

Evaluation eines alternierenden Beleuchtungskonzepts in einem Produktionsbetrieb

Isabel SCHÖLLHORN¹, Achim PROSS², Martin BRAUN², Kilian SEILER³,
Oliver STEFANI⁴

¹ *Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart*

² *Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Stuttgart
Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart*

³ *Festo AG & Co. KG, Plieninger Straße 50, D-73760 Ostfildern*

⁴ *Universitäre Psychiatrische Kliniken Basel,
Wilhelm-Klein-Strasse 27, CH-4012 Basel*

Kurzfassung: Das visuelle System des Menschen ist ideal an das Tageslicht angepasst; diverse chronobiologische Rhythmen bzw. Funktionen werden vom Tageslicht kontrolliert. Eine Beleuchtung in der Nacht mit erhöhtem Blauanteil ist wegen der Melatoninsuppression und damit einhergehenden möglichen Befindensstörungen (z. B. chronische Erschöpfung, Schlafstörungen, Depressionen) zu vermeiden. Damit widersprechen sich biologische und visuelle Anforderungen an die Beleuchtung u. a. bei Schichtarbeit. Eine Gestaltungslösung können alternierende Beleuchtungskonzepte während Tag- und Nachtbedingungen darstellen, wie dieses beispielhaft in einem Produktionsbetrieb installiert wurde. In einem Feldversuch wurden ein statisches mit einem alternierenden Beleuchtungskonzept hinsichtlich des Empfindens der Lichtsituation sowie der subjektiven Befindlichkeit der Belegschaft (N = 287) im Schichtbetrieb verglichen. Hierbei ergaben sich keine signifikanten Unterschiede der Bewertung der Lichtsituation. Folglich erweist sich ein alternierendes Beleuchtungskonzept als gangbare Gestaltungslösung, um widersprüchliche Anforderungen zu integrieren.

Schlüsselwörter: Farbdynamische Beleuchtung, Befinden, Schichtarbeit, Produktion, Feldstudie

1. Chronobiologische Grundlagen

Jahrhundertlang richtete die Menschheit ihren Lebenswandel nach den Rhythmen der Natur (z. B. Tag-Nacht-Zyklus und Witterung) aus. Im Zug der frühen Industrialisierung trennte sich die Arbeitszeit von den natürlichen Eigenzeiten ab. Die aufkommende elektrische Fabrikbeleuchtung ermöglichte es, Betriebs- und Arbeitszeiten mittels Schichtarbeit zu entkoppeln (Braun 2007). Gegenwärtig arbeiten 14 % der Erwerbstätigen in Deutschland zumindest gelegentlich nachts, d. h. zwischen 23 und 6 Uhr. 15 % der Erwerbstätigen arbeiten in Wechselschicht mit Nachtanteil (Destatis 2014).

Schichtarbeit beeinflusst den endogenen zirkadianen Rhythmus, indem sie die Phasen von Wachen und Schlafen verschiebt. Neben Wachheit und Schlafbedürfnis bestimmen die vielfältigen endogenen Rhythmen u. a. die Körpertemperatur, die Herzfrequenz, den Blutdruck sowie die Hormonkonzentrationen von Cortisol und Melatonin. Exogene Einflüsse synchronisieren die endogenen zirkadianen Rhythmen. Dominan-

ter exogener Zeitgeber ist das *Sonnenlicht* im Hell-Dunkel-Rhythmus eines 24-Stunden-Tages. Bei Nachtschichtarbeit gelingt eine solche gesunde Synchronisation in der Regel nur unzureichend (Angerer et al. 2017). Wird die Wechselwirkung endogener und exogener chronobiologischer Rhythmen – etwa bei Nachtarbeit – anhaltend gestört, so leidet die regenerative Fähigkeit des Organismus (Hildebrandt et al. 1998). Mögliche Folgen sind Erschöpfung, Schlafstörungen und Depressionen (Rosenthal et al. 1985; Terman et al. 1995; Amlinger-Chatterjee 2016). Eine anhaltende Desynchronisierung der endogenen Rhythmen schränkt die Konzentrationsfähigkeit, die Geschicklichkeit und die Reaktionsgeschwindigkeit ein (Stevens 2006; Blask 2009).

Angesichts alternder Belegschaften und anhaltender Flexibilisierung der Arbeitszeit besteht erheblicher Forschungsbedarf zur menschenzentrierten Beleuchtung unter besonderer Berücksichtigung nicht-visueller Wirkungen (Braun 2007).

2. Visuelle und nicht-visuelle Lichtwirkungen

Erhöhte Beleuchtungsstärken aktivieren vegetative und zerebrale Funktionen, so dass helle Umgebungen tagsüber vorteilhaft sein können (Turner et al. 2009). In Innenräumen reichen Beleuchtungsstärken von etwa 500 lx für Sehaufgaben aus; sie sind für eine chronobiologische Aktivierung jedoch zu gering. Niedrige Beleuchtungsstärken während des Tages bei hohen nächtlichen Beleuchtungsstärken destabilisieren indes die zirkadiane Ordnung (Rosenthal et al. 1984). Darüber hinaus ist die Farbtemperatur wirksam: Während ein blau angereichertes Lichtspektrum aktiviert, verhindern warme Farbtemperaturen mit reduziertem Blauanteil die Melatoninsuppression. Eine nächtliche Lichtexposition stört die Melatoninsekretion während des gesamten 24-Stunden-Tages, vor allem bei relativer Dunkelheit am Tag (Hébert et al. 2002). Spezifische visuelle und biologische Lichtwirkungen laufen somit zuwider.

Für die Planung und den Betrieb künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung an Arbeitsplätzen liegen Normentwürfe vor (vgl. DIN SPEC 5031-100, DIN SPEC 67600), die die etablierten Richtlinien zur Lichtgestaltung (vgl. ASR 3.4) ergänzen. Werden Qualitätsmerkmale guter Arbeitsplatzbeleuchtung eingehalten, so kann ein farbdynamisches, aus warm- und kaltweißen Lichtanteilen bestehendes Beleuchtungskonzept (das sog. *Human Centric Lighting*) die chronobiologische Rhythmik stabilisieren (vgl. Braun et al. 2009) und eine Gefährdung des Menschen durch nicht-visuelle Lichteinflüsse reduzieren (BAuA 2016).

In einer aktuellen Laborstudie wird eine statische Beleuchtung (4.000 K) mit einer über den Tagesverlauf kontinuierlich veränderten dynamischen Beleuchtung (nach dem Aufwachen 3.500 K; um 10:00 Uhr 5.000 K; um 18:00 Uhr 4.000 K; vor dem Schlafengehen 2.700 K) hinsichtlich der Melatoninkonzentration sowie der subjektiven Müdigkeit untersucht. Die dynamische Beleuchtung führt zu signifikant höheren Melatoninwerten vor dem Schlafengehen. Diese Ergebnisse unterstützen die Empfehlung, wärmere Farbtemperaturen am Abend einzusetzen. Da sich das Müdigkeitsempfinden trotz reduzierter Farbtemperatur nicht verändert, soll diese Gestaltungsempfehlung auf die industrielle Schichtarbeit übertragen werden (Veitz et al. 2018).

3. Beleuchtungskonzept für die Festo Technologiefabrik Scharnhausen

In einer Feldstudie wird der Einfluss einer alternierenden Beleuchtung bei Schichtarbeit auf Gefallen, Befindlichkeit bzgl. Wachheit / Müdigkeit und Stimmung der Mitarbeiter untersucht. Das Beleuchtungskonzept zeichnet sich durch hohe Helligkeiten und

hohe Farbtemperaturen am Tag aus. Der hohe Blauanteil wirkt biologisch aktivierend. Bei natürlicher Dunkelheit ist die Helligkeit reduziert; die Farbtemperaturen tendieren zu warmweißen Licht. Diese alternierende Beleuchtung soll die natürliche Synchronisation der zirkadianen Rhythmen möglichst wenig beeinträchtigen.

Für die Realisierung des Beleuchtungskonzepts in einer Produktionshalle für mechatronische Komponenten werden 2x T16 (T5) 49 W 865 und 827 Leuchtstofflampen in einer Höhe von 4 m installiert (vgl. Abbildung 1). Das Beleuchtungskonzept entspricht den aktuellen Normen zur Beleuchtung von Arbeitsstätten. Es werden zwei Lichtsysteme mit unterschiedlicher Lichtfarbe installiert. Die Beleuchtungsstärke liegt über dem in ASR A3.4 empfohlenen Wert von 500 lx für präzise Montagearbeiten.



Abbildung 1: Deckenanordnung der Leuchten in der Festo Technologiefabrik Scharnhausen.

Für die nicht-visuellen Funktionen reicht eine Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe nicht aus; relevant ist der Lichteinfall auf der Netzhaut. Für diese vertikale Beleuchtungsstärke gibt die ASR A3.4 einen Mindestwert von 175 lx an. Dieser Wert dient auch als Richtwert für die realisierten Lichtkonzepte. Lediglich unter Nachtbedingungen liegt die vertikale Beleuchtungsstärke geringfügig niedriger.

DIN-5035-7 empfiehlt eine warm- oder neutralweiße Lichtfarbe. Warmweiß entspricht einer Farbtemperatur unter 3.300 K; neutralweiß einer Farbtemperatur von 3.300 K bis 5.300 K (DIN EN 12464-1, 2011). Die realisierten Farbtemperaturen liegen sowohl am Tage als auch in der Nacht in diesem Bereich (siehe Tabelle 1).

Bei Montagearbeiten soll der Farbwiedergabeindex nach ASR A3.4 bei 80 liegen.

Zum Vergleich der nicht-visuellen Lichtwirkungen dient der melanopische Wirkungsfaktor $a_{mel,V}$ sowie die melanopisch tageslicht-äquivalente Beleuchtungsstärke $E_{V, mel, D65}$ (DIN 5031-100). Als Richtwert für eine ausreichende Wirkung am Tag werden 250 melanopisch bewertete Lux angesehen (Pohlmann 2016).

Das im Feldversuch realisierte, alternierende Beleuchtungskonzept weist bei Tagesbedingungen hohe Helligkeiten ($X=850$ lx), hohe Farbtemperaturen ($X = 5.300$ K) sowie einen erhöhten, biologisch wirksamen Blauanteil auf. Bei Nachtbedingungen führt eine reduzierte Helligkeit ($X = 580$ lx) mit niedriger Farbtemperatur ($X = 3.400$ K) und verringertem Blauanteil zu einer geringeren Melatonin-suppression. Um beleuchtungstechnische Einflüsse ausschließen zu können, die sich nicht auf den Lichtwechsel beziehen, werden Vergleiche mit statischen Lichtbedingungen ($X = 760$ lx, $X = 4.600$ K) durchgeführt. Tabelle 1 stellt die Beleuchtungsparameter der Feldstudie übersichtsartig dar. Der zeitliche Verlauf von Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke des alternierenden Beleuchtungskonzepts geht aus Abbildung 2 hervor.

Tabelle 1: Beleuchtungsparameter gemessen vertikal und horizontal am Arbeitsplatz unter den Bedingungen statischer Beleuchtung und bei alternierender Beleuchtung.

Konzept	Statische Beleuchtung		Alternierende Beleuchtung			
	24 Stunden		Tageslichtbedingung		Nachtlichtbedingung	
Messort	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
Beleuchtungsstärke	760 lx	210 lx	860 lx	237 lx	570 lx	158 lx
Farbtemperatur	4.600 K	4.380 K	5.300 K	5.100 K	3.400 K	3.250 K
Farbwiedergabe R_a	82	83	77	78	85	85
$a_{mel,v}$	0,59	0,55	0,64	0,63	0,43	0,405
MDEI [lx_{mel}]	483 lx_{mel}	128 lx_{mel}	610 lx_{mel}	164 lx_{mel}	270 lx_{mel}	71 lx_{mel}

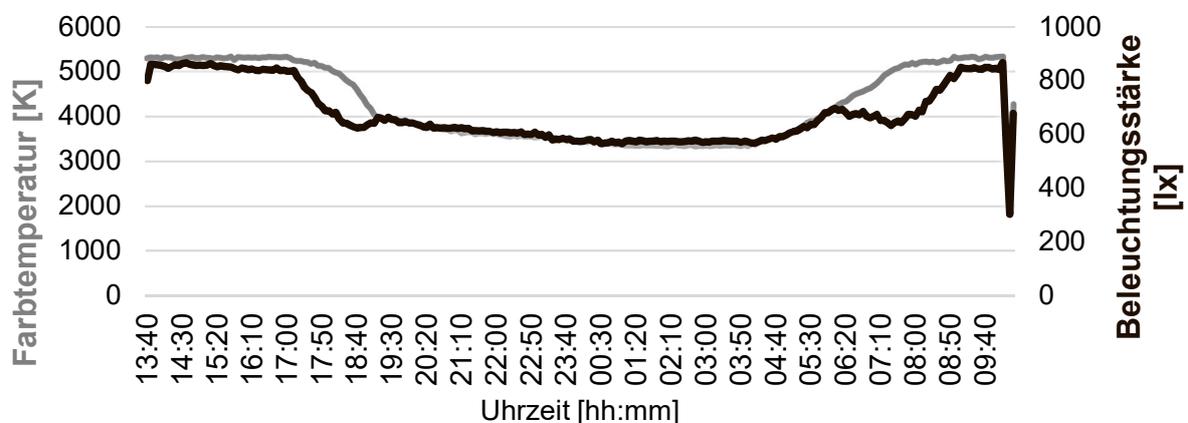


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf von Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke beim alternierenden Beleuchtungskonzept.

4. Durchführung der Feldstudie und Ergebnisse

An der Feldstudie nahmen insgesamt 542 Probanden teil, die sich aus dem Betrieb rekrutierten. Einige statistische Daten gibt Tabelle 2 wieder.

Tabelle 2: Ausgewählte Probandendaten.

Konzept	Anzahl Teilnehmer	Anteil Frauen	Anteil Männer
Statische Beleuchtung	$N_{statisch} = 256$	54%	46%
Alternierende Beleuchtung	$N_{alternierend} = 287$	46%	54%

41% der Probanden, die das alternierende Beleuchtungskonzept erprobten, nahmen vorab ebenfalls an der Befragung zum statischen Beleuchtungskonzept teil. Etwa drei Viertel der Probanden waren zwischen 21 und 50 Jahre alt, mit gleichmäßiger Altersverteilung über die 10-Jahres-Alterskohorten. Die Probanden waren der Früh-, Spät- und Nachtschicht zugeordnet.

Zunächst bewerteten alle Probanden ausgewählte Merkmale der Lichtsituation (d. h. Lichtfarbe, Helligkeit, Farbwiedergabe, Gefallen) anhand einer siebenstufigen Skala. Es waren mehrere, schichtübergreifende Antworten möglich. Abbildung 3 fasst Ergebnisse für das Merkmal „Gefallen“ beispielhaft anhand von Boxplots zusammen.

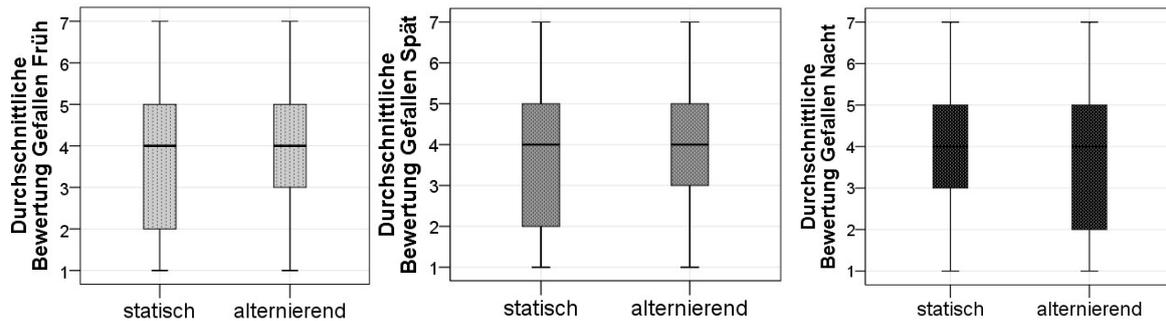


Abbildung 3: Bewertung des Gefallens der Lichtsituation in Abhängigkeit der Schicht (links: Früh- schicht, Mitte: Spätschicht, rechts: Nachtschicht) sowie der Lichtbedingung: statisch, alternierend. Skala: Wert 1 = gefällt mir sehr, Wert 7 = gefällt mir gar nicht. Gültige Antworten: $N_{\text{statisch}} = 211$, $N_{\text{alternierend}} = 244$.

Bezüglich der alternierenden und statischen Lichtbedingungen sind keine signifi- kanten Unterschiede hinsichtlich der o. g. Merkmale festzustellen ($p > 0,05$). Die Über- gänge von Tag- zu Nachtbedingung und umgekehrt wirken sich nicht störend auf die befragten Beleuchtungskriterien aus. Folglich ist davon auszugehen, dass das alter- nierende Beleuchtungskonzept von der Belegschaft akzeptiert wird.

Die anschließende Erhebung des psychischen Zustandes der Probanden erfolgte mittels des „Mehrdimensionalen Fragebogens (MDBF)“ nach Steyer et al. (1997). In Abhängigkeit von Schicht und Beleuchtungskonzept wurden – neben anderem - die polaren Dimensionen „Wachheit / Müdigkeit“ anhand einer sechsstufigen Skala bewert- et. Aufgrund der geringen Anzahl gültiger Antworten für das statische Beleuchtungs- konzept bei Nachtschichtarbeit ($N = 16$) wurde keine statistische Signifikanz für diese Schichtart bestimmt.

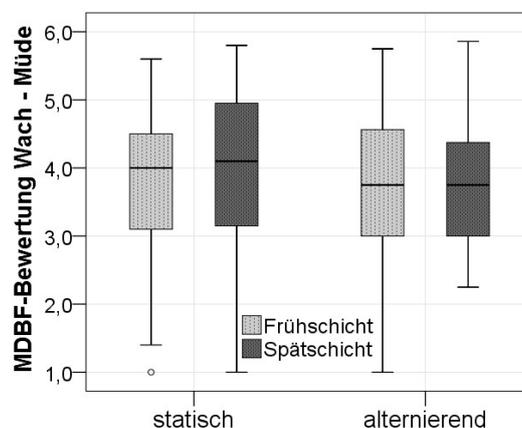


Abbildung 4: Bewertung der psychischen Befindlichkeit von Wachheit / Müdigkeit in Abhängigkeit der Schicht und Lichtbedingung.

Bei der Auswertung der Befindlichkeiten ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen Früh- und Spätschicht in Bezug auf Wachheit und Müdigkeit.

5. Diskussion

Es liegen nur wenige Feldstudien vor, welche den Einfluss von farbdynamischer Beleuchtung auf den Menschen untersuchen. Ursächlich hierfür sind einerseits unkon- trollierbaren Randbedingungen, wie Chronotyp (Roenneberg et al. 2013), Lichthistorie

(Hébert et al. 2002) und Alter (Hardeland et al. 2006). Andererseits lassen sich physiologische, endokrinologische und neurokognitive Daten nicht unter beliebigen Umfeldbedingungen erheben. Ferner hält der mit der Durchführung verbundene, betriebliche Aufwand oftmals von einem solchen Unterfangen ab: Neben finanziellen Aufwendungen für das Beleuchtungskonzept bzw. für die Planung und Durchführung von Versuchen sind Mitarbeiter zur Teilnahme zu gewinnen und diese während der Befragung von ihrer regulären Arbeitstätigkeit freizustellen.

Die hier auszugsweise dargestellten Studienergebnisse geben Anlass für weitere Forschungsarbeiten zur farbdynamischen Lichtgestaltung insbesondere bei Schichtarbeit. Weitere, detaillierte Ergebnisse der vorliegenden Studie werden später veröffentlicht.

6. Literatur

- Amlinger-Chatterjee M (2016) Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt. Atypische Arbeitszeiten. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Angerer P, Schmook R, Elfantel I, Li J (2017) Night work and the risk of depression—a systematic review. *Dtsch Arztebl Int* 114: 404–411.
- ASR 3.4: Technische Regeln für Arbeitsstätten – Beleuchtung.
- Blask DE, Wilson ST, Zalatan F (1997) Physiological melatonin inhibition of human breast cancer cell growth in vitro: evidence for a glutathione-mediated pathway. *Cancer Research*, 57 (10), 1909-1914.
- Braun M (2007) Chronobiologische Arbeitsgestaltung – Pausengestaltung – Mittagsschlaf. In: Weber, A, Hörmann G (Hrsg) *Psychosoziale Gesundheit im Beruf*. Stuttgart: Gentner, 497-503.
- Braun M, Stefani O, Pross A, Bues M, Spath D (2009) Human Factors in Lighting. In: Salvendy G, Stephanidis C. (Hrsg) *Proceedings of the HCI International 2009*. Heidelberg: Springer, 223 ff.
- BAuA (Hrsg.) *Ratgeber zur Gefährdungsbeurteilung*. Handbuch. Dortmund: 2016.
- Destatis (2014) *Microzensus 2013. Bevölkerung und Erwerbstätigkeit*: Wiesbaden: Statist. Bundesamt.
- DIN SPEC 67600:2013: *Biologisch wirksame Beleuchtung – Planungsempfehlungen*.
- DIN SPEC 5031-100:2015: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik. Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen*.
- Gabel V, Maire M., Reichert CF, Chellappa SL, Schmidt C, Hommes V (2013). Effects of artificial dawn and morning blue light on daytime cognitive performance, well-being, cortisol and melatonin levels. *Chronobiology International*, 30 (8), 988-997.
- Gabel V, Maire, M., Reichert CF, Chellappa SL, Schmidt C, Hommes V (2015) Dawn simulation light impacts on different cognitive domains under sleep restriction. *Behav. brain research*, 281, 258-266.
- Hardeland, R., Pandi-Perumal, S. R. & Cardinali, D. P. (2006). Melatonin. *The international journal of biochemistry & cell biology*, 38 (3), 313-316.
- Hébert, M., Martin, S. K., Lee, C. & Eastman, C. I. (2002). The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. *Journal of Pineal Research*, 33 (4), 198-203.
- Hildebrandt G, Moser M, Lehofer M (1998) *Chronobiologie und Chronomedizin*. Stuttgart: Hippokrates.
- Pohlmann, S. (Hrsg.). (2016). *Alter und Prävention*. Wiesbaden: Springer VS.
- Rosenthal NE, Sack DA, Gillin JC, et al. (1984). Seasonal Affective Disorder: A Description of the Syndrome and Preliminary Findings With Light Therapy. *Arch Gen Psychiatry*. 41 (1), 72-80.
- Rosenthal NE, Sack DA, Carpenter CJ, Parry MD, Mendelson WB, Wehr TA (1985). Antidepressant Effects of Light in Seasonal Affective Disorder. *Am J Psychiatry*, 142, 163-170.
- Stevens, R. G. (2006) Artificial lighting in the industrialized world: circadian disruption and breast cancer. *Cancer causes & control: CCC*, 17 (4), 501-507.
- Steyer R, Schwenkmezger P, Notz P, Eid M (1997) *Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)*. Handanweisung. Göttingen: Hogrefe.
- Terman et al. (1995) Treatment of Seasonal Affective Disorder with a High-Output Negative Ionizer. *J Altern Complement Med*, 1(1):87-92.
- Veitz S, Stefani O, Freyburger M, Meyer M, Weibel J, Rudzik F, Basisvilli T, Cajochen C (2018) Effects of lighting with continuously changing color temperature and illuminance on subjective sleepiness and melatonin profiles. Basel: ESRS.

Danksagung: Besonderer Dank gilt der Fa. Festo, Esslingen, für die Unterstützung der Forschungsarbeiten im laufenden Produktionsbetrieb.