrüche ausgeschlossen, indem man technisch mit einem Dual-Energy X-Ray Absorptionsmeter direkt die Knochendichte gemessen hat. Bei der Gruppe mit der Einnahme der Kalzium-Vitamin D-Mischung erhöhte sich der KMG bereits nach dem ersten Jahr signifikant. Zudem zeigt die Abbildung 16, dass die Placebo Gruppe in der darauf folgenden Beobachtungsphase mehr Knochenbrüche erlitt, als die Kalzium-Vitamin D Gruppe (Dawson-Hughes et al., 1997).

Beide Studien lassen jedoch offen, ob der Kalzium-, der Vitamin D₃-Gehalt oder deren Kombination entscheidend die positiven Ergebnisse beeinflusst.

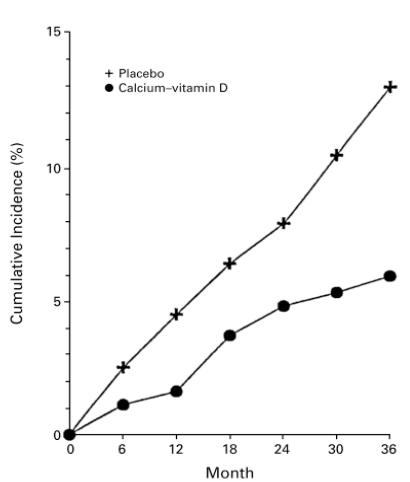


Figure 1. Cumulative Percentage of All 389 Subjects with a First Nonvertebral Fracture, According to Study Group. By 36 months, 26 of 202 subjects in the placebo group and 11 of 187 subjects in the calcium-vitamin D group had had a fracture (P = 0.02).

Abbildung 16: Knochenbrüche im Laufe der Beobachtungsphase (Dawson-Hughes et al., 1997)

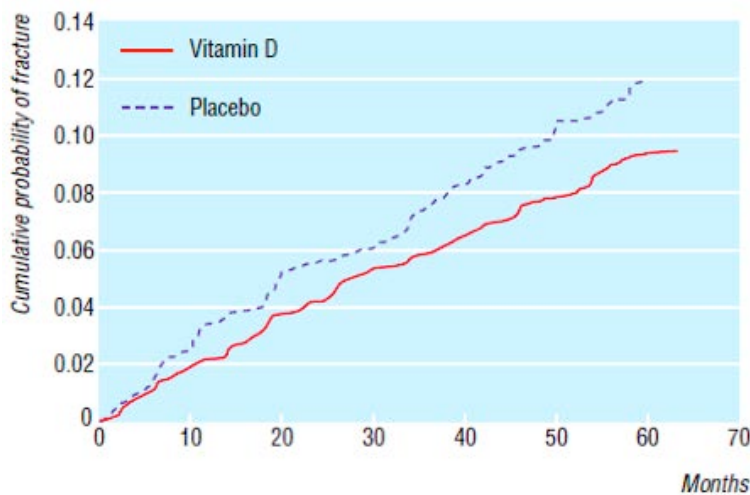


Abbildung 17: Knochenbrüche im Laufe der Beobachtungsphase (Trivedi, Doll, & Khaw, 2003)

Im Rahmen einer großbritannischen Studie zeigt die Abbildung 17 sehr ähnliche Ergebnisse zu der amerikanischen Studie. Im Vergleich zu den bereits vorher genannten Studie aus Amerika, haben die Teilnehmer hierbei ausschließlich Vitamin D als Nahrungsergänzungsmittel erhalten - ohne das Kalzium. Dennoch konnten die Forscher positive Ergebnisse erzielen. (Trivedi et al., 2003).

Eine Studie aus Norwegen hingegen zeigt keine Veränderung bei Einnahme von zusätzlichem Vitamin D und Kalzium in einem Altersheim. Die Ergebnisse zeigen keine Unterschiede in der Anzahl der Brüche der Teilnehmenden bei den anschließenden Beobachtungen. Die durchführenden Forscher dieser Studie nehmen selbst an, dass die 400 IU Ergänzungsmittel möglicherweise zu wenig für eine orale Einnahme seien, da diese bereits positive Ergebnisse solch durchgeführter Studien kennen (Meyer et al., 2002).

Eine weitere Studie aus Amsterdam konnte ebenfalls keine positiven Ergebnisse erzielen. Trotz einer repräsentativen Anzahl an Teilnehmern (2578 aus Altersheimen) hat man in der Vitamin D Gruppe keine Reduktion der Brüche gegenüber der Placebo Gruppe feststellen können, obwohl der Serum 25-Hydroxycholecalciferol Spiegel deutlich angestiegen ist (Lips et al., 1996).

3.2.3 Vitamin D und Depression

Laut der Weltgesundheitsorganisation (WHO) leiden weltweit circa 350 Millionen Menschen an Depressionen (Marcus et al., 2012). In Deutschland geht man mit acht Prozent von circa sechs Millionen Erkrankten aus (Degs, 2013). Diese anschleichende Krankheit wird sehr eng mit Vitamin D Mangel in Verbindung gebracht. Eine aktuelle Studie der American Medical Association hat diesen Zusammenhang bekräftigen können. Bei 1282 Teilnehmern im Alter von 65 bis 95 Jahren wurden die 25-Hydroxycholecalciferol Spiegel gemessen. Gleichzeitig wurden sie mithilfe Selbstreflexion und psychologischer Interviews in drei Gruppen klassifiziert, die ihre psychologischen Stati bewerten. 26 Teilnehmer wurden als schwer und 169 als leicht depressiv eingestuft. Die restlichen 1087 hatten keine Depression. Man hat feststellen können, dass die schwer- und leichtdepressive Gruppe einen um 14 Prozent geringeren Vitamin D Spiegel hatte, als die gesunden Gegenprobanden (Hoogendijk et al., 2015). Eine andere Studie hat ebenfalls den Zusammenhang zwischen niedrigem 25-Hydroxycholecalciferol Status und Depressionen bekräftigt. Mithilfe psychologischer Tests wurde festgestellt, dass die 230 Teilnehmer mit geringerem Vitamin D Spiegel depressiver waren, als die 114 mit dem höheren Serumspiegel (Figenschau et al., 2012). Andere Wissenschaftler assoziieren ebenfalls einen Vitamin D Mangel mit verstärkten Stimmungsverstörungen. Dabei berufen sie sich auf die Ergebnisse unterschiedlicher psychischer Diagnostiken und vergleichen diese mit Proben der Vitamin D Spiegel (Roe et al., 2006).

3.2.4 Vitamin D und Krebs

Der Zusammenhang von Vitamin D und Krebs wurde schon sehr früh erkannt. Bereits im Jahre 1915 veröffentlichte Frederick Hoffmann in „Mortality of cancer throughout the world“ eine Statistik, welche die weltweite Krebsrate analysiert mit über 1,5 Millionen Todesfällen. Dabei hat er eine Anzahl von 450 Millionen

Probanden statistisch vernommen, was einem viertel der damaligen Weltbevölkerung entsprach. Er stellte fest, dass es einen Zusammenhang zwischen der Todesrate (gerechnet auf 100.000 Einwohner) und dem geografischen Auftreten gibt. Wie die Abbildung 11 aufzeigt, war die höchste Mortalitätsrate in Europa mit 76,6 Todesfällen auf 100.000 Einwohner. Hingegen Afrika weist mit einer doppelt so kleinen Rate von 33,4 das Minimum auf (Hoffmann, 1915).

Mortality from Cancer Registration Countries of the World, 1908-1912*			
Continent	Population	No. of Deaths from Cancer	Rate per 100,000 Population
Africa	9,041,866	3,018	33.4
America	382,549,311	251,438	65.7
Asia	272,814,962	148,447	54.4
Australasia	27,886,740	20,345	73.0
Europe	1,431,996,861	1,096,716	76.6
Total	2,124,289,740	1,519,964	71.6

Abbildung 18: weltweite Mortalitätsrate (Hoffmann, 1915)

Später hat Frank Apperly die Arbeit von Hoffmann aufgegriffen und leicht modifiziert. Er untersuchte im Gegensatz zu seinem Vorgänger die Todesrate in Abhängigkeit der Breitengrade - nicht Kontinente wie sein Vorgänger. So konnte er eine detailliertere Abhängigkeit der solaren Strahlung und der Todesrate an Krebs darstellen, wie in Abbildung 19 zu sehen ist (Apperly, 1941).

Number of cities	Degrees of latitude	Deaths from cancer	Rate per 100,000 population
35	60 N—50 N	119,374	105.7
48	50 N—40 N	121,216	92.4
24	40 N—30 N	37,451	78.1
7	30 N—10 N	5,696	42.3
4	10 N—10 S	1,056	40.9
7	10 S—30 S	3,040	37.7
5	30 S—40 S	11,048	89.8

* Modified from Hoffman (5).

Abbildung 19: Mortalitätsrate in Abhängigkeit vom Breitengrad modifiziert nach Hoffman (Apperly, 1941)

Anschließend betrachtete er einzelne Bevölkerungsgruppen von den amerikanischen Staaten und Kanada. Ihm ist aufgefallen, dass es ebenfalls einen engen Zusammenhang gibt zwischen dem prozentualen Anteil

an agrikulturellen Arbeitern und der Todesrate. Je höher der Prozentsatz der draußen arbeitenden Bevölkerung, desto weniger Todesfälle hatte die Region nachzuweisen (Aperly, 1941).

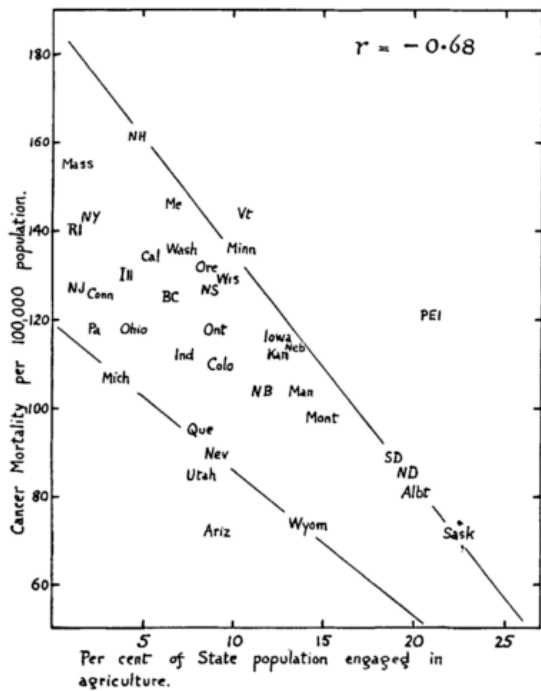


Abbildung 20: Mortalität und agrikulturelle Beschäftigung (Aperly, 1941)

Im Jahre 1990 gingen die Gebrüder Garland einen Schritt weiter. Sie untersuchten nun mit anderen Wissenschaftlern speziell die Folgen von geringerer Sonnenstrahlung bei Brustkrebs. Und erneut stellten sie eine umgekehrte Proportionalität zwischen der solaren Strahlung und der Todesrate an Brustkrebs fest. In südlichen Breitengraden ist die Todesrate zwischen 17 und 19 auf 100.000 Frauen bei einer solaren Strahlung von knapp 500 cal/cm^2 . Hingegen in den nördlichen Städten konnte man bis zu 33 Fälle markieren bei gleichzeitig reduzierter solaren Strahlung von circa 300 cal/cm^2 (siehe Abbildung 21) (Garland, Garland, & Young, 1990).

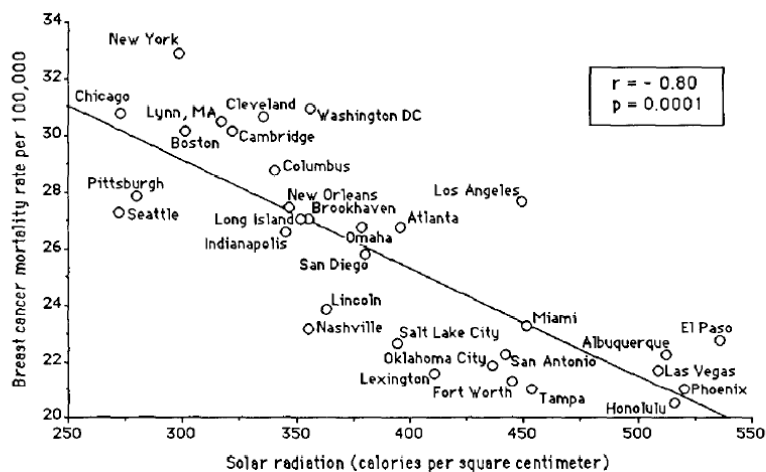


Abbildung 21: Soalre Strahlung und Brustkrebsmortalität (Garland, Garland & Young, 1990)

Im Jahre 2006 berichten die Gebrüder von einer umgekehrten Proportionalität des Dickdarmkrebses und der solaren Einstrahlung in den USA. Arizona und New Mexico weisen die niedrigste Quote mit 6,7 bis 10,1 Todesfällen bei 500 cal/cm² auf. Hingegen New York, New Hampshire und Vermont verbuchten 11,3 bis 17,3 bei einer mittleren solaren Strahlung von 300 cal/cm² (Garland & Garland, 2006).

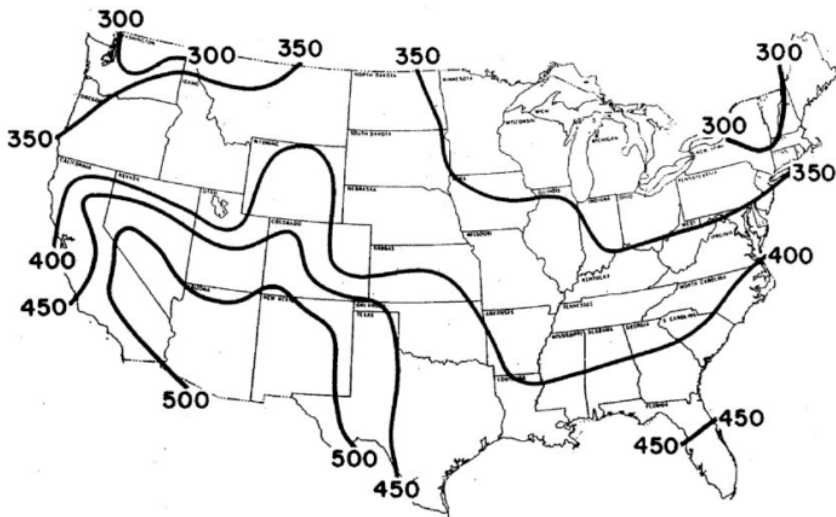


Abbildung 22: Mittlere solare Strahlung in den USA (Garland & Garland, 2006)

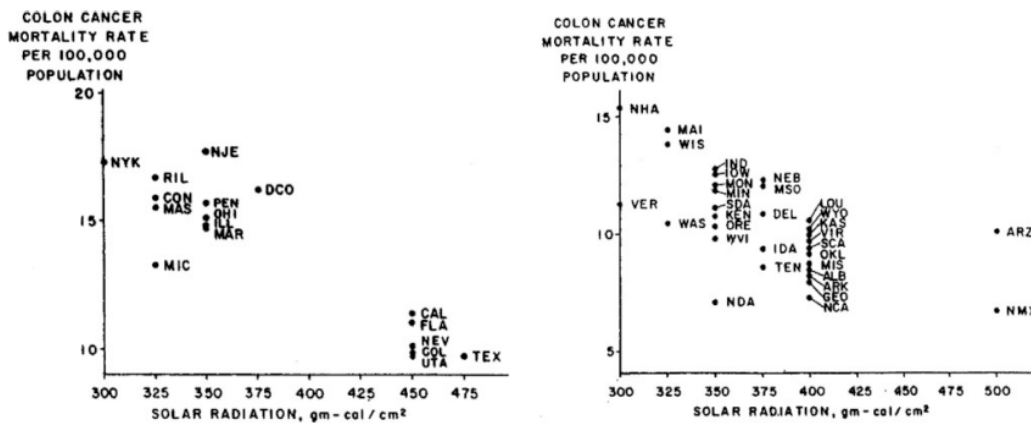


Abbildung 23: Todesfallrate an Dickdarmkrebs in Abhängigkeit von der mittleren solaren Strahlung (Garland & Garland, 2006)

3.3 Flimmern bei künstlicher Beleuchtung

3.3.1 Flimmeranteil

Laut der Illuminating Engineering Society ist Flimmern die über die Zeit periodisch veränderbare Lichthelligkeit (IEEE Power Electronics Society, 2015). Der Flimmereffekt vom künstlichen Licht ist bedingt durch die Vorschaltel Elektronik und die Wechselspannung in der Steckdose (Böhmer, 1986). Dieser wird in Prozentzahl ausgedrückt. Dabei entspricht eine flimmerfreie Lichtquelle 0 Prozent. Hingegen 100 Prozent repräsentieren das stärkste Flimmern. Aufgrund der Trägheit des Auges nehmen Menschen das Flimmern von Leuchtmittel oberhalb einer Frequenz von 60 Hz nicht wahr (Böhmer, 1986). Der Organismus jedoch kann in Abhängigkeit der individuellen Sensitivität darauf reagieren.

3.3.2 Gesundheitliche Einschränkungen durch Lichtflimmern

3.3.2.1 Kopf- und Augenlidschmerzen bei Flimmern

Im Jahre 1989 erforschte Wilkins mit seinen Kollegen in einer Placebo-kontrollierten Studie die unterschiedlichen Einflüsse von herkömmlicher, niederfrequenter Beleuchtung bei 100Hz und hochfrequenter Beleuchtung bei 132 kHz. Diese wurden zufällig in verschiedenen Büroräumen installiert. Nach 19 Wochen Beobachtungsphase wurde die Beleuchtung nochmals zufällig ausgetauscht und weitere neun Wochen beobachtet. Die Mitarbeiter des Bürokomplexes haben sich dazu bereit erklärt wöchentlich einen Fragekatalog auszufüllen. Dabei wurde nach ihrem Wohlbefinden gefragt. Für die Studie standen jedoch nur Augenlid- und Kopfschmerzen in Fokus. Um einen Placebo Effekt zu verhindern, wussten die Beteiligten nicht über die veränderte Lichtsituation bescheid. Die Forscher fanden heraus, dass Probanden, die in Büros mit herkömmlicher, niederfrequenter Beleuchtung arbeiteten, etwa die doppelte Kopfschmerzrate aufwiesen gegenüber denen, die sich in Räumen mit hochfrequentem Licht befanden (siehe Abbildung 24).

Außerdem ist es aufgefallen, dass die Symptome mit steigender Höhe des Gebäudes sanken. Im sieben stöckigen Gebäude wurde mit jedem Stockwerk durchschnittlich 80 lx mehr Beleuchtungsstärke gemessen. Die steigende Tendenz resultiert aus dem steigenden Sonnenlichteinfall. Der Anteil an natürlichem Licht stieg somit mit jedem Stockwerk an, sodass der Anteil an resultierendem Flimmeranteil durch das Vermischen der beiden Lichtquellen sank (Wilkins, Smith & Slater, 1989).

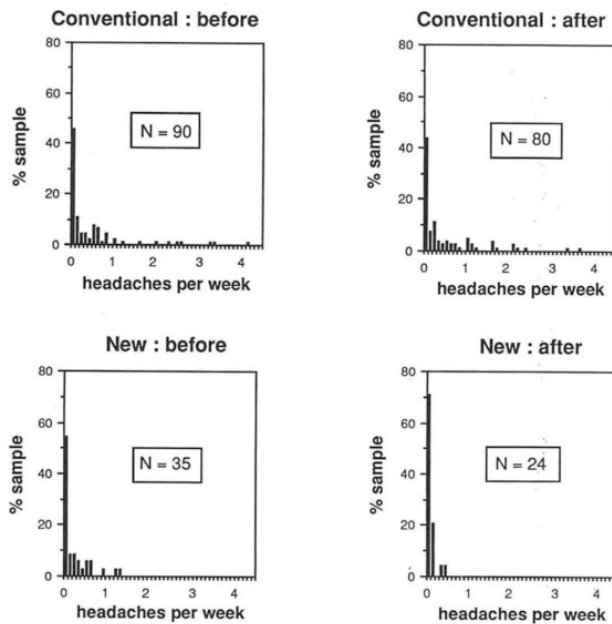


Abbildung 24: Ergebnisse der Kopfschmerzrate (Wilkins, Smith & Slater, 1989)

3.3.2.2 Flimmern und Konzentration

Bereits 1986 beschreibt Wilkins einen Zusammenhang zwischen der Konzentration beim Lesen und der Frequenz der Beleuchtung. In dem ersten Versuch lässt er Probanden Buchstaben von zwei Computer Bildschirmen ablesen. Dabei sollten die Teilnehmer zu einem Pieps Ton von einem Buchstaben zum anderen weitergehen und diesen fixieren. Die Buchstaben waren unterschiedlich weit von einander entfernt. Die Bildschirme wurden jeweils mit unterschiedlichen Frequenzen betrieben (50Hz und 100 Hz). So konnte er feststellen, dass beim Lesen von niedriger frequentiertem Bildschirm das Auge fast die 2,5-fache Zeit zum fokussieren des Buchstaben brauchte.

Den zweiten Versuch lies er gleich ablaufen. Diesmal mussten die Probanden jedoch klassisch von Papier ablesen. Zur Differenzierung hat man 2 verschieden frequentierte Leuchtmittel benutzt - 100 Hz und 20 kHz. In diesem Versuch waren zwar die Ergebnisse nicht so eindeutig wie bei der ersten Gestaltung, dennoch hat man eine Tendenz feststellen können. Unter niederfrequentiertem Licht konnte man ebenfalls eine verzögerte Zeit zum Fokussieren des Auges feststellen bei Buchstaben, die weiter von einander entfernt waren (Wilkins, 1986).

In einer weiteren Studie assoziieren Wissenschaftler ebenfalls erhöhte Flimmeranteile mit verminderter Leistungsfähigkeit. In einem Versuch hat sich bestätigt, dass das Lesen von einem anspruchsvollem Text unter hochfrequentem Licht leichter fiel, als unter herkömmlicher niederfrequenter Beleuchtung (Veitch, Mccoll, & Hons, 1995).

3.3.2.3 Epilepsie

Bei einer Epilepsie versagt die normale Gehirnfunktion und kann schwere Folgen mit sich tragen. Der Betroffene erleidet Bewusstseinsveränderungen mit unkontrollierten Bewegungen bis hin zu muskulären Krampfanfällen. Diese wird durch hormonelle Veränderungen oder sensorische Reize, wie den visuellen Reiz, ausgelöst. So kann auch ein stroboskopisch eingesetztes Licht zu einer visuellen Epilepsie führen (Cheers, 2001). Die zur Messung am häufigsten verwendete Methode ist das Elektroenzephalogramm (EEG), welches die Gehirnströme misst. Anhand der EEG Analysen weis man, dass die größte Empfindlichkeit auf visuelle Reize beim Menschen zwischen 5 Hz und 25 Hz liegt. Jedoch kann sie in Abhängigkeit seiner Sensitivität abweichen (Fisher et al., 2005).

Im Jahre 1997 hat eine klinische Untersuchung aus Japan den beliebten Animationsfilm „Pokémon“ in Verbindung mit epileptischen Krämpfen gesetzt. Mithilfe einer Umfragen wurden 685 Epilepsiefälle japanweit gemeldet. Davon konnte man anhand 93 Fälle Untersuchungen durchführen. Bei einem Durchschnittsalter von nur elf Jahren berichten die Betroffenen einen epileptischen Anfall während der Sendung erleidet zu haben. Auffällig ist, dass 74 Patienten ein Zeitfenster von 18:45 Uhr – 19:00 Uhr angegeben haben, wobei 47 Betroffene 18:50 Uhr als genauen Zeitpunkt nannten. Um genau diese Uhrzeit ereignete sich in dem Kinder Cartoon eine Bombenexplosion, welche ein Flimmern von einem blau-rot-Wechsel im Bereich von 12Hz aufzeigt. Dies wird als der visuelle Reiz, welcher zu den epileptischen Anfällen führte, genannt. Anzuführen ist, dass 25 Betroffene eine epileptische Vorgeschichte in der Familie hatten. 61 Prozent hingegen hatten keine familiäre Epilepsievorgeschichte. Seit dem wurde die Ausstrahlung der Folge verboten (Takada et al., 1999).

4. Gesundheitsfördernder Einsatz von Licht in der Praxis

Seit den 1980er Jahren findet die Anwendung von Lichttherapie erfolgreich Einsatz in der Medizin. Vor allem die Behandlung im psychiatrischen Bereich konnte sich als ein wirksames Mittel durchsetzen (Cheers, 2001; Desan et al., 2007). So können nicht nur Patienten mit einer SAD, sondern auch der klassischen Form von Depression, erfolgreich behandelt lassen (Eniola et al., 2016; Lam et al., 2016). Mithilfe einer Bestrahlung mit hohen Beleuchtungsstärken und hohen Farbtemperaturen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2015) möchte man die Serotoninproduktion des Patienten ankurbeln. Dabei kann das Serotonin, bekannt auch als Glückshormon, den Verstimmungen des Patienten entgegen wirken (Zentrum der Gesundheit, 2017a). Gleichzeitig wird der Schlaf-Wach-Rhythmus des Betroffenen stabilisiert, wodurch auch die Schlafphase verbessert werden kann.

Eine andere Form des gesundheitsfördernden Einsatzes von Licht ist das *Human Centric Lighting* (HCL). Es beschreibt ein Lichtkonzept, welches den Menschen und insbesondere seine Gesundheit, in den Fokus stellt. Dabei achtet das umfassende Lichtkonzept besonders auf die biologische Wirkung des Lichtes. Ein biodynamisches Lichtsystem im Innenraum soll sich an dem natürlichen Sonnenlicht orientieren. Aufgrund neuer Erkenntnisse und intensiver Forschungen der letzten Jahre verändert sich das menschliche Bewusstsein bezogen auf den Einfluss durch Licht. Laut einer aktuellen Studie wird der Lichtmarkt der biodynamischen Lichtsysteme auf sieben Prozent steigen (Kearney, 2013). Die sich mit der Zeit veränderbare Lichtverhältnisse haben ebenfalls schon Fuß in medizinische Bauten gesetzt. Aufgrund der durchaus positiven Ergebnisse in Einrichtungen für Demenzpatienten sind weitere Umbauten der Einrichtungen auf biodynamisches Licht europaweit geplant (Kirsch, 2016).

Ein anderer Versuch in einem Krankenhaus beschreibt ebenfalls die lichttechnische Weiterentwicklung. Dabei wurde ein Krankenzimmer an einer Intensivstation möglichst patientenfreundlich umgestaltet. Neben einer biodynamischen Lichtdecke wurden auch akustische Parameter miteinbezogen. Das Ziel war, das Wohlbefinden des Patienten nach dem Aufwachen nach einer Operation zu maximieren und somit das Risiko eines Delirs zu verringern (Lütz, 2016).

5. Bewertung

Es ist unumstritten, dass Licht sich auf die menschliche Gesundheit auswirkt. Dies zeigt die auf wissenschaftlichen Studien basierte Erörterung im dritten Kapitel.

Licht hat einen direkten Einfluss auf das menschliche Hormonsystem. Die vom Auge absorbierende Wellenlänge des Lichts reguliert die hormonelle Ausschüttung in der Zirbeldrüse. Dabei wirkt blaulastiges Licht aktivierend, fördert die Serotoninproduktion und bewirkt somit eine Melatoninsuppression. Das Aussetzen von Licht mit erhöhtem Blauanteil vor der Schlafphase bewirkt eine Verschiebung des zirkadianen Rhythmus, was mit der Störung des Hormonhaushaltes zusammenhängt. So wirkt sich eine blaulastige Lichtexposition abends negativ auf das Schlafverhalten aus. Vor allem elektronische Geräte, wie Handys oder Tablets, sind oft mit blaulastigen Bildschirmen ausgestattet und täuschen dem Organismus aufgrund der teils hohen Farbtemperaturen Mittagszeit vor. Dadurch wird der Körper in seiner zeitlichen Orientierung irritiert. Auf dem Markt werden jedoch seit kürzester Zeit Geräte mit integrierter Funktion zur Verschiebung der Farbtemperatur in den rötlichen Bereich angeboten, um so die melatoninunterdrückende Wirkung zu minimieren. Nachdem der melanopische Grad des Lichtes einer Wirkungsfunktion unterliegt, ist es ebenfalls sinnvoll neben der Farbtemperatur auch die explizite Wellenlänge des Absorptionsmaximums anzugeben. Im Gegensatz zu älteren Studien, die nur tendenziell bläuliches und rötliches Licht unterschieden, werden die Absorptionsmaxima bei neueren Studien mittlerweile mit angegeben.

Die Therapie mit Licht hat sich seit Jahrzehnten bei Patienten mit depressivem Verhalten als effektiv erwiesen. Mithilfe der Lichttherapie ist es möglich der SAD und sogar der klassischen Form der Depression entgegenzuwirken. Durch die morgendliche Bestrahlung mit hohen Beleuchtungsstärken und hohen Farbtemperaturen kann die Serotoninproduktion angekurbelt und somit der Schlaf-Wach-Rhythmus stabilisiert werden. Dadurch werden die oftmals trägen Patienten durch die erhöhte Produktion des Glückhormons Serotonin aktiviert. Gleichzeitig erfahren sie eine verbesserte nächtliche Erholungsphase, da Melatonin aus Serotonin nachts vermehrt synthetisiert werden kann.

Weiterhin weisen Schichtarbeiter, anhand zahlreicher Studien, ein erhöhtes relatives Krebsrisiko auf, da sie die extremste Form der zirkadianen Rhythmusverschiebung erfahren. Dabei deckt Schichtarbeit mit 17 Prozent und einer steigenden Tendenz den Arbeitsmarkt ab. Deshalb ist es um so wichtiger in Branchen mit Nacht- und Schichtarbeit bei der lichttechnischen Planung höchste Prioritäten zu setzen. Bei den durchgeführten Studien bleibt jedoch der Faktor eines altersbedingten Krebsrisikos weitgehend unbedacht.

Außerdem konnten Wissenschaftler in der jüngsten Zeit bei Demenzpatienten, durch Umbau der Lichtverhältnisse auf biodynamische Lichtsysteme, positive Ergebnisse im Hinblick auf deren Angstzustände, Kommunikations- und vor allem Schlafverhalten erzielen. Durch die Stabilisierung des Schlaf-Wach-Rhythmus der Betroffenen konnte vor allem die sonst so problematische Schlafphase unterstützt werden. Die erhöhte nächtliche Erholung wirkt sich auf das gesamte Wohlbefinden des Patienten aus. Hierbei hat man neben der subjektiven Beobachtung durch das Pflegepersonal, technische Messdaten verwenden können. So konnte die Schlafphase aktimetrisch festgehalten und ausgewertet werden. Die Studien dazu werden von den Verantwortlichen sehr detailliert gestaltet. So werden genaue

Bewertung

Beleuchtungsstärken, Farbtemperaturen mit entsprechenden Uhrzeiten und Absorptionsmaxima des gegebenen Lichts genannt.

Der Einfluss von Licht aufgrund veränderbaren Transmissionsgrades der Linse wird jedoch in allen Studien soweit noch nicht beachtet. Dies wäre jedoch sinnvoll in sofern, weil mit steigendem Alter die benötigte Beleuchtungsstärke für den gleichen melanonischen Effekt höher sein muss.

Über die UV-B Strahlung des Lichts werden circa 90 Prozent des Vitamin D Gehaltes im menschlichen Körper synthetisiert. Dabei erfüllt das Vitamin D Hormon zahlreiche wichtige Funktionen, sodass dessen Mangel sich negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken kann. So unterstützt Vitamin D die Kalziumaufnahme im Knochen. Daher ist ein ausgewogener Vitamin D Spiegel für einen stabilen Knochenbau von hoher Bedeutung. Mit seinem Mangel einhergehend können folgende Krankheitsbilder entstehen: Rachitis, Osteomalazie, Osteoporose und Arthrose. Davon ist vor allem die ältere Bevölkerungsgruppe betroffen. In zahlreichen Studien konnte dieser Zusammenhang bestätigt werden. Forscher hantieren dabei jedoch oft mit Vitamin D und Kalzium Nahrungsergänzungsmitteln, wobei sie offen lassen, welches der beiden Präparate oder dessen Kombination für die stabilisierende Wirkung des Knochens entscheidend ist. Verbesserung der Knochenstruktur wird anhand der darauffolgend beobachteten Knochenbrüche beurteilt, wobei der Zufallsparameter eines Knochenbruchs nicht ausgeschlossen werden kann. Hingegen eine andere Forschergruppe misst einen erhöhten Knochenmineralisierungsgrad nach Einnahme der Nahrungsergänzungspräparate mithilfe technischer Unterstützung. Hierbei verwenden sie einen Dual-Energy X-Ray Absorptionsmeter, um das Zufallsereignis der Knochenbrüche zu vermeiden.

Des Weiteren assoziieren Wissenschaftler den Mangel des Hormons mit erhöhten depressiven Verstimmungen. In unterschiedlichen Studien wurde ein geringer Vitamin D Spiegel mit erhöhten psychischen Verstimmungen in Verbindung gebracht. Hierbei wurde lediglich der Vitamin D Spiegel der Probanden gemessen und anschließend deren psychischer Status mithilfe psychologischer Tests ausgewertet.

Außerdem wurde der Zusammenhang zwischen einer erhöhten Krebsrate und geringer solarer Strahlung schon sehr früh erkannt. Wissenschaftler gehen davon aus, dass in Regionen mit hoher solarer Strahlung eine erhöhte Vitamin D Synthese stattfindet. So wird ein vermindertes Krebsrisiko zum Äquator hin beschrieben. In den Studien werden jedoch keine explizite Vitamin D Werte der Betroffenen genannt. Man nimmt an, dass der Vitamin D Spiegel mit der Entfernung vom Äquator abnimmt. Dabei wird nicht bedacht, dass Vitamin D Synthese ebenfalls vom Hauttyp abhängig ist. Andere Faktoren, die vom Robert-Koch Institut als krebbsgefährdend eingestuft werden, wie zum Beispiel anthropogener oder natürlicher Schadstoffeintrag in die Luft, werden hierbei nicht beachtet.

Außerdem werden in den Studien unterschiedliche Vitamin D Richtwerte genannt. So definiert jede Studie eigene Richtwerte, wodurch keine Einheit in Anbetracht auf Studienergebnisse ausgesprochen werden kann. Außerdem werden die Werte im amerikanischen Raum höher als in Europa angesetzt, was die Menschen zur Verunsicherung führen kann in Bezug auf die eigene Vitamin D Versorgung.

Positiv zu bewerten ist die Durchführung von Placebo-kontrollierten Studien, da vor allem bei psychischen Risiken eine maßgebliche Fehlerquelle reduziert wird.

Bewertung

In der aktuellen Zeit wird die Menschheit auch als Innenraumgesellschaft bezeichnet, was daran liegt, dass der Mensch sich durchschnittlich circa 90 Prozent seiner Zeit in Innenräumen aufhält – zuhause, in der Arbeit oder in öffentlichen Einrichtungen. Daher gewinnt die künstliche Beleuchtung immer mehr an Bedeutung. Aufgrund der Vorschaltel Elektronik und der Wechsellspannung in der Steckdose kann künstliche Lichtquelle jedoch einen erhöhten Flimmeranteil aufweisen. Dieser stroboskopische Effekt bleibt ab einer Frequenz von 60 Hz für das menschliche Auge aufgrund dessen Trägheit unbemerkt. Laut Studien können jedoch Kopfschmerzen, Konzentrationsschwierigkeiten, Leistungsminderung und im Extremfall Epilepsie dadurch ausgelöst werden. Man hat festgestellt, dass ein niederfrequent betriebenes Leuchtmittel einen höheren Risikofaktor aufweist, als die Hochfrequenz. Das menschliche Empfindlichkeitsmaximum auf visuelle Reize liegt zwischen 5 Hz und 25 Hz. So können die Ergebnisse folglich interpretiert werden: je weiter weg die Frequenz vom visuellen Empfindlichkeitsmaximum, desto unproblematischer ist dessen Wirkung.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

In zahlreichen Studien hat sich die positive Wirkung von höherem Vitamin D Spiegel gegenüber Vitamin D Mangel im umfangreichen Maße auf die Gesundheit bestätigt. Dabei hantieren die Forscher in der Regel mit Vitamin D Nahrungsergänzungspräparaten. Die Lösung für einen Vitamin D Eintrag auf eine natürlich Art und Weise ist nur beschränkt gegeben. Mithilfe von speziellen Lampen lässt sich der Vitamin D Eintrag zwar erhöhen, eine bauphysikalische Lösung wird jedoch sonst nicht genannt. An dieser Stelle können die Forschungsverantwortlichen anknüpfen und nach einer baulichen Lösung suchen. Einerseits kann der Eintrag der UV-B Strahlung in den Innenraum über die Gestaltung der Fassade getestet werden. So kann die Vergrößerung der Fläche für das einfallende Licht oder das Umlenken der UV-B Strahlung erprobt werden. Andererseits kann man bauliche Maßnahmen treffen, um die Einrichtungen Spaziergang-freundlicher zu gestalten. Speziell in Gesundheitsbauten kann man versuchen durch bauliche Maßnahmen die Patienten dazu zu animieren, sich nach draußen zu bewegen, um so auf eine natürliche Art und Weise den Vitamin D Gehalt zu erhöhen.

Im Hinblick auf die Vitamin D Richtwerte ist in der Zukunft eine einheitliche Absprache unter allen Forschern anzustreben, um die Beurteilungskraft der Studien zu erhöhen und die Verunsicherung bei den Menschen zu eliminieren.

Außerdem verläuft die Gestaltung der Studien teils sehr einseitig, obwohl sich die gesundheitlichen Effekte teilweise überschneiden. So beschreiben andere Studien den Zusammenhang von ADHS Betroffenen und geographischer Nähe zum Äquator. Die Wissenschaftler assoziieren den Zusammenhang mit erhöhter Sonnenstrahlung - ähnlich wie bei der Assoziation von Krebs und solarem Eintrag. Hierbei jedoch sehen die Forscher den Grund für den statistisch geringeren Anteil an ADHS Patienten bedingt durch die Stabilisation des zirkadianen Rhythmus (Arns et al., 2013; Arns, Swanson, & Arnold, 2015). Sie können auch Recht haben. Jedoch der zuvor erwähnte, ebenfalls von der geographischen Lage abhängige, Vitamin D Gehalt wird dabei nicht berücksichtigt. Zu den einzelnen Effekten gibt es mittlerweile viele Studien. Die Berücksichtigung beider Faktoren fehlt jedoch weitgehend. Dabei enthalten beide einen gemeinsamen Faktor. Die Lichtexposition fördert den Vitamin D Gehalt und gleichzeitig stabilisiert sie bei korrektem zeitlichen Einsatz den zirkadianen Rhythmus. So müssen die Forschungsverantwortlichen in der Zukunft die gesundheitlichen Effekte von Licht gesamt Betrachtend gestalten. Ein daraus ableitendes Forschungsziel kann die Ermittlung des Synergie-Effektes der beiden gesundheitlichen Aspekte sein.

Im Hinblick auf die gesundheitlichen Risiken von flimmerndem Licht ist weiterer Forschungsbedarf notwendig. Trotz der negativen Auswirkungen in den erwähnten Studien, gibt es kaum weitere Bemühungen, sodass Literatur diesbezüglich sehr rar ist. Im Rahmen eines gesundheitlichen Gesamtkonzepts sind die Wirkungen nicht zu vernachlässigen.

7. Literaturverzeichnis

- Apperly, F. L. (1941). The Relation of Solar Radiation to Cancer Mortality in North America *.
- Arns, M., Heijden, K. B. Van Der, Arnold, L. E., & Kenemans, J. L. (2013). Geographic Variation in the Prevalence of Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder The Sunny Perspective. *Biological Psychiatry*, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2013.02.010>
- Arns, M., Swanson, J. M., & Arnold, L. E. (2015). ADHD Prevalence: Altitude or Sunlight? Better Understanding the Interrelations of Dopamine and the Circadian System. <https://doi.org/10.1177/1087054715599574>
- Behrends et al. (2010). *Duale Reihe Physiologie*. Georg Thieme Verlag.
- Bess Dawson-Hughes, M.D., Susan S. Harris, D.Sc., Elizabeth A. Krall, Ph. D., and Gerard E. Dallal, P. D. (1997). EFFECT OF CALCIUM AND VITAMIN D SUPPLEMENTATION ON BONE DENSITY IN MEN AND WOMEN 65 YEARS OF AGE OR OLDER.
- Böhmer, E. (1986). *Elemente der angewandten Elektronik*.
- Bosse. (2016). Grundzüge der räumlichen Planung.
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E., & Rollag, M. D. (2001). Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, *21*(16), 6405–6412.
- Chang, A.-M., Aeschbach, D., Duffy, J. F., & Czeisler, C. A. (2014). Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(4), 201418490. <https://doi.org/10.1073/pnas.1418490112>
- Chapuy, M. C., Arlot, M. E., Delmas, P. D., Meunier, P. J., Strang, J., Griffiths, P., & Abbey, J. (1994). Effect of calcium and cholecalciferol treatment for three years on hip fractures in elderly women Survey of use of injected benzodiazepines among drug users in Britain, *308*(April), 1081–1082.
- Cheers, G. (2001). *Anatomica*.
- Christoph Schierz; Karin Bieske; Cornelia Vandahl. (2011). Projekt „Licht und Gesundheit“ - Feldstudie in Industriebetrieben.
- Craig, S. (1983). Bright White Light Alleviates Depression, 105–112.
- Dauchy, R. T., Xiang, S., Mao, L., Brimer, S., Wren, M. A., Yuan, L., ... Hill, S. M. (2014). Circadian and Melatonin Disruption by Exposure to Light at Night Drives Intrinsic Resistance to Tamoxifen Therapy in Breast Cancer, *(23)*, 1–13. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-13-3156>
- Degs, D. (2013). Prävalenz von depressiver Symptomatik und diagnostizierter Depression bei Erwachsenen in Deutschland Ergebnisse der Studie zur Gesundheit, 733–739. <https://doi.org/10.1007/s00103-013-1688-3>
- Desan, P. H., Weinstein, A. J., Michalak, E. E., Tam, E. M., Meesters, Y., Ruiters, M. J., ... Lam, R. W. (2007). A controlled trial of the Litebook light-emitting diode (LED) light therapy device for treatment of Seasonal Affective Disorder (SAD), *8*, 1–8. <https://doi.org/10.1186/1471-244X-7-38>
- Deutsche Alzheimer Gesellschaft e.V. (2015). Die Häufigkeit von Demenzerkrankungen, 1–7.
- DIN SPEC 5031-100. Deutsches Institut für Normung e.V. (2015).
- DIN SPEC 67600. Deutsches Institut für Normung e.V. (2013).
- Dr. Schweikart. (n.d.). VitaminD. Retrieved from <http://www.vitamind.net/impressum/>

- Eniola, K., Bacigalupo, A., Family, C. H., Residency, M., Carolina, N., Hill, C., & Stevermer, J. J. (2016). Light therapy for nonseasonal major depressive disorder?, *65*, 486–488.
- F. Graham Smith, Terry A. King, D. W. (2007). *Optics and Photonics*.
- F. Michael Gloth III, MD; Caren M. Gundberg, PhD; Bruce W. Hollis, P. et al. (1995). Vitamin D Deficiency in Homebound Elderly Persons. Retrieved from <http://jamanetwork.com/journals/jama/article-abstract/392220>
- Felson, D. T. (2005). Positive Association Between Serum 25- Hydroxyvitamin D Level and Bone Density in Osteoarthritis, *53*(6), 821–826. <https://doi.org/10.1002/art.21601>
- Figenschau, Y., Kjærgaard, M., Waterloo, K., Wang, C. E. A., Alma, B., Hutchinson, M. S., ... Jorde, R. (2012). Effect of vitamin D supplement on depression scores in people with low levels of serum 25-hydroxyvitamin D: nested case – control study and randomised clinical trial {, *25*, 360–368. <https://doi.org/10.1192/bjp.bp.111.104349>
- Fisher, R. S., Harding, G., Erba, G., Barkley, G. L., & Wilkins, A. (2005). Photic- and Pattern-induced Seizures : A Review for the Epilepsy Foundation of America Working Group, *46*(9), 1426–1441.
- Gall, D. (2007). *Grundlagen der Lichttechnik* (Georg Thie). Pflaum Verlag.
- Garland, C. F., & Garland, F. C. (2006). Do sunlight and vitamin D reduce the likelihood of colon cancer ?, (November 2005), 217–220. <https://doi.org/10.1093/ije/dyi229>
- Garland, F. C., Ph, D., Garland, C. F., & Young, J. F. (1990). Geographic Variation in Breast Cancer Mortality in the United States : A Hypothesis Involving Exposure to Solar Radiation, *622*, 614–622.
- Goldray, D., Merdler, C., Algoetti, A., Eisenberg, Z., & Weisman, Y. (1989). Vitamin D Deficiency in Elderly Patients in a General Hospital, 589–592.
- Hammer, R. (2013). Planungsempfehlungen auf photobiologischer Grundlage.
- Hargadon, A. B. (2001). When Innovations Meet Institutions : Edison and the Design of the Electric Light Yellowlees Douglas.
- Heo, J., Kim, K., Fava, M., Mischoulon, D., Papakostas, G. I., Kim, M., ... Jeon, J. (2016). Effects of smartphone use with and without blue light at night in healthy adults: A randomized, double-blind, cross-over, placebo-controlled comparison. *Journal of Psychiatric Research*, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2016.12.010>
- Hoffmann Frederick L. (1915). *The mortality of cancer throughout the world*. Retrieved from <https://archive.org/details/mortalityfromca00hoffgoog>
- Holick, M. F. (2007). *Vitamin D Deficiency*.
- Hoogendijk et al. (2015). Depression Is Associated With Decreased 25-Hydroxyvitamin D and Increased Parathyroid Hormone Levels in Older Adults, *65*(5), 508–512.
- IEEE Power Electronics Society. (2015). *IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers*. *IEEE Std 1789-2015*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7118618>
- Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit. (2016). Licht und Beleuchtung.
- International Agency for Research on Cancer. (2007). IARC Monographs Programme finds cancer hazards associated with shiftwork, painting and firefighting. Retrieved from <https://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2007/pr180.html>
- Jenny-Anne S. Lie Æ Jolanta Roessink Æ Kristina Kjærheim. (2006). Breast cancer and night work among Norwegian nurses, 39–44. <https://doi.org/10.1007/s10552-005-3639-2>
- Kearney. (2013). The time is now for human centric lighting ! Human Centric Lighting : Going Beyond Energy

Efficiency.

- Kirsch, D. R. (2016). Dynamisches Licht hat positiven Einfluss auf Alzheimer-Patienten. Retrieved from <https://www.baulinks.de/webplugin/2016/1586.php4>
- Kunz, D. D. INTELLUX_Abschlussbericht.pdf (2014).
- Lam, R. W., Levitt, A. J., Levitan, R. D., Michalak, E. E., Cheung, A. H., Morehouse, R., ... Tam, E. M. (2016). Efficacy of Bright Light Treatment, Fluoxetine, and the Combination in Patients With Nonseasonal Major Depressive Disorder A Randomized Clinical Trial. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2015.2235>
- Lennings, F. (2012). Schichtarbeit unter demografischen Herausforderungen, 147–151.
- Lewy, A. J., Wehr, T. A., Goodwin, F. K., Newsome, D. A., & Markey, S. P. (1980). Light Suppresses Melatonin Secretion in Humans Published by : American Association for the Advancement of Science Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/1684491>, 210(4475), 1267–1269.
- Lips, P., Graafmans, W. C., Ooms, M. E., Bezemer, P. D., & Bouter, L. M. (1996). Vitamin D Supplementation and Fracture Incidence in Elderly Persons, (16).
- Lucas, R. J., Peirson, S., Berson, D. M., Brown, T. M., Howard, M., Czeisler, C. A., ... George, C. (2016). Measuring and using light in the melanopsin age, 37(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>.Lucas
- Lütz, D. med. A. (2016). Delir bei kritisch kranken Patienten: Ein Systemansatz zur Diagnostik, nichtpharmakologischen Prävention und Therapie, (August 2016).
- Martin Marcus, Taghi Yasamy, Mark van Ommeren, D. C. & S. S. (2012). Depression - WHO Department of Mental Health and Substance Abuse, 6–8.
- Martin Mißfeldt. (n.d.). Lasikon. Retrieved from <https://www.lasikon.de/auge/netzhaut-retina/>
- Mccurry, S. M., Iii, C. F. R., Ancoli-israel, S., Teri, L., & Vitiello, M. V. (2000). Treatment of sleep disturbance in Alzheimer ' s disease, 4(6), 603–628. <https://doi.org/10.1053/smr.2000.0127>
- Melissa K. Thomas, M.D., Ph. D., Donald M. Lloyd –Jones, M.D., Barrett T. Kitch, M.D., Eleftherios C.Vamvakas, M.D., Ph. D. , Ian M. Dick, M.Sc., Richard L.Prince, M.D., and Joel S. Finkelstein, M. D. A. (1998). HYPOVITAMINOSIS D IN MEDICAL INPATIENTS, 777–783.
- Meyer, H. E., Smedshaug, G. B., Kvaavik, E., Falch, J. A. N. A., Tverdal, A., & Pedersen, J. A. N. I. (2002). Can Vitamin D Supplementation Reduce the Risk of Fracture in the Elderly ? A Randomized Controlled Trial INTRODUCTION, 17(4), 709–715.
- Nagel, D. rer. nat. G. (2014). Onmeda-Melatonin. Retrieved from <http://www.onmeda.de/anatomie/melatonin-wirkung-16667-3.html>
- Parkin, D. M., Bray, F. I., & Devesa, S. S. (2001). Cancer burden in the year 2000 . The global picture, 37, 4–66.
- Phototransduction, M. (2008). 1.20 Melanopsin Cells, 423–431.
- Plischke, P. H. (2016). Neues zur Bewertung von nicht-visuellen Wirkungen in der Praxis.
- Prince, P. M., Prince, M., Prince, M., Karagiannidou, M., Prince, M., Karagiannidou, M., ... Prince, M. (2016). World Alzheimer Report 2016 Improving healthcare for people living with dementia.
- Prof. Jürgen Platte. (n.d.). Kurzinfo zum Beleuchtungschaos. Retrieved from <http://www.netzmafia.de/skripten/hardware/Licht/>
- Raue, W. (2011). Onmeda-Serotonin. Retrieved from <http://www.onmeda.de/anatomie/serotonin.html>
- Ringe, P. D. med. J. D. (2010). Querschnittsstudie zur Abschätzung des Vitamin-D – Status in der Bevölkerung in Deutschland, (April).

- Robert-Koch Institut. (2016). Bericht zum Krebsgeschehen in Deutschland 2016.
- Roe, C. M., Ph, D., Birge, S. J., & Morris, J. C. (2006). Vitamin D Deficiency Is Associated With Low Mood and Worse Cognitive Performance in Older Adults, (December), 1032–1040. <https://doi.org/10.1097/01.JGP.0000240986.74642.7c>
- Rosenthal NE, Sack DA, Gillin JC, Lewy AJ, Goodwin FK, Davenport Y, et al. (1984). Seasonal affective disorder. A description of the syndrome and preliminary findings with light therapy.
- Schernhammer, E. S., Kroenke, C. H., Laden, F., & Hankinson, S. E. (2006). Night Work and Risk of Breast Cancer, *17*(1), 108–111. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000190539.03500.c1>
- Schernhammer, E. S., Speizer, F. E., Walter, C., Hunter, D. J., & Colditz, G. A. (2001). Rotating Night Shifts and Risk of Breast Cancer in Women Participating in the Nurses ' Health Study, *93*(20), 1563–1568.
- Silbernagl, S. (2007). *Taschenatlas Physiologie*. Georg Thieme Verlag.
- Sust, C. A., Gmbh, A., Freiburg, G., Dehoff, P., Gmbh, Z., Hallwirth-spörk, C., ... Wohlbefinden, P. (2014). Mehr Licht! Verbesserung des Wohlbefindens durch biologisch wirksames Licht bei Demenzkranken Kurzfassung Demenz und Licht / Beleuchtung Konzeption und Realisierung der Feldstudie.
- Swaab, D. F., & Hoogendijk, W. J. G. (2014). Effect of Bright Light and Melatonin on Cognitive and Noncognitive Function in Elderly Residents of Group Care Facilities, *299*(22).
- Takada, H., Aso, K., Watanabe, K., Okumura, A., Negoro, T., & Ishikawa, T. (1999). Epileptic Seizures Induced by Animated Cartoon , “ Pocket Monster ”, *40*(7), 997–1002.
- Telleen, S. (n.d.). Openstax CNX. Retrieved from https://www.eyeglass24.de/blog/wissenswertes/farbwahrnehmung_gelb/
- Thapan, K., Arendt, J., & Skene, D. J. (2001). An action spectrum for melatonin suppression : evidence for a novel non-rod , non-cone photoreceptor system in humans, 261–267.
- Trivedi, D. P., Doll, R., & Khaw, K. T. (2003). Effect of four monthly oral vitamin D 3 (cholecalciferol) supplementation on fractures and mortality in men and women living in the community: randomised double blind controlled trial, *326*(March), 1–6.
- Veitch, J. A., Ph, D., Mccoll, S. L., & Hons, B. S. (1995). Modulation of fluorescent light : flicker rate and light source effects on visual performance and visual comfort Veitch , J . A . ; McColl , S . L . Modulation of Fluorescent Light : Flicker Rate and Light Source Effects on Visual Performance and Visual Co, (4), 243–256.
- Völker, S. (2016). Mythen und Wahrheiten über nicht-visuelle Effekte - Ein Überblick zum Stand der Forschung.
- Waßmer, D. T., Bieg, D. S., & Maelicke, P. D. A. (n.d.). Melatoninsynthese. Retrieved from <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/8/bc/vlu/botenstoffe/einleitung.vlu/Page/vsc/de/ch/8/bc/botenstoffe/hormone/melatonin.vscml.html>
- Wilkins, Nimmo-Smith, Slater, B. (1989). Fluorescent lighting, headaches and eyestrain, *21*(1), 11–18.
- Wilkins, a. (1986). Intermittent illumination from visual display units and fluorescent lighting affects movements of the eyes across text. *Human Factors*.
- Wirkus, D. med. M. O. (n.d.). Flexikon.Doccheck. Retrieved from <http://flexikon.doccheck.com/de/Arthrose>
- Witting, W., Kwa, I. H., Eikelenboom, P., Mirmiran, M., & Swaab, D. F. (1990). Alterations in the Circadian Rest-Activity Rhythm in Aging and Alzheimer ' s Disease, 563–572.
- Zentrum der Gesundheit. (2017a). Serotonin – Das Glückshormon, 1–11.
- Zentrum der Gesundheit. (2017b). Serotoninspiegel natürlich erhöhen, 1–16.

8. Anhangsverzeichnis

Anhang A: Lebensmittel mit hohem Vitamin D Gehalt

Anhang B: Wirkungsspektrum für melanopische Wirkung von Licht $S_{\text{mel}}(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ

Anhang C: Melanopische Wirkungsfaktoren $a_{\text{mel},v}$ und Korrekturfaktoren $k_{\text{mel,trans}}$ für altersabhängige Linsentransmission bei unterschiedlichen Lichtquellen

Anhang A: Lebensmittel mit hohem Vitamin D Gehalt

Lebensmittel	Gehalt Vitamin D µg/100g	Gehalt IE /100g
Lebertran (D3)	300	12.000
Aal, geräuchert (D3)	90	3600
Bückling (D3)	30	1200
Hering Atlantik (D3)	25	1000
Aal (D3)	20	800
Lachs (D3)	16	640
Sardinen (D3)	10	400
Austern (D3)	8	320
Margarine (D3, künstl. angereichert)	2,5-7,5	100-300
Avocado (D2)	5	200
Thunfisch (D3)	4,5	180
Makrele (D3)	4	160
Steinpilze (D2)	3	120
Hühnerei (D3)	2,9	116
Champignons (D2)	2	80
Pfifferlinge (D2)	2	80
Rinderleber (D3)	1,7	68
Gouda (D3)	1,3	52
Butter (D3)	1	40
Kalbsleber (D3)	0,3	12

Anhang B: Wirkungsspektrum für melanopische Wirkung von Licht $S_{mel}(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ

λ nm	$S_{mel}(\lambda)$	λ nm	$S_{mel}(\lambda)$	λ nm	$S_{mel}(\lambda)$	λ nm	$S_{mel}(\lambda)$	λ nm	$S_{mel}(\lambda)$
380	9,181 65 E-04	410	4,615 50 E-02	440	4,015 87 E-01	470	8,602 91 E-01	500	9,659 52 E-01
381	1,045 57 E-03	411	5,178 22 E-02	441	4,164 72 E-01	471	8,729 25 E-01	501	9,588 44 E-01
382	1,178 58 E-03	412	5,778 04 E-02	442	4,307 97 E-01	472	8,848 70 E-01	502	9,507 16 E-01
383	1,322 79 E-03	413	6,429 72 E-02	443	4,449 21 E-01	473	8,962 42 E-01	503	9,417 78 E-01
384	1,483 81 E-03	414	7,148 01 E-02	444	4,592 03 E-01	474	9,071 58 E-01	504	9,322 36 E-01
385	1,667 24 E-03	415	7,947 66 E-02	445	4,740 02 E-01	475	9,177 34 E-01	505	9,222 99 E-01
386	1,881 02 E-03	416	8,918 07 E-02	446	4,895 17 E-01	476	9,283 45 E-01	506	9,118 32 E-01
387	2,129 89 E-03	417	1,007 56 E-01	447	5,055 22 E-01	477	9,389 50 E-01	507	9,006 02 E-01
388	2,414 57 E-03	418	1,132 56 E-01	448	5,217 41 E-01	478	9,490 35 E-01	508	8,886 63 E-01
389	2,735 83 E-03	419	1,257 32 E-01	449	5,378 98 E-01	479	9,580 91 E-01	509	8,760 73 E-01
390	3,094 42 E-03	420	1,372 37 E-01	450	5,537 15 E-01	480	9,656 05 E-01	510	8,628 88 E-01
391	3,507 06 E-03	421	1,474 46 E-01	451	5,691 00 E-01	481	9,719 76 E-01	511	8,488 01 E-01
392	3,990 78 E-03	422	1,570 14 E-01	452	5,842 40 E-01	482	9,778 33 E-01	512	8,336 78 E-01
393	4,546 79 E-03	423	1,664 63 E-01	453	5,992 81 E-01	483	9,830 06 E-01	513	8,178 32 E-01
394	5,176 25 E-03	424	1,763 16 E-01	454	6,143 70 E-01	484	9,873 25 E-01	514	8,015 79 E-01
395	5,880 35 E-03	425	1,870 96 E-01	455	6,296 54 E-01	485	9,906 21 E-01	515	7,852 33 E-01
396	6,693 34 E-03	426	1,992 10 E-01	456	6,451 93 E-01	486	9,933 43 E-01	516	7,687 18 E-01
397	7,651 02 E-03	427	2,124 08 E-01	457	6,608 92 E-01	487	9,958 87 E-01	517	7,518 07 E-01
398	8,756 94 E-03	428	2,262 25 E-01	458	6,766 60 E-01	488	9,980 08 E-01	518	7,345 93 E-01
399	1,001 46 E-02	429	2,401 99 E-01	459	6,924 09 E-01	489	9,994 61 E-01	519	7,171 69 E-01
400	1,142 77 E-02	430	2,538 65 E-01	460	7,080 49 E-01	490	1,000 00 E+00	520	6,996 28 E-01
401	1,307 67 E-02	431	2,670 21 E-01	461	7,235 94 E-01	491	9,995 61 E-01	521	6,818 88 E-01
402	1,503 97 E-02	432	2,799 76 E-01	462	7,391 05 E-01	492	9,983 65 E-01	522	6,638 81 E-01
403	1,731 66 E-02	433	2,930 34 E-01	463	7,545 60 E-01	493	9,965 90 E-01	523	6,457 24 E-01
404	1,990 71 E-02	434	3,065 00 E-01	464	7,699 38 E-01	494	9,944 16 E-01	524	6,275 33 E-01
405	2,281 12 E-02	435	3,206 79 E-01	465	7,852 16 E-01	495	9,920 22 E-01	525	6,094 22 E-01
406	2,631 94 E-02	436	3,360 16 E-01	466	8,006 83 E-01	496	9,887 92 E-01	526	5,913 39 E-01
407	3,059 64 E-02	437	3,523 61 E-01	467	8,163 54 E-01	497	9,842 20 E-01	527	5,732 07 E-01
408	3,545 38 E-02	438	3,691 28 E-01	468	8,317 98 E-01	498	9,786 57 E-01	528	5,551 05 E-01
409	4,070 28 E-02	439	3,857 32 E-01	469	8,465 87 E-01	499	9,724 51 E-01	529	5,371 12 E-01
530	5,193 09 E-01	570	5,870 13 E-02	610	2,176 98 E-03	650	8,657 51 E-05	690	4,788 04 E-06
531	5,016 45 E-01	571	5,448 32 E-02	611	2,003 17 E-03	651	8,024 05 E-05	691	4,473 47 E-06
532	4,840 67 E-01	572	5,048 89 E-02	612	1,841 90 E-03	652	7,433 83 E-05	692	4,178 29 E-06
533	4,666 43 E-01	573	4,673 44 E-02	613	1,693 17 E-03	653	6,886 50 E-05	693	3,902 43 E-06
534	4,494 42 E-01	574	4,323 57 E-02	614	1,556 92 E-03	654	6,381 72 E-05	694	3,645 83 E-06
535	4,325 33 E-01	575	4,000 89 E-02	615	1,433 14 E-03	655	5,919 14 E-05	695	3,408 41 E-06
536	4,158 62 E-01	576	3,701 02 E-02	616	1,319 72 E-03	656	5,492 03 E-05	696	3,187 39 E-06
537	3,993 72 E-01	577	3,419 03 E-02	617	1,214 51 E-03	657	5,093 74 E-05	697	2,979 98 E-06
538	3,831 36 E-01	578	3,155 62 E-02	618	1,117 43 E-03	658	4,724 04 E-05	698	2,786 04 E-06
539	3,672 24 E-01	579	2,911 53 E-02	619	1,028 39 E-03	659	4,382 69 E-05	699	2,605 48 E-06
540	3,517 07 E-01	580	2,687 47 E-02	620	9,473 13 E-04	660	4,069 45 E-05	700	2,438 19 E-06
541	3,365 37 E-01	581	2,480 14 E-02	621	8,728 14 E-04	661	3,779 90 E-05	701	2,282 25 E-06
542	3,216 47 E-01	582	2,285 97 E-02	622	8,035 76 E-04	662	3,509 66 E-05	702	2,135 80 E-06
543	3,070 85 E-01	583	2,105 34 E-02	623	7,396 20 E-04	663	3,258 57 E-05	703	1,998 74 E-06
544	2,928 99 E-01	584	1,938 64 E-02	624	6,809 70 E-04	664	3,026 47 E-05	704	1,871 01 E-06
545	2,791 35 E-01	585	1,786 24 E-02	625	6,276 48 E-04	665	2,813 20 E-05	705	1,752 52 E-06
546	2,657 37 E-01	586	1,645 78 E-02	626	5,787 53 E-04	666	2,615 87 E-05	706	1,641 97 E-06
547	2,526 48 E-01	587	1,514 70 E-02	627	5,333 58 E-04	667	2,431 58 E-05	707	1,538 06 E-06
548	2,399 17 E-01	588	1,393 14 E-02	628	4,914 40 E-04	668	2,260 17 E-05	708	1,440 73 E-06
549	2,275 92 E-01	589	1,281 20 E-02	629	4,529 80 E-04	669	2,101 48 E-05	709	1,349 93 E-06
550	2,157 22 E-01	590	1,179 01 E-02	630	4,179 55 E-04	670	1,955 35 E-05	710	1,265 60 E-06
551	2,042 38 E-01	591	1,084 88 E-02	631	3,857 89 E-04	671	1,819 82 E-05	711	1,186 83 E-06
552	1,930 75 E-01	592	9,971 12 E-03	632	3,559 05 E-04	672	1,693 02 E-05	712	1,112 73 E-06
553	1,822 88 E-01	593	9,158 50 E-03	633	3,282 89 E-04	673	1,574 93 E-05	713	1,043 26 E-06
554	1,719 30 E-01	594	8,412 42 E-03	634	3,029 26 E-04	674	1,465 53 E-05	714	9,783 85 E-07
555	1,620 56 E-01	595	7,734 30 E-03	635	2,798 01 E-04	675	1,364 80 E-05	715	9,180 78 E-07
556	1,526 01 E-01	596	7,112 55 E-03	636	2,585 44 E-04	676	1,271 43 E-05	716	8,617 05 E-07
557	1,434 87 E-01	597	6,534 76 E-03	637	2,387 85 E-04	677	1,184 07 E-05	717	8,086 40 E-07
558	1,347 48 E-01	598	6,001 10 E-03	638	2,205 08 E-04	678	1,102 69 E-05	718	7,588 53 E-07
559	1,264 16 E-01	599	5,511 74 E-03	639	2,036 99 E-04	679	1,027 23 E-05	719	7,123 13 E-07
560	1,185 26 E-01	600	5,066 86 E-03	640	1,883 41 E-04	680	9,576 37 E-06	720	6,689 91 E-07

Anhang C: Melanopische Wirkungsfaktoren $a_{\text{mel},v}$ und Korrekturfaktoren $k_{\text{mel,trans}}$ für altersabhängige Linsentransmission bei unterschiedlichen Lichtquellen

Lichtart	$a_{\text{mel},v}$	$k_{\text{mel,trans}}(25)$	$k_{\text{mel,trans}}(32)$	$k_{\text{mel,trans}}(50)$	$k_{\text{mel,trans}}(75)$	$k_{\text{mel,trans}}(90)$
LED, weiß ($T_f= 3\ 075\ \text{K}$)	0,387	1,044	1,000	0,857	0,634	0,510
LED, weiß ($T_f= 4\ 250\ \text{K}$)	0,669	1,047	1,000	0,845	0,603	0,470
LED, weiß ($T_f= 5\ 400\ \text{K}$)	0,713	1,052	1,000	0,833	0,580	0,447
LED, weiß ($T_f= 6\ 535\ \text{K}$)	0,725	1,054	1,000	0,829	0,578	0,448
Leuchtstofflampe, weiß ($T_f= 8\ 000\ \text{K}$)	0,867	1,055	1,000	0,825	0,569	0,437
Leuchtstofflampe, weiß ($T_f= 13\ 650\ \text{K}$)	1,004	1,059	1,000	0,813	0,546	0,411

Eigenständigkeitserklärung zur Bachelorthesis

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen Quellen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

Die Arbeit wurde noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt.

München, den 09.10.17

.....

Vyacheslav Parkhayev