

Die Wirkung unterschiedlicher Beleuchtungsbedingungen in Leitwarten auf Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stromversorgung – erste Ergebnisse einer Laborstudie

Rico Ganßaugeⁱ, Annette Hoppeⁱⁱ

ⁱ 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

ⁱⁱ 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: In der modernen Arbeitswelt steigt der Anteil technisch hochkomplexer Systeme und Anlagen. Diese werden oft von relativ wenigen Bedienern in einer Leitwartenumgebung geregelt. Das betrifft in hohem Maße die Leitwarten in Kraftwerken oder Netzleitstellen, aber auch andere Bereiche, wie die Überwachung von Produktionsprozessen. Ein bestimmendes Merkmal dieser Tätigkeiten ist die hochgradige automatische Regelung des Prozesses, in welche der Mitarbeiter in der Leitwarte im Normalbetrieb nur relativ wenig eingreift (Treier 2008, S. 301). Bei längerdauernder Prozessüberwachung kann es jedoch vergleichsweise rasch zum Absinken der Aufmerksamkeit kommen (DIN 10075-2: 2000, S. 8). Dieser Fakt gewinnt besondere Bedeutung, wenn bedacht wird, dass durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien die Anforderungen an das Wartpersonal ebenfalls steigen. Daraus ergeben sich Ansatzpunkte für arbeitsgestalterisches Handeln in vielfältiger Hinsicht, wobei die Gestaltung der Beleuchtung eine wichtige Möglichkeit darstellt. In der vorliegenden Studie werden erste Ergebnisse eines Laborexperiments zur Wirkung unterschiedlicher Beleuchtungsbedingungen auf die Aufmerksamkeit vorgestellt.

Keywords: Aufmerksamkeit, Pupillographie, Beleuchtung, Umgebungsbedingungen

1 Einführung

Viele hochkomplexe Systeme und Anlagen werden heute von relativ wenigen Bedienern in einer Leitwartenumgebung geregelt. Das betrifft in hohem Maße die Leitwarten in Kraftwerken oder Netzleitstellen, aber auch andere Bereiche, wie die Überwachung von Produktionsprozessen. Ein bestimmendes Merkmal dieser Tätigkeiten ist die hochgradige automatische Regelung des Prozesses, bei welcher der Mitarbeiter in der Leitwarte im Normalbetrieb nur relativ wenig eingreift (Treier 2008, S. 301). Der ursprüngliche Grund für die Einführung von Automation war, dem arbeitenden Menschen Unterstützung bei der Beherrschung komplexer Prozesse zu geben und ihn von repetitiven Tätigkeiten zu entlasten (Parasumaran 1996, S. 92f.) Jedoch zeigen bereits die so genannten „Ironien der Automatisierung“ (Bainbridge 1983), dass dieses Ziel nicht immer vollständig erreicht werden

konnte. Das äußert sich unter anderem darin, dass es bei längerdauernder Prozessüberwachung vergleichsweise rasch zum Absinken der Aufmerksamkeit kommen kann (DIN 10075-2: 2000, S. 8), da von der Tätigkeit selbst relativ wenig Anregungspotenzial ausgeht. Dieser Fakt gewinnt besondere Bedeutung, wenn bedacht wird, dass durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien die sonstigen Anforderungen an das Wartpersonal ebenfalls steigen. Daraus ergeben sich Ansatzpunkte für arbeitsgestalterisches Handeln in vielfältiger Hinsicht. Als Gestaltungsempfehlungen werden z.B. das Sicherstellen angemessener Signalunterscheidbarkeit oder die Einführung von Kurzpausensystemen (DIN 10075-2: 2000, S. 8) oder adaptive Automation (Manzey 2012) genannt. Eine weitere wichtige, jedoch noch weniger beforschte Möglichkeit stellt die Gestaltung der Beleuchtung dar. Diese orientierte sich in der Vergangenheit lediglich an der ausreichenden visuellen Erkennbarkeit, um eine Arbeitsaufgabe ausführen zu können, welche ihren Einzug in gängige Normen zur Gestaltung von Umgebungsbedingungen gefunden haben (z.B. DIN 11064-6: 2005, DIN 12464-1: 2011). Neuere Entwicklungen in diesem Bereich fokussieren verstärkt auf die biologische und aktivierende Wirkung von Licht, in diesem Sinne knüpft die vorliegende Studie an neue Erkenntnisse in diesem Bereich an.

1.1 Zielstellung

Die vorliegende Studie verfolgte das Ziel, die Wirkung unterschiedlicher Beleuchtungsbedingungen auf die Wachheit/ Ermüdung und damit die Aufmerksamkeitsleistung des Menschen unter monotonen Reizbedingungen zu untersuchen, um daraus Schlussfolgerungen für Optimierungsmaßnahmen ableiten zu können. Längerfristig kann dies in ein Gesamtsystem von sich anpassenden und noch menschengerechter gestalteten Umgebungsbedingungen eingegliedert werden, und die momentan vorherrschende statische Beleuchtung ablösen.

2 Stand der Forschung und Technik

Die Bundesregierung hat durch die Schaffung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes EEG den Vorrang von alternativen Energien in der Einspeisung festgeschrieben. Diese Strategie soll auch in den kommenden Jahren fortgeschrieben werden, denn wie es die Strategie bis 2020 vorsieht, sollen dann 47% der Energie aus erneuerbaren Quellen stammen (AEE 2013). Davon wird der überwiegende Teil aus stark schwankender Einspeisung stammen, wie Wind- und Sonnenenergie. Dies stellt steigende Anforderungen an die Operatoren, die nun erheblich häufiger Bedieneingriffe vornehmen müssen. Bei diesen Eingriffen ist höchste Aufmerksamkeit, Reaktionsfähigkeit und Wachheit erforderlich, um gezielt 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). Um die Wachheit und Aufmerksamkeit des Wartpersonals zu unterstützen, bieten sich einige neuere Erkenntnisse bezüglich der Wirkung von Licht an. Seit einiger Zeit ist bekannt, dass Licht im kurzen Wellenbereich von 380 – 580nm die Ausschüttung des so genannten „Schlafhormons“ Melatonin unterdrückt. In Deutschland ist dies bereits in einen Norm-Entwurf zur biologischen Wirkung von Licht eingeflossen: der DIN V 5031-100: 2009. 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. Hier ergibt sich ein Ansatzpunkt für die Beleuchtungsgestaltung. Dazu muss jedoch nachgewiesen werden, dass das Licht in besagtem Wellenbereich tatsächlich eine angemessene Wirkung auf Wachheit und Aufmerksamkeit des Menschen hat, denn bisher ist lediglich die Unterdrückung des Melatonins nachgewiesen.

2.1 Neurophysiologische Erkenntnisse zur Steuerung von Wachheit und Aufmerksamkeit

An der Steuerung von Wachheit und Aufmerksamkeit sind mehrere im Hirn ablaufende Prozesse beteiligt. Zum einen kommt einer Struktur im Stammhirn, der so genannten *Formatio Reticularis* große Bedeutung zu. Dies geht auf Experimente von Moruzzi und Magoun 1949 (zit. nach Schandry 2006, S. 115, 403f.) zurück. Diese konnten nachweisen, dass eine elektrische Stimulation an dieser Stelle die Aktivierung in der Großhirnrinde erhöht, was mit verstärkter Aktivität und Aufmerksamkeit einhergeht. Das Gesamtsystem wird auch als „aufsteigendes retikuläres Aktivierungssystem“ (ARAS) bezeichnet. Bei überwiegend sitzender Tätigkeit ist nachvollziehbar, dass der Reizinput und damit die Aktivierungswirkung geringer sind als bei körperlicher Bewegung. Dies gilt es im Rahmen der vorliegenden Studie zu beachten, da Überwachungstätigkeiten typischerweise unter geringer körperlicher Aktivität durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit der Aktivierung bzw. indirekten Steuerung der Wachheit erfolgt über den Ausstoß des Hormons Melatonin. Dieses wird in der Zirbeldrüse im Gehirn ausgestoßen, seine Konzentration steigt üblicherweise in den Abendstunden an (Schandry 2006, S. 404).

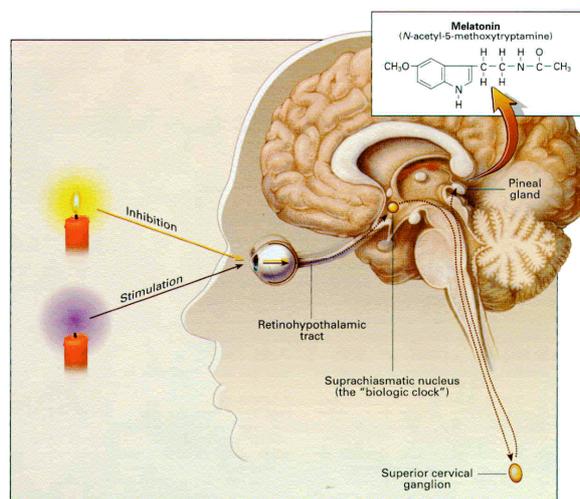


Abbildung 1: Melatoninausschüttung als einer der Steuerungsfaktoren im Schlaf-Wach-Rhythmus (Brzezinski 1997)

Der Ausstoß findet zum Teil selbstgesteuert statt, wird allerdings durch die Wirkung von Licht stark beeinflusst bzw. moduliert. Dies war längere Zeit unbekannt, die Rolle des Lichtes für die Erhaltung der Wachheit und damit der Aufmerksamkeit wurde 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 Experimenten von Aschoff in den 1950er und 60er Jahren konnte nachgewiesen werden,

dass diese „innere Uhr“ zwar existiert, sie jedoch durch externe Zeitgeber (hier vor allem Tageslicht) „getaktet“ wird. Die Struktur „Nucleus Suprachiasmaticus“ fungiert dabei als Taktgeber (Abb. 1). Ausschließlich mit ihm als Zeitgeber würde der innere Tages-Rhythmus bei einer großen Anzahl von Menschen 24,7 – 25,2h lang sein. (Ehlert & von Känel 2011, S.133). Tageslicht und soziale Zeitgeber sorgen üblicherweise für eine Anpassung an den normalen 24h-Rhythmus, wobei diese sich bei Schichtarbeitern sogar eher kontraproduktiv auf die Anpassung auswirken können. Der Unterschied in der Länge des Rhythmus bei verschiedenen Menschen bedingt eine Aufteilung in so genannte „Morgen“- und „Abendtypen“, wobei diejenigen 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 mit berücksichtigt. Die Taktung bzw. Adjustierung der inneren Zeitgeber erfolgt also durch Licht und über die Ausschüttung des so genannten „Schlafhormons“ Melatonin. Dabei wird 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 für das Sehen, bestehend aus Stäbchen und Zapfen, zu tun haben. (Thapan, Arendt & Skene 2001). Der Nachweis gelang ein Jahr später durch Berson, Dunn und Takao (2002). Sie konnten belegen, dass dieser Rezeptortyp besonders stark auf Licht im kurzwelligen Bereich reagiert, welches in der menschlichen Wahrnehmung eher blau erscheint. Zu Untersuchung des grundlegenden Einflusses von Licht bietet sich ein Experiment in kontrollierter Umgebung an.

3 Methodik

Es wurde ein Laborexperiment konzipiert und durchgeführt. In einem ansonsten abgedunkelten Raum wurde unter der Versuchsbedingung mit kurzwelligem Licht ein Aufmerksamkeitstest durchgeführt. Die Versuchsbedingung wird nachfolgend als „Blau“ bezeichnet, da das verwendete Licht optisch blau aussieht. Es befindet sich nahezu vollständig im unteren Bereich (380 – 580nm) des gesamten Spektrums sichtbaren Lichts (Abb. 2).

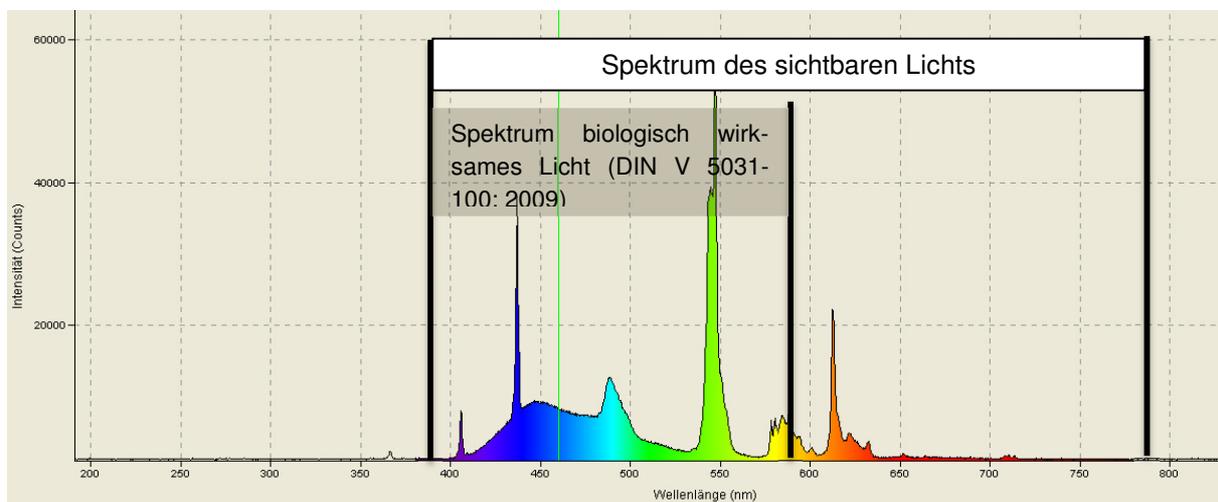


Abbildung 2: Spektralbereich der Versuchsbedingung "Blau"

Der angesprochene untere Bereich ist dabei besonders biologisch wirksam. Die Ermüdung wurde mit Hilfe eines objektiven und eines subjektiven Verfahrens (Selbsteinschätzung) ermittelt. Beim objektiven Verfahren handelt es sich um den pupillographischen Schläfrigkeitstest „F2D“ der Firma Amtech/ Dossenheim. Die subjektive Selbsteinschätzung wurde mittels der „Karolinska Sleepiness Scale“ (KSS-Skala; Akerstedt & Gillberg 1990) erhoben. Beide Messungen erfolgten einmal vor und einmal nach dem Aufmerksamkeitstest. Der Vigilanztest „Mackworth-Clock“ ist eine monotone Überwachungsaufgabe, die die Praxisanforderungen der Überwachungstätigkeit valide und reliabel nachbildet (Sturm und Büssing 1990). Der Proband verfolgt dort einen Leuchtpunkt, der sich in einfachen Sprüngen auf einer Kreisbahn fortbewegt. Zufällig und unvorhersehbar erfolgen jedoch Sprünge mit doppelt so großem Abstand, was der Proband mit einem Tastendruck quittieren soll. Der Test dauert 33 Minuten.

In gleicher Art und Weise wurde von den selben Versuchspersonen die Kontrollbedingung ohne kurzweiliges Licht durchgeführt (diese wird nachfolgend als „Rot“ bezeichnet), um einen Vergleichsmaßstab für die Ergebnisse zu haben. Das Spektrum der Kontrollbedingung befand sich nahezu vollständig im oberen Bereich des Gesamtspektrums sichtbaren Lichts (580 – 780nm) und damit außerhalb des biologisch wirksamen Bereichs. Die Beleuchtungsstärke war in beiden Bedingungen gleich (500lx) und entsprach gängigen Normen für Büroarbeitsplätze. Die Versuchspersonen durchliefen beide Bedingungen, jeweils mit mindestens einem Tag Abstand zwischen den Messungen. Die Wiederholungsmessung bietet den Vorteil, dass sich mögliche Eigenheiten einzelner Versuchspersonen weniger verzerrend auf das Ergebnis auswirken können, da jeder beide Bedingungen durchläuft. Möglichen Nachteilen, wie z.B. einem Lern- oder Übertagungseffekt beim Aufmerksamkeitstest „Mackworth-Clock“, wurde durch Permutieren der Versuchsreihenfolge begegnet.

Die Anfangszeit beider Bedingungen war gleich, um andere Einflüsse aus der circadianen Rhythmik auszuschalten. Sie lag jeweils am Nachmittag 15:00 Uhr. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Versuchspersonen sich im so genannten „Nachmittagstief“ der circadianen Rhythmik befinden, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf schwierige Schichtbedingungen, wie z.B. Nachtschicht, sicherzustellen. Da die Anfangszeit für alle Versuchspersonen gleich war, können Einflüsse aus einer verschobenen Tagesrhythmik im Sinne der bereits erwähnten „Eulen“- und „Lerchen“-Typen eine Rolle spielen. Dies wurde statistisch kontrolliert, indem der Typus mittels Fragebogen D-MEQ (Griefahn 2001) erfasst und in die Auswertung einbezogen wurde. Bei der Versuchsplanung handelt es sich um einen Versuchs-Kontrollgruppenplan mit Wiederholungsmessung (Bortz & Döring 2006, S. 493f.). Ein Vorteil des Laborsettings stellt die Kontrollierbarkeit der übrigen Umgebungsbedingungen dar. Damit können Alternativerklärungen weitestgehend ausgeschlossen werden und mögliche Unterschiede sollten sich so zwingend durch die unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen interpretieren lassen.

4 Ergebnisse

Erste Auswertungen von N = 32 Versuchspersonen (M = 26,1 Jahre, Std.-Abw. = 4,2 Jahre) hinsichtlich der Ermüdung zeigen ein überraschendes Ergebnis. So ist die Ermüdung gemessen mit dem pupillographischen Schläfrigkeitstest „F2D“ unter der Versuchsbedingung

„blau“ sogar etwas höher als unter der Kontrollbedingung „rot“ (Abb. 2). Allerdings ist dieser Unterschied noch nicht statistisch signifikant, weswegen weitere Probanden am Versuch teilnehmen und teilnehmen werden. Die Ausgangswerte der Ermüdung sind gleich bzw. unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (t-Test für gepaarte Stichproben; $T= 0,43$; $p= 0,97$). Dies stellt eine wichtige Voraussetzung für die Interpretation der Ergebnisse dar, da Unterschiede in der Wachheit/ Ermüdung *nach* dem Experiment nun nicht mittels Unterschieden in den Ausgangswerten erklärt werden können, sondern durch die Wirkung der simulierten Überwachungsaufgabe unter der entsprechenden Beleuchtung. Sie befinden sich am oberen Bereich der Skala für „wach“ und sind damit relativ hoch. Dies war durch die nachmittägliche Messzeit so intendiert und verbessert die Übertragbarkeit der Ergebnisse z.B. auf Nachtschichten. Nach dem Versuch zeigen die Versuchspersonen bei beiden Bedingungen Werte, welche als „kontrollbedürftig“ auf der Skala des Geräteherstellers zu klassifizieren sind (die Trennung auf der Skala erfolgt bei einem Wert von 1,02; vgl. Abb. 3). Dies ist jedoch nicht pathologisch, sondern eindeutig auf die monotone Beanspruchung durch den Aufmerksamkeitstest „Mackworth-Clock“ zurückzuführen, wie es in der DIN 10075-1: 2000 (S. 4) als „psychische Ermüdung“ bzw. „herabgesetzte Wachsamkeit“ beschrieben wird. Es bildet sich nach Ende der Aufgabe und der anschließenden Aktivität schnell zurück. Die Werte nach dem Experiment unterscheiden sich ebenfalls noch nicht statistisch signifikant (t-Test für gepaarte Stichproben, $T= 1,21$, $p= 0,24$). Wie bereits erwähnt, ist hier jedoch durch Vergrößerung der Stichproben mit dem Erreichen der Signifikanzgrenze von $p < 0,05$ zu rechnen.

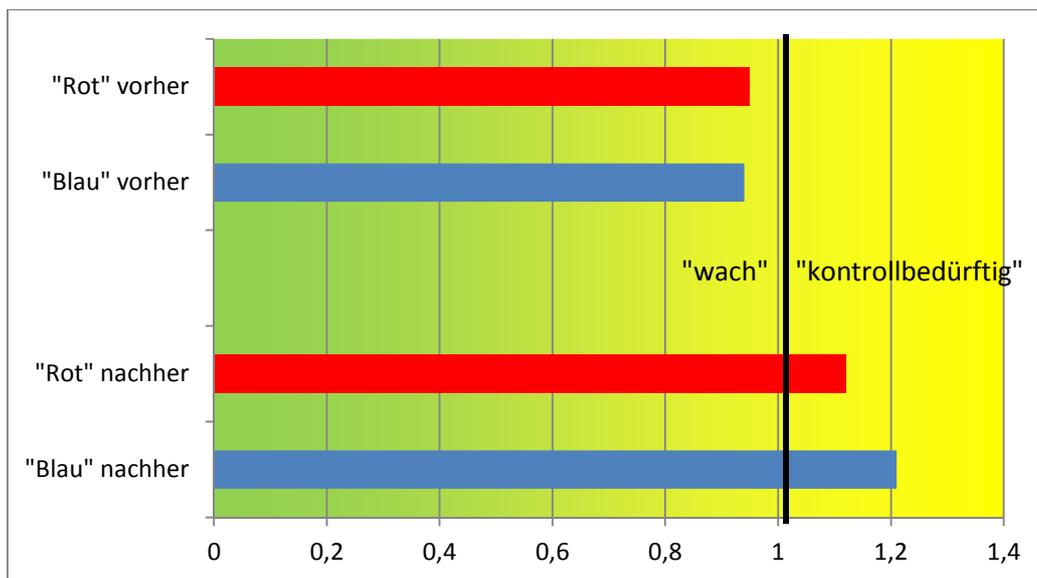


Abbildung 3: Ergebnisse der Messung Wachheit mittels objektivem Test "F2D"

Die subjektive Selbsteinschätzung der Wachheit mittels KSS-Skala tendierte unter beiden Bedingungen von etwas unter „wach“ zu etwas unter „weder wach noch müde“ (Abb. 3). Dabei zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in den Einschätzungen unter Versuchs- und Kontrollbedingung davor und danach (Wilcoxon-Test, für Differenz vorher: $p = 0,18$; für Differenz nachher: $p = 0,78$). Die Werte der Kontrollbedingung „Rot“ zeigten vorher eine leichte Tendenz der etwas höheren Einschätzung der Ermüdung. Wird in Betracht gezogen, dass die Ausgangswerte des pupillometrischen Schläfrigkeitstest „F2D“ gleich waren, erscheint diese Differenz erklärungsbedürftig. Dieses Ergebnis ist wahrscheinlich auf die im

ansonsten abgedunkelten Raum schon angeschaltete optisch rote Beleuchtung der Kontrollbedingung zurückzuführen. Sie war für den Probanden während der Einschätzung sichtbar. Das Licht ähnelt sehr stark einem natürlichen Licht bei Sonnenuntergang und ansonsten wenig bedecktem Himmel. Dies wird die Versuchspersonen wahrscheinlich unbewußt in ihrer Einschätzung der eigenen Wachheit beeinflusst haben. Zu vermuten ist, dass in das Urteil über den eigenen Ermüdungszustand momentane äußere Reize mit einfließen, was die Einschätzung im Sinne von „es ist Abend – ich muss müder sein“ beeinflusst. Diese Erkenntnis floss in die Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus ein.

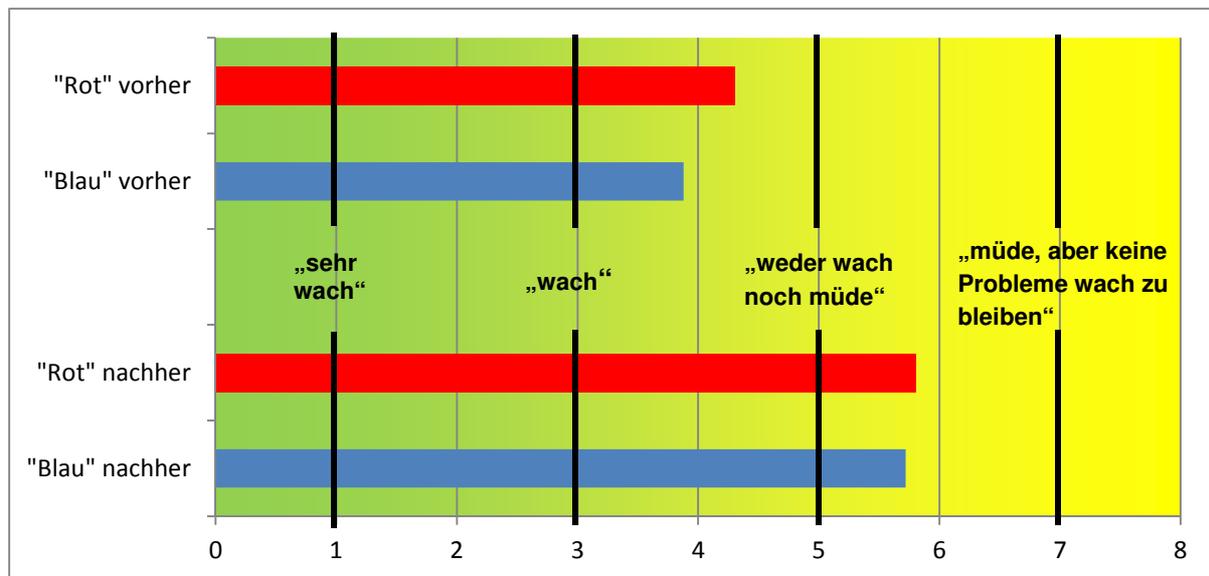


Abbildung 4: Ergebnisse der Messung Wachheit mittels subjektivem Verfahren "KSS-Skala"

Da es sich um laufende Untersuchung handelt, werden demnächst weitere Auswertungen mit den Probanden, die in der Zwischenzeit gemessen wurden, stattfinden. Damit erhöht sich die statistische Aussagekraft und die Wahrscheinlichkeit eines falsch positiven Ergebnisses (α -Fehler) sinkt. Des Weiteren werden die Werte für Reaktionszeiten und Fehler in der Aufmerksamkeitsaufgabe „Mackworth-Clock“ mit einbezogen. So ist es möglich, besser zu klären, ob die erhöhte Ermüdung unter der Versuchsbedingung „Blau“ möglicherweise eine Nachwirkung besserer Wachheit und Aufmerksamkeit während der Versuchsdurchführung ist. Damit kann abschließend die Wirkung und der Nutzen einer Veränderung der Beleuchtungsbedingungen abgeklärt werden.

5 Literatur

Agentur für Erneuerbare Energien (AEE): www.unendlich-viel-energie.de (Zugriff 18.11.2013)

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

Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), S. 775-779.

Brzezinski, A. (1997). Melatonin in humans. *New England Journal of Medicine*, 336(3), S. 186-195.

- 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
- DIN 11064-6: 2005-10. Ergonomische Gestaltung von Leitzentralen - Teil 6: Umgebungsbezogene Anforderungen an Leitzentralen. Berlin: Beuth
- DIN 12464-1: 2011. Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. Berlin: Beuth
- 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
- Manzey, D. (2012). Systemgestaltung und Automatisierung. In *Human Factors* (S. 333-352). Springer Berlin Heidelberg.
- Hoppe A. (2009). Technikstress - Theoretische Grundlagen, Praxisuntersuchungen und Handlungsregularien. Aachen: Shaker
- Schandry, R. (2006). Biologische Psychologie. Weinheim: Beltz PVU
- Treier, C. (2008). Mensch-System-Integration nicht ohne soziale Dimension – Beobachtungen und Schlussfolgerungen aus der Gestaltung und Nutzung von Warten in Kernkraftwerken. In: DLRG-Bericht 2008/04-23
- Sturm, W., & Büssing, A. (1990). Normierungs- und Reliabilitätsuntersuchungen zum Vigilanzgerät nach Quatember und Maly. *Diagnostica* Bd, 36(1), 1.
- Bortz, J., Döring, N. (2006). Forschungsmethoden und Evaluation für Sozialwissenschaftler. Heidelberg: Springer
- Parasumaran, R., Mouloua, M. (1996). Automation and human performance: theory and applications. Boca Raton: Taylor & Francis