

# Zuverlässige Stromversorgung durch optimierte Lichtbedingungen zur Erhaltung der Vigilanz bei Überwachungstätigkeiten

Rico Ganßauge<sup>i</sup>, Annette Hoppe<sup>ii</sup>

<sup>i</sup> Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus, Lehrgebiet Arbeitswissenschaft/ Arbeitspsychologie, Tel: +49 (0)355 695047, Fax: +49 (0)355 694866, rico.ganssaue@tu-cottbus.de, www.tu-cottbus.de/awip

<sup>ii</sup> Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus, Lehrgebiet Arbeitswissenschaft/ Arbeitspsychologie, Tel: +49 (0)355 694824, Fax: +49 (0)355 694866, sekr-awip@tu-cottbus.de, www.tu-cottbus.de/awip

**Kurzfassung:** Bedingt durch vielfältige neue Herausforderungen im Zuge der weiteren Verbreitung erneuerbarer Energien steigen ebenfalls die Anforderungen an die Stromnetze. Das bedingt wiederum für die in den Kraftwerksleitwarten tätigen Mitarbeiter eine Veränderung der Belastungen. Es muss bei Grundlastkraftwerken wesentlich schneller auf sich verändernde und zum Teil schwer vorhersehbare Einleitungen von Energie in die Netze reagiert werden, da in Deutschland mit dem so genannten Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) der Vorrang von Strom aus regenerativen Quellen festgeschrieben worden ist. Dessen Einspeisung lässt sich jedoch nicht in jedem Fall präzise vorhersehen, wie z.B. bei Windstromerzeugung. Auch unter diesen gewachsenen Anforderungen muss die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stromversorgung gewährleistet werden. Wache und reaktionsfähige Operateure in den Leitwarten gewährleisten hierfür einen sicheren Betrieb. Im Folgenden soll eine laborexperimentelle Studie vorgestellt werden, in der untersucht wird, inwieweit veränderte Lichtbedingungen die Wachheit und damit die Reaktionsfähigkeit der Operateure kurzfristig unterstützen können. Im Ergebnis lassen sich die Erkenntnisse in ein umfassendes Lichtszenario eingliedern, das den Bedürfnissen des arbeitenden Menschen angepasster erscheint als die derzeit vorherrschenden statischen Beleuchtungen.

**Keywords:** psychische Beanspruchung, Vigilanz, Überwachungstätigkeit, Pupillographie, Beleuchtung

## 1. Einleitung

Arbeitsplätze in Leitwarten stellen durch ihre stark wechselnden Anforderungen eine besondere Herausforderung in der arbeitswissenschaftlichen Betrachtung dar. Dabei enthalten sie erhebliche Anteile an reiner Überwachungstätigkeit. Dies trifft beispielsweise für große Zeitanteile während des so genannten Normalbetriebs zu, der überwiegend automatisch geregelt wird. Dieser Tätigkeitsanteil wirkt sich aufgrund der geringen Aktivierung des arbeitenden Menschen unter Umständen langfristig ungünstig auf den Erhalt der Wachheit und Aufmerksamkeit aus. Auf der anderen Seite können sehr kurzfristig und unvorhersehbar Störungen in den Kraftwerksprozessen auftreten. Bei diesen ist höchste Konzentration, Reaktionsfähigkeit und Wachheit erforderlich, um mit gezielten Handeingriffen

das anstehende Problem zu lösen und die Betriebssicherheit und Stabilität der Stromversorgung wieder herzustellen. Werden diese Situationen nicht angemessen gelöst, droht Überforderung durch Technikstress (Hoppe, 2009). Zudem besteht generell ein hoher Verantwortungs- und Handlungsdruck an diesen hochkomplexen Arbeitsplätzen. Überwiegend sind Kraftwerkswarten im kontinuierlichen Schichtbetrieb besetzt. Bei einem Teil der Warten besteht kein oder nur ein sehr geringer Eintrag von Tageslicht, weshalb sie auch am Tage überwiegend künstlich beleuchtet werden. Seit einiger Zeit ist bekannt, dass Licht in einem Wellenbereich von 380 – 580nm die Ausschüttung des „Schlafhormons“ Melatonin unterdrückt. In Deutschland ist dies bereits in einen Norm-Entwurf zur biologischen Wirkung von Licht eingeflossen: der DIN V 5031-100. Es wurden spezielle Rezeptorzellen im Auge nachgewiesen, die für Licht in diesem Wellenbereich besonders empfindlich sind (Berson, Dunn & Takao, 2002). Diese beeinflussen indirekt vermittelt über weitere Zwischenstationen im menschlichen Gehirn die circadiane Rhythmik und insbesondere den Schlaf-/ Wachrhythmus. Damit liegt die Vermutung nahe, dass auch positive Wirkungen auf den Erhalt und die Steigerung von Aufmerksamkeit und Wachheit erzielt werden können. Momentan sind die langfristigen Auswirkungen vor allem auf die Verschiebung des circadianen Rhythmus bei Nacharbeit noch nicht befriedigend geklärt. Diese können von kleineren Beeinträchtigungen des Befindens bis zu starken Auswirkungen auf die Gesundheit reichen (Erren et. al. 2010), wobei die Datenlage hierbei noch relativ ungenügend abgesichert ist.

## **2. Zielstellung**

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die kurzfristigen Auswirkungen von Licht im biologisch wirksamen Wellenbereich auf die Aufmerksamkeit nachzuweisen. Die hier beschriebene Untersuchung liefert einen Ansatz zur Absicherung des Wellenlängenbereiches für die aktivierende Wirkung von Licht beim Menschen. Dieser Bereich wird vorläufig noch mit jenem für die Melatoninunterdrückung nachgewiesenen als identisch angenommen (DIN V 5031:100, S.8). Bei einem positiven Nachweis der Wirkungen, können die Erkenntnisse im Rahmen eines sich kurzfristig anpassenden Lichtszenarios, z.B. speziell für kritische Situation, eingesetzt werden. Die wissenschaftliche Arbeit leistet somit einen wirksamen Beitrag zur Sicherheit und Verfügbarkeit der Stromversorgung. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich dabei auch auf andere Leitwartenumgebungen übertragen, beispielsweise in ähnlichen komplexen Industrieanlagen oder bei der Polizei und Feuerwehr.

## **3. Theoretischer Hintergrund**

### **3.1 Wirkungsweise des Lichts**

Der Mensch ist üblicherweise tagaktiv. Moderne hochkomplexe Arbeitsplätze erfordern jedoch oft eine Besetzung im Schichtbetrieb rund um die Uhr. Dies trifft insbesondere auch auf Leitwarten in den Netzleitstellen der Stromversorgung zu. Schwierigkeiten durch diese der circadianen Rhythmik entgegenstehenden Arbeitszeiten ergeben sich dabei nicht nur ausschließlich in der Nachtschicht. Im Folgenden soll eine ausreichende Beleuchtungsstärke

als ein wichtiger Faktor auf die Vigilanz des Menschen dargestellt werden. Durch die Beeinflussung der Wachheit entsteht eine Möglichkeit für das Erbringen der Aufmerksamkeitsleistung bei wenig relevanten Reizen. Die hier beschriebene Wachheit wird als „Vigilanz“ definiert (Rützel, 1977). Die Rolle des Lichtes für die Erhaltung der Wachheit und damit der Aufmerksamkeit wurde lange Zeit ungenügend untersucht. Ausgegangen wurde von der Annahme, dass eine Art „innere Uhr“ existiert, die relativ unabhängig von äußeren Einflüssen die circadiane Rhythmik regelt (Zulley & Knab, 2009). In den so genannten „Bunkerexperimenten“ von Aschoff in den 50er und 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts konnte nachgewiesen werden, dass diese „innere Uhr“ zwar existiert, sie jedoch durch externe Zeitgeber (hier vor allem Tageslicht) „getaktet“ wird. Ohne diese Zeitgeber würde der innere Tages-Rhythmus bei einer großen Anzahl von Menschen 24,7 – 25,2h lang sein. (Ehlert & von Känel 2011, S.133). Der Unterschied in der Länge des Rhythmus' bedingt noch eine Aufteilung in so genannte „Morgen“- und „Abendtypen“, wobei diejenigen Menschen mit den kürzeren Rhythmen im Gegensatz zu den späteren „Abendtypen“ ihr Leistungsmaximum schon eher erreichen. Dies besitzt teilweise Relevanz für die Gestaltung von Schichtarbeit und wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durch die Erfassung des Typus mittels Fragebogen „D-MEQ“ (Griefahn et. al. 2001) berücksichtigt. Die Taktung bzw. Adjustierung der inneren Zeitgeber erfolgt durch Licht und über die Ausschüttung des so genannten „Schlafhormons“ Melatonin. Dabei wird durch Licht über verschiedene Zwischenstationen die Ausschüttung unterdrückt bzw. bei fehlendem Licht die Ausschüttung angestoßen. Lange Zeit war dabei unklar, welche Rezeptorzellen im menschlichen Auge dabei für die Aufnahme der Reizinformation zuständig sind. Schließlich konnten Belege gefunden werden, dass es sich um neuentdeckte Rezeptorzellen im Auge handeln muss, die nichts mit dem bekannten System aus Stäbchen und Zapfen für das visuelle Sehen zu tun haben. (Thapan, Arendt & Skene 2001). Der Nachweis gelang ein Jahr später (Berson, Dunn, Takao 2002), dass dieser Rezeptortyp besonders stark auf Licht im kurzwelligeren Bereich reagiert, das in der menschlichen Wahrnehmung eher blau erscheint.

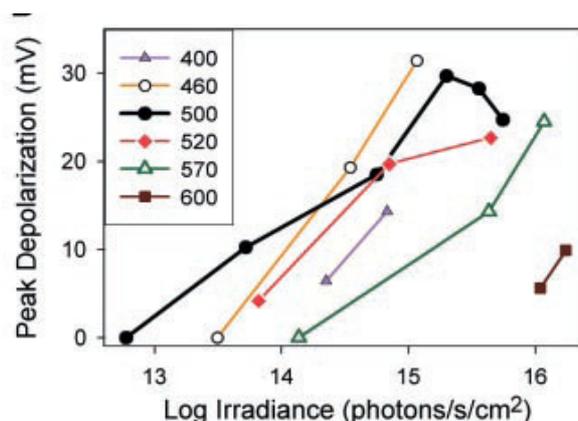


Abb. 1: Depolarisation der Zellen bei Bestrahlung mit Licht unterschiedlicher Wellenlängen, Quelle: Berson, Dunn & Takao 2002

Das Maximum, in dem diese Zellen die meisten Signale senden, liegt demnach bei 460-500nm, während vor allem größere Wellenlängen des sichtbaren Lichts eine viel geringere Wirksamkeit der Unterdrückung von Melatonin aufweisen. Neben diesen positiven und erwünschten Effekten kann dabei die Unterdrückung von Melatonin möglicherweise auch

ungünstige gesundheitliche Effekte haben. Dies trifft für Arbeitende in Nachtschichten zu und damit auch für die Leitwarten der Stromversorgung. Da Melatonin im menschlichen Körper nachweislich Reparatur- und Regenerationsvorgänge einleitet, kann dessen langfristige Unterdrückung die erwähnten ungünstigen Folgen haben (BGAG 2009, S.14f.). Deshalb ist das Lichtszenario in der vorliegenden Studie kurzfristig ausgerichtet und wird dem Probanden nur ca. 30 min dargeboten.

### 3.2 Bedeutung der Vigilanz bei Überwachungstätigkeiten und deren Bestimmung

Oft besteht die Tätigkeit in Leitwarten zu einem erheblichen Anteil aus einem automatisch geregelten Normalbetrieb. Das bedeutet für den Mitarbeiter in der Leitwarte zum Großteil die Überwachung der Technik, wobei eigene Handlungen in den Hintergrund treten. Dies trifft in hohem Maße auf Leitwarten in Kraftwerken und der Prozessindustrie zu, in vergleichbarem wenn auch etwas geringerem Maße jedoch ebenfalls auf Leitwarten der Netzsteuerung. Dies sind die so genannten „Ironien der Automatisierung“, wie sie seit dem Artikel von Bainbridge (1983) vielfach zitiert wurden. Die Tätigkeit verlangt dabei nach einer wachen Reaktionsfähigkeit, trägt jedoch durch ihre relative Eintönigkeit und Abwechslungsarmut selbst wenig dazu bei, diese zu erhalten oder zu steigern. Neue Herausforderungen ergeben sich zusätzlich durch die verstärkte Einleitung von erneuerbaren Energien in die Netze (vdi-Nachrichten, 2011). Zu diesen gehören, dass bei einer ohnehin teils schon angespannten Situation der Stromnetze durch Kapazitätsengpässe, zusätzliche Handlungsfehler durch herabgesetzte Wachsamkeit und Reaktionsfähigkeit des Bedienpersonals noch schwerwiegendere Auswirkungen haben könnten. Die Messung der Wachheit als wichtige Voraussetzung für eine Vigilanzleistung erfolgt dabei mittels eines pupillographischen Messgerätes. Bei dieser Methode stellt die Fluktuation des Pupillendurchmessers ein Maß für die Wachheit des Probanden dar. Dazu muss der Proband entweder in einer dunklen Umgebung sein oder sein Sichtfeld entsprechend abgedunkelt sein. Grund dafür ist, dass der Pupillendurchmesser ebenfalls durch die Adaption an unterschiedliche Helligkeiten fluktuiert und dieser Effekt die Messung verfälschen würde. Im vorliegenden Fall wird dabei das mobile System „F2D“ der Firma Amtech Dossenheim verwendet. Die für eine aussagekräftige Messung wichtigen Gütekriterien Objektivität, Gültigkeit und Zuverlässigkeit werden durch das Gerät erfüllt (Wilhelm et. al., 2001).

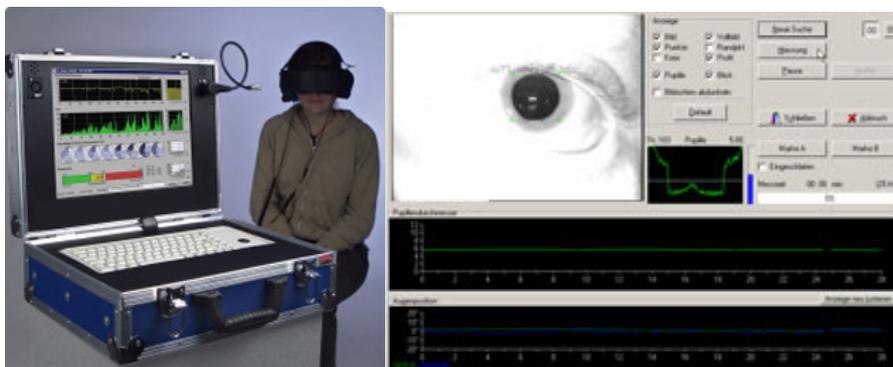


Abbildung 2: pupillometrisches Messgerät und Vorgang der Messung

Neben anderen Verfahren zu Messung von Wachheit, wie beispielsweise der Messung der Körperkerntemperatur oder der so genannten Posturografie (Messung der Standsicherheit einer Person) bietet die Methode im Labor und im Feld den Vorteil der relativ schnellen und unkomplizierten Durchführbarkeit. Ergänzend wird der Fragebogen Karolinska Sleepiness Scale (KSS, Akerstedt und Gillberg, 1990) eingesetzt. Dieser weist ebenfalls zufriedenstellende Gütekriterien auf und bedeutet nur einen geringen Mehraufwand der Durchführung.

#### **4. Laborexperimentelle Studie**

Um die eingangs erläuterte Zielstellung zu verfolgen, wird in einer laborexperimentellen Studie die Wirkung unterschiedlicher Beleuchtungsbedingungen auf die Wachheit sowie die Leistung in einer Überwachungsaufgabe geprüft. Die Überwachungsaufgabe dauert dabei ca. 30 min., in denen in zufälliger, nicht vorhersehbarer Abfolge bestimmte Reize dargeboten werden, die sich von den übrigen, sehr häufig dargebotenen Reizen nur gering unterscheiden. Trotz des nur geringen Unterschiedes sind sie jedoch bei entsprechender Aufmerksamkeit ausreichend wahrnehmbar. Die Leistung in dieser Aufgabe wird ermittelt durch die Fehleranzahl und die Reaktionszeiten. Bei der Fehleranzahl wird differenziert in Fehler erster Art und Fehler zweiter Art. Fehler erster Art sind dabei Reize ohne nachfolgende Tastenbetätigungen seitens der Probanden. Fehler zweiter Art sind Tastenbetätigungen ohne vorhergehende Reize. Die Überwachungsaufgabe wird dabei einmal unter einer Lichtbedingung mit biologisch wirksamen Anteilen (380-580 nm) durchgeführt. Das Licht wirkt optisch eher bläulich, so wird diese Versuchsbedingung nachfolgend als „Blau“ bezeichnet. Der zweite Versuchsdurchgang erfolgt unter einer Lichtbedingung ohne diese Anteile (580-780 nm). Dieses Licht dagegen wirkt optisch eher rötlich, die Versuchsbedingung wird nachfolgend mit „Rot“ bezeichnet. Die Beleuchtungsstärke wird für beide Versuchsbedingungen mit 500 lx konstant gehalten und orientiert sich an den gängigen Normen für Arbeitsplätze in Büro- und Leitwartenumgebungen (DIN 11064-6: 2005; DIN 5035-7: 2004). Es erfolgt eine Wiederholungsmessung der gleichen Versuchspersonen, da Lerneffekte bei dieser Aufgabe weitestgehend auszuschließen sind. Zusätzlich wird die Abfolge der Versuchsbedingungen permutiert, um möglichen Reihfolgeeffekten zu begegnen. Neben der Leistung in der Überwachungsaufgabe wird ebenfalls die Auswirkung der Lichtbedingung auf die Wachheit/ Ermüdung mit Hilfe eines pupillographischen Schläfrigkeitstests („F2D“ der Firma Amtech aus Dossenheim) ermittelt. Der Wert für die Wachheit bzw. Ermüdung wird anhand der Fluktuationen des Pupillendurchmessers der Versuchsperson bestimmt. Da Wachheit eine wichtige Voraussetzung für das Erbringen einer Aufmerksamkeitsleistung darstellt, wird die Auswirkung darauf mit erfasst. Gleichzeitig werden Kovariablen, die ebenfalls einen Einfluss auf die Vigilanz haben könnten (z.B. Schlafgewohnheiten und -dauer), mittels Fragebogen erfasst und können so kontrolliert und in die statistische Auswertung der Daten mit einbezogen werden.

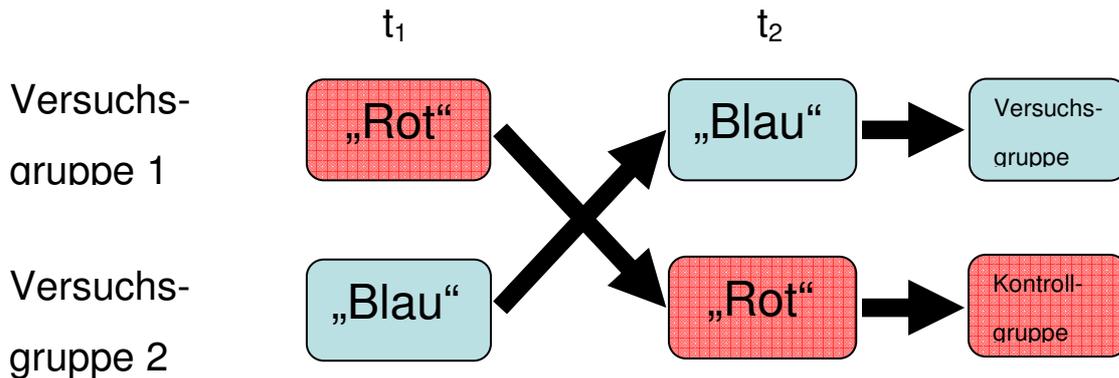


Abb. 4: schematische Darstellung des Versuchsdesigns mit Wiederholungsmessung

Zwei Hypothesen konnten abgeleitet werden:

- die Wachheit sollte unter der Versuchsbedingung „Blau“ besser sein als unter der Versuchsbedingung „Rot“.
- die Anzahl der Fehler in der Testaufgabe sollte in der Versuchsbedingung „Blau“ geringer sein als in der Versuchsbedingung „Rot“.

Zusammen genommen sollte also die Vigilanz unter der Versuchsbedingung „Blau“ besser sein als unter der Versuchsbedingung „Rot“.

Neben dieser geschilderten Laborstudie wird zusätzlich diese Methode in der industriellen Praxis eingesetzt, indem in unterschiedlichen Leitwarten eines Großkraftwerkes die Wachheit mit dem pupillographischen Messgerät während der Nachtschicht ermittelt wird. Diese Warten besitzen unterschiedliche Umgebungsbedingungen und eine unterschiedliche Anzahl Visualisierungsmittel, bedingt durch den etwas anderen zu steuernden Prozess. Die in der Laborstudie gewonnenen Erkenntnisse können so durch eine Untersuchung in der Praxis ergänzt werden, die wichtige Hinweise liefern kann wie sich die unter kontrollierten Bedingungen im Labor ermittelten Faktoren auf reale Bedingungen eines konkreten Arbeitsprozesses übertragen lassen.

## 5. Ergebnisse

Die Untersuchungen sind in der Durchführungsphase. Die Methodik konnte erarbeitet und erprobt werden. Gegenwärtig ist die Untersuchung in einem Kraftwerksstandort mit der Genehmigung des Betriebsrates und der Kraftwerksleitung bei der Probandengewinnung. Das Laborexperiment ist im Versuchsaufbau abgeschlossen und die Durchführung ist im Ablauf geplant. Eine erste Probandengruppe hat diesen Versuchsaufbau evaluiert und als geeignet bewertet. In den nächsten fünf Monaten sollen die Untersuchungen im Praxis- und Laborbereich durchgeführt werden. Die so gewonnenen Daten sollen mittels Unterschiedstest auf signifikante Unterschiede geprüft werden. Dann können Aussagen getroffen werden, ob die biologisch wirksame Lichtbedingung neben der Unterdrückung von Melatonin ebenfalls kurzfristige Wirkung auf die Wachheit/ Aktivierung des Menschen hat.

Lässt sich dieser Effekt nachweisen, können die Erkenntnisse in ein sich an unterschiedliche Situationen anpassendes Lichtszenario eingegliedert werden. Dieses sollte den Anforderungen des arbeitenden Menschen eher gerecht werden als die momentan vorherrschende statische Beleuchtung. Dies kann somit ein wichtiger Baustein eines Gesamtkonzepts sein, den Herausforderungen, die durch neue Belastungen durch die Energiewende entstehen, zu begegnen. Neben einem umfassenden Szenario lassen sich aus den Erkenntnissen ebenfalls einzelne Gestaltungsempfehlungen ableiten, die sich ohne übermäßigen Aufwand in bereits vorhandene Beleuchtungskonzepte eingliedern lassen. Zusätzlich können generelle Aussagen über die Vigilanz des Menschen bei verschiedenen Beleuchtungsszenarien an unterschiedlichen Arbeitsplätzen und für verschiedene Arbeitsaufgaben ableiten.

## **6. Literatur**

Akerstedt T., Gillberg M., Subjective and objective sleepiness in the active individual. International Journal of Neuroscience 1990; 52: 29–37.

Bainbridge L. (1983): Ironies of Automation. Automatica 19 (6) pp. 775 – 779.

Berson D.M., Dunn, F.A., Takao M. (2002). Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. In: Science 295, pp. 1070-1073

BGAG Institut Arbeit und Gesundheit der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: Report 2/2009 Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit.

Brzezinski, A. (1997). Mechanisms of Disease: Melatonin in Humans. In: The New England Journal of Medicine, Vol. 336(3) pp 186-195

DIN 11064-6 (2005). Ergonomische Gestaltung von Leitzentralen - Teil 6: Umgebungsbezogene Anforderungen an Leitzentralen. Berlin: Beuth-Verlag

DIN 5035-7 (2004). Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 7: Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen. Berlin: Beuth-Verlag

DIN V 5031:100 (2009). Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. Berlin: Beuth-Verlag

Ehlert, U., von Känel, R. (2011). Psychoendokrinologie und Psychoimmunologie. Berlin, Heidelberg: Springer Medizin Verlag

Erren T. C., Falaturi P., Morfeld P., Knauth P., Reiter R. J., Piekarski C. (2010). Schichtarbeit und Krebs – Hintergründe und Herausforderungen. Deutsches Ärzteblatt 107 (38), S. 657 - 662

Griefahn B, Künemund C, Bröde P, Mehnert P (2001). Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg. Somnologie 5: 71-80

Hoppe A. (2990). Technikstress - Theoretische Grundlagen, Praxisuntersuchungen und Handlungsregularien. Aachen: Shaker

Rützel E: Aufmerksamkeit. In: Herrmann T, et al. (Hrsg): Handbuch psycholog. Grundbegriffe, Kösel, München, S. 49-58, 1977.

<http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Einspeisemanagement-mit-Haken-und-Oesen/52516/1>, Zugriff 18.01.2012

Thapan, K., Arendt, J., Skene, D.J. (2001). An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. In: Journal of Physiology, 535 (1), pp. 261-267

Wilhelm B., Körner A., Heldmaier K., Moll K., Wilhelm, H., Lüdtkke H. (2001) Normwerte des pupillographischen Schläfrigkeitstests für Frauen und Männer zwischen 20 und 60 Jahren. In: Somnologie 5 (3), pp. 115-120.

Zulley, J., Knab, B. (2009). Unsere innere Uhr. Natürliche Rhythmen nutzen und der Non-Stop-Belastung entgehen. Frankfurt/M.: Mabuse-Verlag