

Wirkung von Licht am Arbeitsplatz

Zumtobel Research

Dr. Vincent Grote

MSc. & Univ.-Prof. Dr. Maximilian Moser (MUG & HRI)

Prim. PD. Dr. Robert Winker (Prüfarzt)

Susanne Reisinger, MAS (Work-Life-Balance)

Mag. Christina Kelz, MSc. (MUG & HRI)

DI Peter Dehoff (Zumtobel)



Zusammenfassung		4
Einleitung	Stand der (nicht-visuellen) Lichtwirkungsforschung	5
Überlegungen zu dynamischen Lichtsteuerungen	Studien- und Lichtplanung	7
Methode	Prüfmittel: Beleuchtungsmittel und Steuerelemente	8
	Technische Beschreibung der dynamisch angesteuerten Leuchtstofflampen	10
	Herzrate und Herzratenvariabilität	13
	StudienteilnehmerInnen	16
Ergebnisse	Psychologische Ergebnisse	18
	Zufriedenheit mit Beleuchtungssituation	18
	Psychometrische Ergebnisse im Studienverlauf (Beschwerden und Befinden am Abend)	20
	Erholungs-Beanspruchungsbilanz	22
	Physiologische Ergebnisse	24
	Cardiovegetative Aktivierung im Studienverlauf und bei einzelnen Lichtbedingungen	24
	Endokrinologische Ergebnisse	29
	Weitere Messergebnisse zum Lichtempfinden am Arbeitsplatz	30
Diskussion		32
Literatur	Abbildungsverzeichnis	45
	Tabellenverzeichnis	45

Zusammenfassung

Der menschliche Organismus schwingt in zahlreichen biologischen Rhythmen, welche die zeitgerechte Aktivierung und Deaktivierung von Körperfunktionen steuern. Alle Organsysteme sind dabei so aufeinander abgestimmt, dass ein optimales Zusammenspiel der Funktionen zustande kommt. Für die gegenseitige Synchronisation dieser Funktionen spielen Zeitgeber eine wesentliche Rolle, die zu bestimmten Tages- oder Jahreszeiten auftreten. Licht ist einer der wesentlichsten Zeitgeber für biologische Organismen und beeinflusst und synchronisiert insbesondere den circadianen Rhythmus, den Tagesgang.

Im vorliegenden Projekt erfolgte eine Evaluation verschiedener Lichtumgebungen mit Leuchtstofflampen am Büroarbeitsplatz. Die Auswirkungen auf cardiovegetative und endokrine Parameter, Befinden, biologische Rhythmen und Schlafqualität wurden im Rahmen eines gekreuzten Längsschnittdesigns über mehrere Wochen in den Wintermonaten von Oktober bis März untersucht. Das mittlere Alter der 36 StudienteilnehmerInnen betrug 38 +/- 10 Jahre (R: 21 bis 60; ca. 60% Frauen).

Die bestehende statische Bürobeleuchtung diente als Referenzbedingung (SL; ca. 500lx, 3500K). In der dynamischen Versuchsbedingung 1 erhielten die ArbeitnehmerInnen eine künstliche Beleuchtung, die dem circadianen Rhythmus der Einschlafbereitschaft folgt (DL1). In der alternativen dynamischen Versuchsbedingung 2 (DL2) war der zeitliche Verlauf der Beleuchtungsintensität von DL1 invertiert.

Es konnten signifikante Auswirkungen der Arbeitsplatzbeleuchtung beobachtet werden: Die gewählten dynamischen Lichtsituationen (DL1 & DL2) - mit im Durchschnitt höheren Beleuchtungsstärken (ca. 800lx) - werden subjektiv gegenüber der statischen Beleuchtung (SL) bevorzugt. Auf cardiovegetativer Ebene zeigt sich, dass höhere Lichtintensitäten eine stärkere Aktivierung im Wachzustand bewirken. Dies geht mit einem tieferem Schlaf und damit besser ausgeprägten circadianen Tagesgängen einher. Die Ergebnisse sind durch zeitliche, saisonale Trends in den psychologischen und physiologischen Daten merklich beeinflusst.

Die Analyse der Daten und aufbereiteten Erkenntnisse aus der Fachliteratur legen nahe, dass eine zeitliche dynamische Lichtabfolge mit höheren Lichtintensitäten (500 – 1200lx), Vorteile für ArbeitnehmerInnen bringen kann. Für allgemein gültigere Schlussfolgerungen sind weitere Studien mit längeren Lichtexpositionszeiträumen (> vier Wochen) wünschenswert.

Keywords: Zeitgeber, Arbeitsplatzbeleuchtung, Dynamik, Wohlbefinden, Schlaf, Herzratenvariabilität.

Einleitung

Die Beleuchtung hat eine wichtige Zeitgeberfunktion für biologische Organismen: die Steuerung der circadianen Rhythmik und damit einhergehender Beeinflussung des Stoffwechsels (Melatonin, Serotonin, Cortisol etc.), des Immunsystems, der Gehirnaktivität bzw. kognitiver, psychischer Funktionen, wie Stimmung, Leistungs-, Konzentrationsfähigkeit und Gedächtnis. Mit den neuen technischen Möglichkeiten und bereits verfügbaren dynamischen Lichtsteuerungen ergeben sich hier neue Anwendungsmöglichkeiten in der Verhältnisprävention bzw. betrieblichen Gesundheitsförderung.

Stand der (nicht-visuellen) Lichtwirkungsforschung

In den letzten 20 Jahren, insbesondere seit Entdeckung anatomischer, physiologischer und neuronaler Grundlagen der Lichtwirkungsforschung, wie eines „circadianen Photorezeptors“ [1-4] hat die biologische Bedeutung von Licht einen starken Aufschwung erfahren. Viele ExpertInnen aus unterschiedlichen Fachbereichen propagieren und forcieren seit dem die nicht-visuelle Bedeutung von (Kunst-)Licht für Gesundheit und Arbeitswelt [5]. Es gibt dafür bereits eigene Planungsempfehlungen und Normen [6, 7]. Dies geht weit über die ursprünglich überwiegend klinischen Anwendungen – wie Lichttherapie bei Depressionen oder Schlafstörungen [8-11] – hinaus. Fachwelt und Laien scheinen von der nicht-visuellen Bedeutung von Licht überzeugt und übertragen wissenschaftliche Ergebnisse auf vielfältigste Bereiche. Empirische Humanstudien haben dadurch einen Aufschwung erfahren, hinken jedoch noch merklich hinter den getroffenen Aussagen und Versprechen von Industrie und Experten nach.

Die nicht visuelle Bedeutung von monochromatischem (Kunst-)Licht, insbesondere von kurzwelligigen „blauen“ Lichtanteilen bzw. höheren Farbtemperaturen, für die Steuerung circadiane Rhythmen wird in zahlreichen Studien dokumentiert [12-17]. Licht wirkt dabei einerseits als Zeitgeber [18] auf unseren Organismus ein, andererseits kann Licht aktivierend [19-26] auf uns wirken und kognitive [27-36] sowie emotionale Prozesse und unser Wohlbefinden [37-44] beeinflussen. Dafür scheinen u.a. individuelle Personenmerkmale [45-50], Tages- und Jahreszeit [51-55] eine moderierende Rolle zu spielen.

Überlegungen zu dynamischen Lichtsteuerungen

Es gibt noch wenig publizierte Studien für eine wissenschaftlich validierte Auswahl von dynamisch gesteuerten Beleuchtungssystemen und deren möglichen Auswirkungen am Büroarbeitsplatz [56-68]. Unterschiedliche Ansätze zu dynamischen Arbeitsplatzbeleuchtungen werden umfangreich am Markt beworben und bereits in Betrieben installiert. Daher besteht ein Bedarf an kontrollierten Feldstudien, welche potentielle Wirkungen unterschiedlicher dynamisch gesteuerter Beleuchtungssysteme an Büroarbeitsplätzen systematisch untersuchen und wissenschaftlich fundiert argumentieren können.

In Tabelle 1 folgend exemplarisch angeführte chronobiologische Tagesgänge [69, 70] scheinen den Autoren im Zusammenhang mit dynamisch gesteuerten Beleuchtungssystemen an Büroarbeitsplätzen für eine weiterführende empirische Bewertung von Bedeutung. Dabei wurde bei der Auswahl für diese Studie darauf geachtet, eine (möglichst „primäre“) endogene Prozessvariable als Steuerungsgröße auszuwählen, welche gut auf Licht anspricht.

Durch die bereitgestellte wiederkehrende dynamische Lichtsituation am Arbeitsplatz soll ein Entrainment [71-80] erreicht werden, eine Synchronisation der inneren Uhr mit den (Licht-) Zeitgebern. Aus den vorliegenden Daten zu psychophysiologischen und endokrinen Veränderungen im Tagesverlauf haben wir die Einschlafbereitschaft als endogenen Rhythmus bzw. Basis der dynamischen Lichtsteuerung ausgewählt [81].

Tabelle 1: Potentielle Kenngrößen mit prominenten chronobiologischen Tagesgängen.

Die angeführten endogenen Prozessmerkmale können durch Zeitgeber, wie z.B. einer künstlichen Beleuchtung, beeinflusst werden.

Nr.	Variable mit endogenen Rhythmen	Quelle - Bsp.	Jahr	Zita
1.	Einschlafbereitschaft, Einschlafen am Steuer	Zulley; Prokop	1995; 1955	[82, 83]
2.	Arbeitskapazität (körperliche max. Leistung)	Voigt et al	1968	[84]
3.	Muskuläre Dauerleistung	Bochnik	1958	[85]
4.	Reaktionszeit	Voigt et al	1968	[84]
5.	Tapping Test	Aschoff et al	1972	[86]
6.	Sehschärfe	Knoerchen et al	1976	[69]
7.	Fehlerhäufigkeit	Hildebrandt	1974	[87]
8.	Stimmung & Antrieb	Seminarversuch	1998	[69]
9.	Accuracy/Speed	Folkard & Monk	1983	[18]
10.	Vitalkapazität	Knoerchen et al	1974	[69]
11.	BRAC	Kleitman, N.	1982	[88]
12.	Homeostatic sleep drive / circadian sleep drive R	Bes	2009	[89]

Weiter relevante Rhythmen sind etwa Leistungsbereitschaft, Gedächtnisleistung & Kreislauf (Herzinfarkt, Schlaganfall, Durchblutung), etc. ...

Studien- und Lichtplanung

Eine systematische Beobachtung potentieller gesundheitsförderlicher Effekte einer chronobiologisch optimierten Beleuchtungssituation kann nur im Setting einer Längsschnittstudie im tatsächlichen Arbeitsumfeld erfolgen (Feldstudie; im Gegensatz zu punktuellen Laborstudien), da potentielle Effekte v.a. mittel- und langfristig erwartet werden [90]. Die bestehende statische Bürobeleuchtung (Standardbeleuchtung) dient als Referenzbedingung (500lx, 3500K) und wird zwei dynamischen Versuchs-(Licht-)Bedingungen gegenübergestellt (vgl. Prüfmittel; Seite 6).

In der dynamischen Versuchsbedingungen 1 (DL1) werden die ArbeitnehmerInnen einer Beleuchtung ausgesetzt, welche dem endogenen Rhythmus bzw. Tagesgang folgt und mit einer ultradianen zwei Stunden Rhythmik (BRAC¹) überlagert ist [69, 88]: Das heißt beispielsweise, dass die Helligkeit der Beleuchtung während des Mittagstiefs geringer wird, um somit den vorherrschenden (endogenen) Rhythmus zu verstärken.

In der alternativen (inversen) dynamischen Versuchsbedingung (DL2) passiert das Gegenteil, die Beleuchtung wird zu Zeiten erhöhter Müdigkeit heller/intensiver. Auch bei der zweiten (endogen inverse) Lichtbedingung sind positive Auswirkungen zu erwarten: Durch die aktivierenden Eigenschaften von Licht sind kurzfristige Leistungssteigerungen möglich. Neben der allgemeinen Aktivierung durch höhere Lichtintensitäten - z.B. bei Müdigkeitsphasen im Tagesverlauf (gegen 14 Uhr - Mittagstief) - hat die „inverse“ Lichtbedingung die potentiell positive Eigenschaft, durch hohe Lichtintensitäten am Morgen, den circadianen Tagesgang zu festigen [57, 91, 92]. Es gibt aber noch keine gesicherten Erkenntnisse, wie sich dies mittelfristig auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit auswirkt, da eine Beeinflussung bzw. Störungen der inneren Rhythmen auch langfristige, gesundheitliche Nachteile bringen kann [93-96].

¹ Der BRAC (Basic rest-activity cycle) ist ein Ruhe-Aktivitätszyklus im Bereich 40–120 Minuten (ultradianer Rhythmus) bzw. das Äquivalent zur zyklischen Abfolge des (REM-NREM-)Schlafes im Wachzustand - eines ca. 1,5 Stunden-Rhythmus – der am Tag auch als Basis-Ruhe-Aktivitätszyklus bezeichnet wird.

Es liegt die Annahme nahe, dass auf Dauer eine Beleuchtung die den inneren Rhythmen angepasst ist, eine „Stabilisierung“ bringt und damit das Wohlbefinden der betroffenen MitarbeiterInnen erhöhen könnte bzw. gesundheitsförderlich wirkt. Um diese potentiellen langfristigen Effekte zu untersuchen, wurden Zeitspannen bzw. eine Expositionsdauer, von drei Wochen pro Bedingung gewählt. Die Auswahl der Beleuchtungskurve (variierend in Helligkeit und Farbtemperatur) orientiert sich einerseits an Ergebnissen aus von Laborstudien und andererseits an chronobiologischen Erkenntnissen, den Verläufen von endogenen biologischen Rhythmen über den Tag.

Methode

Im Rahmen einer kontrollierten Feldstudie mit Messwiederholungen wurden drei unterschiedliche Beleuchtungssituationen an insgesamt vier Arbeitsplätzen näher betrachtet. Es gab eine statische (Referenz-) Lichtbedingung (SL; Standardbeleuchtung, die in den Büros installiert war), eine endogene dynamische Beleuchtung (DL1) und eine inverse dynamische Beleuchtung (DL2; gegenläufig dem inneren Rhythmus). Alle Beleuchtungssituationen wurden mittels Leuchtstoffröhren realisiert.

Prüfmittel: Beleuchtungsmittel und Steuerelemente

Die Beleuchtungssituationen entsprachen in allen Versuchsbedingungen und zu jederzeit den derzeit gültigen Normen [97]. Die verwendeten Leuchtmittel (Leuchtstofflampen) wurden von der Firma Zumtobel zur Verfügung gestellt. Die Lichtpläne und die Installation der Lichtsteuerung wurden von professionellen Zumtobel-Mitarbeitern erstellt und ausgeführt. Die Beleuchtungssituationen wurden im Studienverlauf von unabhängigen ExpertInnen der TU-Graz (Institut für Raumgestaltung) vermessen und in einem umfassenden Messbericht dokumentiert [98]:

Tabelle 2: Prüfmittel: Überblick Bürobeleuchtung ohne Tageslichteinfluss (vgl. Abb. 1 & Abb. 2).

Die vorgestellten Werte wurden dem Messbericht der Technischen Universität Graz entnommen bzw. daraus errechnet.

Durchführungsorte		Beleuchtungsstärke (lx)			Farbtemperatur (K)			Messpunkte (Arbeitsplätze)
		mean	SD	Range	mean	SD	Range	
1. Siemens-Vertrieb	SL	320,5	160	151-651	3322	49	3270-3448	15
2. Siemens-Einkauf	SL	596,5	149	308-775	k.A.	k.A.	k.A.	18
3. LKH-Verwaltung	SL	536,6	88	386-626	3580	26	3537-3608	8
4. LKH-Apotheke	SL	643,7	109	565-769	k.A.	k.A.	k.A.	3
Gesamt	SL	524		R: 151-775	3451		R: 3270-3608	
	DL1	863		R: 531-1230	3781		R: 3090-4238	
	DL2	686		R: 486-961	3280		R: 2909-3776	

SL... statische, alte Beleuchtungssituation

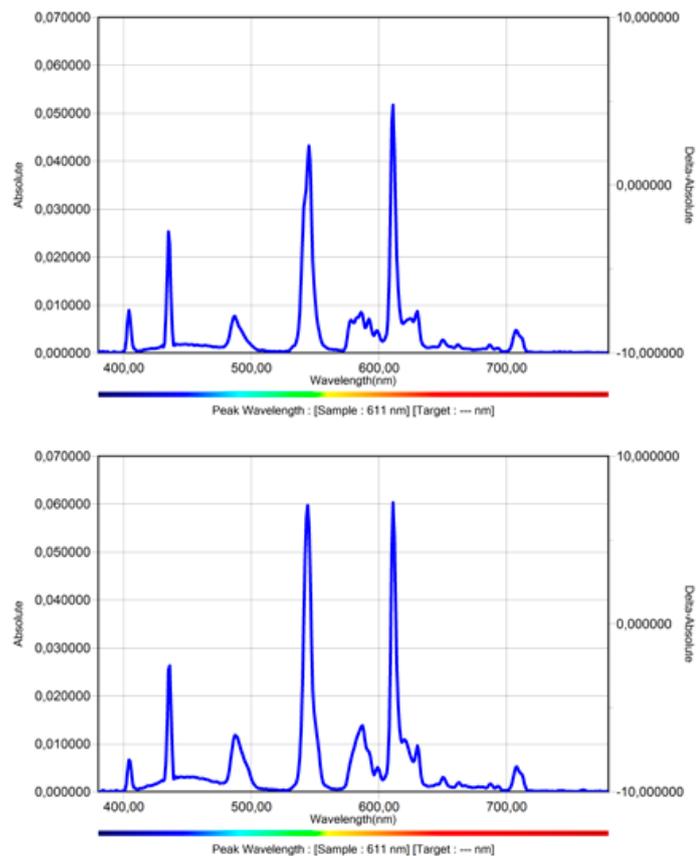


Abb. 1: Spektrale Zusammensetzung – Beispiele v. Messergebnisse für die statische Beleuchtung b. Siemens, Weiz.

Siemens-Weiz: Vertrieb (li. Abb.): Durchschnittliche Beleuchtungsstärke direkt an Computerarbeitsplätzen (Tischkante des jeweiligen Computerarbeitsplatzes Messsensor: Tischoberkante ca. 75-80 cm über Boden) 320,5 +/- 160 lx (R: 151 – 651) und 3322 +/- 49 K (R: 3270 – 3448) bei 15 Messpunkten bzw. Arbeitsplätze (AP); 22 Stk. Mantelleuchte (inkl. 2 Wandeluchten mit 2x36W: L 36W/840), Leuchtmittel: (1x40W), Osram Dulux L 40W/840. Einkauf (re. Abb.): MW=596,5 +/- 149 lx (R: 308 - 775) bei 18 Messpunkten bzw. AP (Messergebnisse zur Farbtemperatur nicht vorliegend); 26 Stk. Pendelleuchten mit Abhängung (1x58W + 2x36W), Leuchtmittel: Osram Lumilux 36/840 & 58/840.

LKH-Weiz (nicht dargestellt): Verwaltung: Durchschnittliche Beleuchtungsstärke direkt an Computerarbeitsplätzen (Tischkante des jeweiligen Computerarbeitsplatzes Messsensor: Tischoberkante ca. 75-80 cm über Boden) 536,6 +/- 88 lx (R: 386 – 626) und 3580 +/- 26 K (R: 3537 – 3608) bei 8 Messpunkten bzw. Arbeitsplätze (AP); 6 Stk. Pendelleuchten mit Abhängung (2x58W), Leuchtmittel: Philips TL-D Super 80 58W/840. Apotheke: MW=643,7 +/- 109 lx (R: 565 - 769) bei 3 Messpunkten bzw. AP (Messergebnisse zur Farbtemperatur nicht vorliegend); 2 Stk. Pendelleuchten mit Abhängung (2x58W), Leuchtmittel: Philips TL-D Super 80 58W/840.

Technische Beschreibung der dynamisch angesteuerten Leuchtstofflampen

Für die dynamische Beleuchtung wurden Lumilux T16 24W 865 und Lumilux T16 24W 830 (jeweils 2/24W+2/24W p. Stk.) als Leuchtmittel verwendet. In Abhängigkeit von Raumgröße und räumlichen Gegebenheiten wurde an den vier Studienorten eine unterschiedliche Anzahl an Leuchtkörper installiert (8 bis 57 Stk; T16 Q606 & T16 M625), um entsprechend den Vorgaben, eine vergleichbare dynamische Arbeitsplatzbeleuchtung zu erreichen.

Bei einer empirischen Kontrolle der dynamischen Lichtsituationen (vgl. Tabelle 2 & Abb. 2) zwischen den unterschiedlichen Arbeitsplätzen zeigt sich, dass der zeitliche Verlauf der Beleuchtungsstärken innerhalb einer Lichtbedingung als identisch angesehen werden kann (DL1: $r=.95$; DL2: $r=.99$). Ebenfalls kann die gewünschte negative (inverse) zeitliche Dynamik zwischen DL1 und DL2 bestätigt werden ($r=-.82$ bis $-.86$). Die beobachtete mittlere Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur am Arbeitsplatz bzw. zwischen den Lichtbedingungen konnte in der Praxis, entgegen der Lichtplanung, nicht unmittelbar vergleichbar umgesetzt werden.

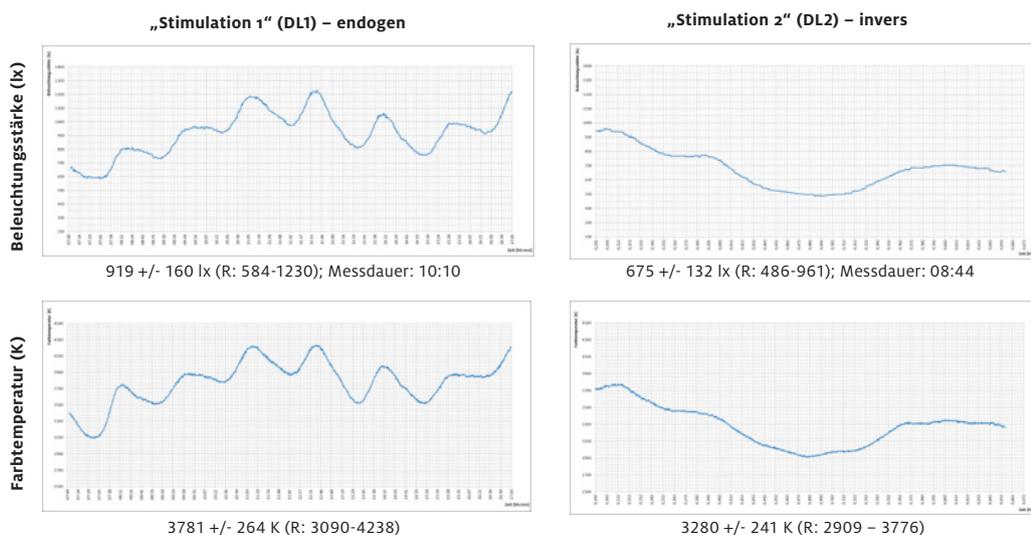


Abb. 2: Messbeispiele für umgesetzte dynamische Lichtsituation am Arbeitsplatz (7am bis 5pm).

Die Messdauer an einem repräsentativen Messpunkt betrug ca. 10 Stunden in (24 Sekunden Intervalle) und wurde ohne Tageslichteinfluss (in der Nacht) durchgeführt.

Eine Umrechnung in eine „biologisch wirksame Beleuchtungsstärke“, die konsumierte Lichtdosis („luxh“) bzw. einen „Circadian Action Factor (acv)“ ist nicht erfolgt [7].

Die folgenden Bilder in Abb. 3 zeigen Beispiele für die untersuchten Büroarbeitsplätze, wobei die „alten“ statischen Bürobeleuchtung (Hängeleuchten) und dynamische Bürobeleuchtung [Anbau- (li.) bzw. Einbau- (re.) Korbleuchten]. Erkennbar ist hier auch die recht heterogene räumliche Situation (u.a. unterschiedliche Tageslichteinflüsse) zwischen den Durchführungsorten.



Abb. 3:
Durchführungsorte & Beleuchtungssituationen: „Alte“ und „dynamische steuerbare“ Leuchtstofflampen.

Die Studie (Datenerhebung) dauerte 25 Wochen, wobei neben einer prüfärztliche Eingangs- und Ausgangsuntersuchung insgesamt 15 Messungen an einer Versuchsperson durchgeführt wurden. Neben standardisierten Fragebogenmessungen kamen 24h-EKG-Messungen (HRV-Analyse) und Speichelmessungen zum Einsatz. In folgender Abb. 4 ist das Studiendesign bzw. der zeitliche Ablauf grafisch dargestellt.

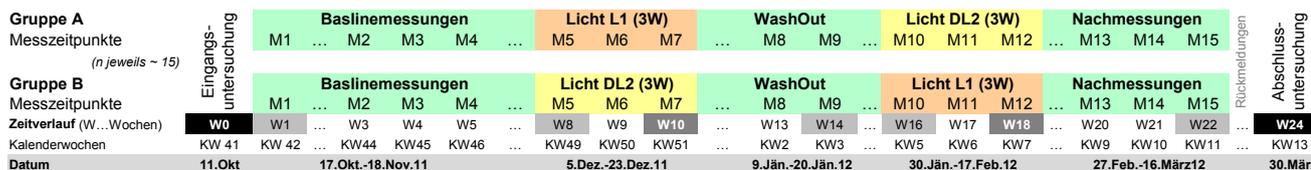


Abb. 4: Studiendesign und zeitlicher Ablauf.

Grau hinterlegte Zeitpunkte beinhalten zusätzlich zu Fragebögen auch eine 24h-EKG-Messung und dunkelgrau hinterlegt eine EKG Messung und Speichelmessungen (Cortisol). DL ... dynamische Lichtsituation; grün hinterlegt ... statische („alte“) Standardbeleuchtung;

Als Referenzwerte wurden Ausgangsmessungen unter Standardbeleuchtung (aktuell vorherrschende, statische Beleuchtung in den jeweiligen Büroräumlichkeiten) durchgeführt. Insgesamt 31 Personen (vgl. Abb. 6) aus vier unterschiedlichen Großraumbüros (Siemens und LKH in Weiz) unterzogen sich allen drei Lichtbedingungen sowie einer Ausgangsmessung. Da insbesondere DL1 und DL2 von Interesse sind, wurden diese gekreuzt durchgeführt, um Reihenfolgeeffekte und saisonale Einflüsse ausschließen zu können.

Herzrate und Herzratenvariabilität

Die Herzrate ist eine der wichtigsten Stellgrößen eines komplexen Regelnetzwerkes, an dem Herz, Kreislauf, Atmung, Temperatur, Stoffwechsel und psychomentele Einflüsse beteiligt sind. Dies verleiht der Herzrate ihre typische zeitliche Struktur, die als Herzratenvariabilität messbar wird. Um den Tonus (die Aktivität) der einzelnen Äste des autonomen Nervensystems beschreiben zu können, analysiert man die Modulationen der Momentanherzrate. Die schnellen Änderungen werden dem Vagus (dem Hauptnerv des parasympathischen Teils des Autonomen Nervensystems) zugeordnet². Der Vagus ist in Ruhe bzw. in Erholungszuständen aktiv. Langsamer agiert der Sympathikus, der aktiv wird, wenn der Mensch in einen leistungsbereiten Zustand kommen soll.

Gebräuchliche HRV-Parameter im Zeitbereich sind:

- SDNN [ms]: Standardabweichung der RR-Intervalle über ein bestimmtes Zeitintervall (i.R. über 24h bzw. 5min), ein Maß für die Gesamtvariabilität im Zeitbereich.
- rMSSD [ms]: die Wurzel aus den gemittelten Quadraten der Differenzen aufeinander folgender RR-Intervalle. Dieser Parameter entspricht vor allem kurzfristigen, d.h. hochfrequenten Schwankungen.
- logRSA [ms]: Der Median der absoluten Differenzen aufeinander folgender Herzfrequenzwerte misst, ähnlich der HF (siehe unten), vorrangig die raschen, atmungsinduzierten Änderungen, ohne jedoch eine strikte Grenze bei einer bestimmten Frequenz zu ziehen (vgl. Moser et al., 1995). Die respiratorische Sinusarrhythmie (RSA) ist somit die hochfrequente Variabilität der Herzfrequenz, welche die Stärke der Modulation des Herzrhythmus durch die Atmung widerspiegelt. Sie ist gleichzeitig ein Maß für den Tonus der Vagusaktivität.
- QPA [-]: Der Puls-Atem-Quotient gibt an, wie oft das Herz während eines Atemzuges schlägt (Verhältnis der Herzschläge zu einem Atemzyklus).

² Neuere Studien belegen, neben der essentiellen Rolle für Erholung, Schlaf, Regeneration, Heilung, Aufbau und Fortpflanzung und der cardioprotektiven Funktion des Vagustonus, die Bedeutung des Vagustonus bei Entzündungen bzw. in Zusammenhang mit immunologischen Prozessen.

Bei der Fouriertransformation wird das Signal in eine Summe von Sinuskurven mit unterschiedlichen Frequenzen aufgetrennt und die zeitbasierte in eine frequenzbasierte Betrachtung überführt. Hier geht die Zeitinformation verloren, was zumindest bei stationären Signalen keine Einschränkung darstellt. Dafür wird bei der Analyse eine Kurzzeitbetrachtung in einem definierten, konstanten Zeitfenster notwendig (i.R. fünf Minuten).

Hierzu hat sich folgende Einteilung der HRV-Kennwerte im Frequenzbereich durchgesetzt:

- TOT (total frequency): Die Leistung im gesamten Frequenz- bzw. Spektralbereich von 0.033 - 0.5 Hertz (Hz).
- HF (high frequency): Der HF-Bereich umfasst Schwankungen mit Periodendauern von 2.5 Sekunden bis 7 Sekunden (0.15 - 0.4 Hz). Die Leistung im HF-Band entspricht der Aktivität des Parasympathikus und zeigt hauptsächlich Herzfrequenzvariationen, die auf Modulationen über die Atmung zurückzuführen sind.
- LF (low frequency): Das LF-Band umfasst den Frequenzbereich von 7 - 25 Sekunden (0.04 - 0.15 Hz). Die Leistung in diesem Band wird sowohl vom Parasympathikus (tiefe Atemzüge) als auch vom Sympathikus beeinflusst. Diese Region wird auch Barorezeptorbereich genannt, da die Aktivität dieses Rezeptors hier sehr gut wiedergespiegelt wird. Die niederfrequenten Komponenten der Herzfrequenzvariabilität korrespondieren mit der Blutdruckrhythmik mit einer Frequenz von ca. 0.1 Hz.
- LF/HF (vegetativer Quotient, VQ): Der Quotient aus den beiden vorangehenden Parametern spiegelt das momentane vegetative Aktivierungsniveau des Organismus wieder und ist ein Maß für die „autonome Balance“. Höhere Werte zeigen eine aktive, leistungsorientierte Einstellung des Körpers, tiefe Werte eine auf Erholung ausgerichtete.
- VLF (very low frequency): Das VLF-Band entspricht der Leistung im niedrigen Frequenzbereich der Herzschlagabfolgen von 0.0033 - 0.04 Hertz (Hz). Dieses Frequenzband der HRV unterliegt vor allem Einflüssen des sympathischen Nervensystems. In der Literatur wird die VLF-Komponente der HRV mit der Thermoregulation und der peripheren Zirkulation in Verbindung gebracht, welche ähnliche Schwingungen wie die Durchblutungsrhythmik aufweist. Taylor et al. (1998) berichten über einen Zusammenhang der VLF-Komponente mit dem Renin-Angiotensin System. Die Rolle der VLF-Komponente wird u.a. auch bei Depressionen bzw. bei erhöhter Morbidität ins Spiel gebracht.

Das in dieser Studie verwendete HRV-Messgerät, das ChronoCord® (Human Research Institut, Graz; www.humanresearch.at), ist auf die hochgenaue Aufzeichnung von Herzschlagintervallen (RR-Intervallen) spezialisiert (Abtastrate: 8000Hz) und beinhaltet einen Licht- und Beschleunigungssensor. Aus den Herzschlagintervallen, werden offline verschiedene cardiovegetative Parameter der Herzratenvariabilität (HRV) berechnet. Es eignet sich damit zur mobilen Aufzeichnung der funktionellen autonomen Regulation des Kreislaufs und ermöglicht eine 24-Stunden-Kontrolle des Herzrhythmus (Holter-Monitoring), ohne den Tagesablauf der gemessenen Personen nennenswert zu beeinflussen. Die angewandte Messmethode ist nichtinvasiv.



Abb. 5: ChronoCord– Hochauflösender EKG-Rekorder.

StudienteilnehmerInnen

Eine Stichprobe von 36 Freiwilligen wurde aus der Firma Siemens Weiz und dem LKH Weiz in persönlichen Gesprächen und bei Studienvorstellungen vor der jeweiligen Arbeitsgruppe/Abteilung rekrutiert (vgl. Abb. 6).

Tabelle 3: Stichprobenmerkmale bei Eingangsuntersuchung bzw. Baselinemessung (Analysestichprobe; N=31*).

Die StudienteilnehmerInnen waren überwiegend Vollzeitbeschäftigt (> 90%, 3 Personen waren halbtags berufstätig/Teilzeit).

Variable	Mittelwert	Std.abw.	min.	max.	Anzahl/Anmerkung
Alter	38,33	9,65	21	60	31
Geschlecht					13 male, 18 female
BMI	25,15	4,64	19	40	
Blutdruck (dia/sys)	85/130	11/21	63/91	106/178	
Sport (minutes/week)	118,06	103,81	0	360	MED: 90min; 6 Vpn kein Sport
Schlafverhalten					
Licht aus	22:04	0:35	21:00	23:30	lt. PSQI
Licht an	5:55	0:26	05:00	07:00	lt. PSQI
Schlafdauer (in Stunden)	7,11	0,59	6,00	8,00	lt. PSQI
Habituelle Schlafqualität (PSQI)	4,14	1,62	1	9	3 von 31 Vpn: Wert > 5
MCTQ (MSF)	3:00 ³	0:50	01:30	04:38	MSF – midsleep on free days
Weitere Stichprobenmerkmale					
Familienstand	2/3 der Vpn verheiratet bzw. in Partnerschaft lebend, 1/3 ledig bzw. 1 Vp geschieden mit 0-3 Kindern (ca. 2/3 der Vpn haben Kinder)				
Bildungsstand	ca. 36% Haupt- oder Realschulabschluss, 15% Matura und 49% Hochschulreife				
Arbeitsplatz**	Büro- bzw. Computerarbeitsplätze in Großraumbüros (Verwaltung, Einkauf und Verkauf)				
Medikation/Grunderkrankungen	Keine klinisch- bzw. studienrelevante chron. Erkrankungen (1x Gastritis) und diverse unbehandelte kleinere somatische Symptome, wie orthopädische Beschwerden, Verkühlungssymptome [Schnupfen, Husten] und Allergien; Keine Dauermedikationen (Ausnahme: Kontrazeptiva) in der Analysestichprobe.				

* Zwei Männer im Alter von 38 bzw. 60 Jahren und drei Frauen (19, 28, 34 Jahre) werden in der Analysestichprobe von 31 Vpn nicht berücksichtigt (vgl. Abb. 6), da diese auf Grund von HRST (2), Arbeitsplatzwechsel (2) bzw. Schwangerschaft (1) nicht die definierten Einschlusskriterien erfüllten.

** vgl. [98]

³ Auch bei der Frage im MCTQ nach der persönlichen Einschätzung der VPN, beschreiben sich ca. ^{2/3} in der Stichprobe als (eher) Morgentypen (Lerchen).

Nach einer Informationsveranstaltung lagen verbindliche, mündliche Zusagen von den Abteilungsleitern der DTL (Vertrieb) und ETG SMP (Einkauf) bei Siemens Weiz und der Pflegedirektorin des LKH Weiz vor. Ebenso haben sich ein Großteil der in Frage kommenden MitarbeiterInnen (> 80% der MA einer Abteilung/Großraumbüros) sowohl von Siemens Weiz als auch des LKH Weiz zur Studienteilnahme bereit erklärt. Alle Personen die an der Längsschnittuntersuchung teilnahmen, mussten mindestens 20h in der Woche am Arbeitsplatz verbringen und ihre regelmäßigen Arbeitszeiten mussten zwischen 6:00 und 20:00 liegen. Nur gesunde Männer und Frauen im Alter zwischen 18 und 60 Jahren wurden in die Studie aufgenommen. Die TeilnehmerInnen wurden zu Studienbeginn noch einmal mündlich und schriftlich über Inhalt und

Durchführung der Studie informiert, wobei ihnen bei einer Nichtteilnahme keine beruflichen Nachteile entstanden. Es erfolgte keine finanzielle Vergütung für die Studienteilnahme. Erst wenn sie ihr schriftliches Einverständnis gaben und prüfärztlich abgeklärt waren, nahmen sie tatsächlich an der Studie teil.

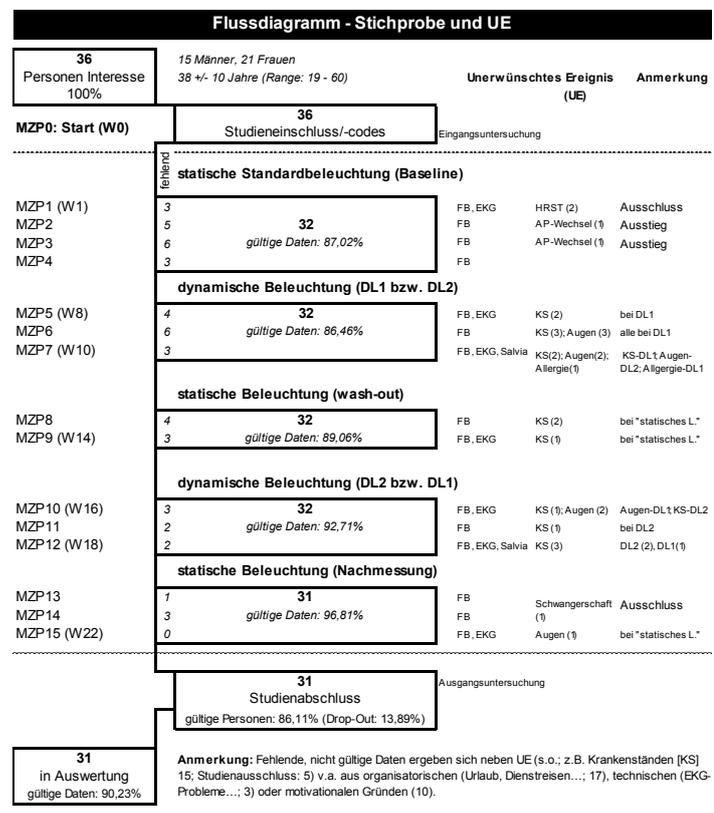


Abb. 6: Stichprobenbaum – Flussdiagramm.

Einzelne fehlende Daten in der Analytestichprobe werden für die statistische Analyse durch den individuellen Gesamtmittelwert zu dem entsprechenden Messzeitpunkt ersetzt. MZP-Messzeitpunkt; W-Woche; DL-dynamische Lichtsituation; AP-Arbeitsplatz; FB-Fragebogen; HRST-Herzrhythmusstörungen;

Das mittlere Alter der Versuchspersonen (Vpn) betrug 38 +/- 10 Jahre mit einem Range zwischen 21 bis 60 Jahre. Die gültige Analytestichprobe von 31 Versuchspersonen (Vpn; vgl. Abb. 6) beinhaltete 13 Männer und 18 Frauen (vgl. Tabelle 3). Die Vpn waren alle gesund (lt. prüfärztlicher Eingangsuntersuchung und Baselineerhebung) und berufstätig (zu >90% Vollzeitbeschäftigt), bei fixen Arbeitszeiten in der Regel zwischen 8 Uhr (am) und 17 Uhr (pm); die Beginn-, Endzeiten variierten je nach Vereinbarung +/- 90 Minuten).

Ergebnisse

Psychologische Ergebnisse

Zufriedenheit mit Beleuchtungssituation

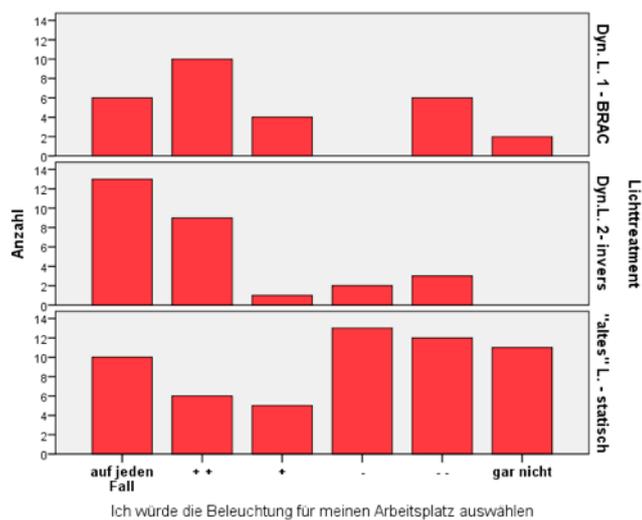


Abb. 7: Subjektive Auswahl einer Lichtbedingung.

Die Befragung bei der Baseline-Bedingung („altes“, statisches Licht) erfolgte zweimalig.

Abb. 7 zeigt die persönliche Präferenz bzw. Anzahl der Einschätzungen für eine Lichtsituation zu Ende der mehrwöchigen Lichtexposition. Die dynamischen Lichtsituationen (DL) werden gegenüber der statischen Lichtbedingung (SL) bevorzugt, wobei v.a. die inverse dynamische Lichtbedingung (DL2) sehr positiv von den TeilnehmerInnen beurteilt wird. Dieser Eindruck wird durch die statistische Analyse bestätigt (Tabelle 4), wobei v.a. die „Zufriedenheit“ zwischen den Lichtbedingungen signifikant differenziert ($p=.012^*$). Dabei ist anzumerken, dass die statische Beleuchtungssituation an den drei Studienorten nicht vergleichbar war, bzw. es allgemein merkliche Einflüsse des Studienortes gibt, auf welche an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

Tabelle 4: Subjektive Lichtbewertung – statistische Kennwerte.

subjektive Lichtbewertung (n=25)							
		95%-Konfidenzintervall			abh. ANOVA		
Maß	Licht	Mittelwert	Untergrenze	Obergrenze	F	p	Eta ²
Zufriedenheit	SL	52.60	41.66	63.54	4.86	.012*	.168
	DL1	66.80	56.45	77.15	<i>sign. Post-Hoc: SL vs. DL2, DL1 vs DL2</i>		
	DL2	76.00	65.51	86.49			
Selbstwahl	SL	2.80	2.15	3.45	3.13	.053(*)	.115
	DL1	1.84	1.15	2.53	<i>Post-Hoc: nicht sign.</i>		
	DL2	2.88	2.11	3.65			
MANOVA					5.79	.003**	0.524

Psychometrische Ergebnisse im Studienverlauf (Beschwerden und Befinden am Abend)

Das subjektive Befinden, Beschwerdesymptome, die aktuelle Schlaferholung und die Erholungs-Beanspruchungsbilanz wurden wöchentlich zu konstanten Tageszeiten und Wochentag über den Studienzeitraum erfasst (15 Messzeitpunkte). Die Betrachtung der Beschwerdesymptome zeigt eine signifikante Abnahme über den Studienverlauf (vgl. Abb. 8; $F=3.489$, $p=.000^{**}$, $N=30$), wobei keine lichtspezifischen Unterschiede zwischen den Lichtbedingungen beobachtet werden.

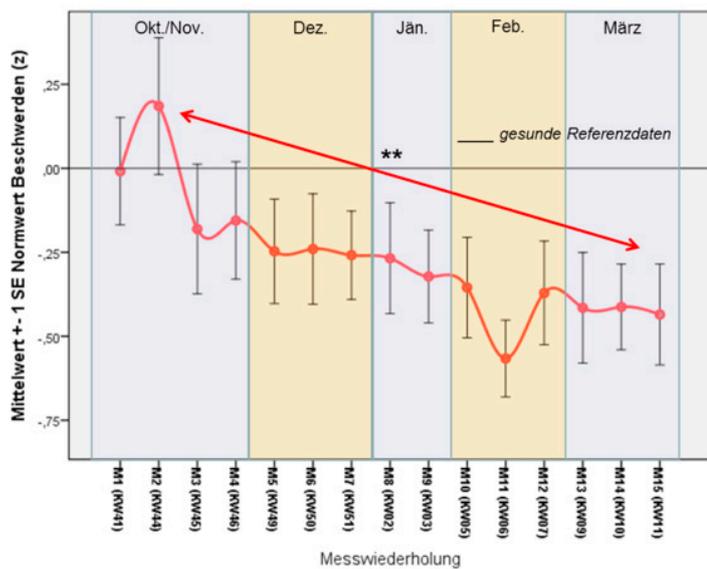


Abb. 8: Subjektive Beschwerden im Studienverlauf (B-L).

Beschwerdesymptome reduzieren sich signifikant im Projektverlauf (Zeit: $p=.000^{***}$).
Keine spezifischen Unterschiede zwischen DL1 vs. DL2 ($p=.450$).

— Null-Linie: Gesunde Referenzdaten

Ein ähnliches Bild, nämlich eine tendenzielle Verbesserung im Studienverlauf, zeigt sich in den erfassten drei Befindensdimensionen (Abb. 9), wobei sich keine deutlichen signifikanten Unterschiede zwischen den Lichtbedingungen abzeichnen. Einzelvergleiche zeigen leichte Vorteile für DL2 in der Skala Ruhe-Unruhe und Nachteile für DL1 in der Skala Wachheit.

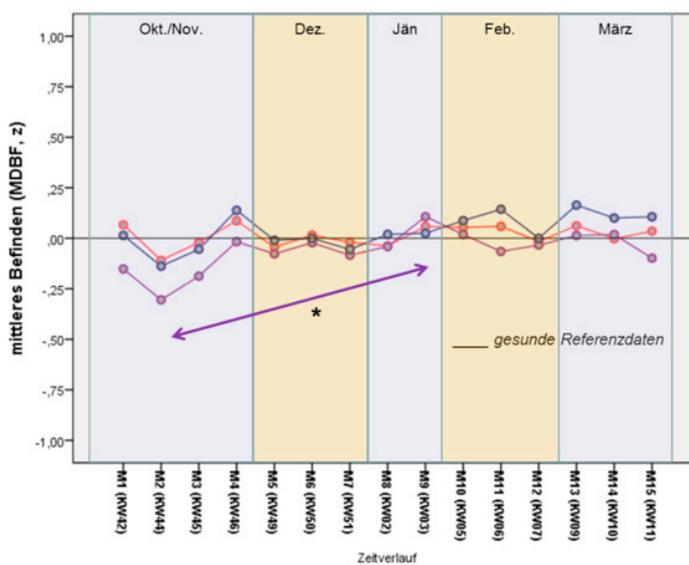


Abb. 9: Subjektives Befinden im Studienverlauf (MDBF).

Das subjektive Wachempfinden ist zu Studienbeginn reduziert (Zeit: $p=0.029^*$).

Keine signifikanten Innersubjekteffekte zwischen DL1 vs. DL2 ($p=0.260$).

— Null-Linie: Gesunde Referenzdaten

— Normwert Skala Gute Stimmung
 — Normwert Skala Wachheit - Müdigkeit
 — Normwert Skala Ruhe - Unruhe

Erholungs-Beanspruchungsbilanz

Über den Studienverlauf ändert sich die Erholung (eingeschätzt jeweils für die letzten sieben Tage) nicht, wohingegen eine tendenzielle Reduktion beanspruchender Aktivitäten und Verhaltensweisen [Zeit: $p=0.067(*)$] beobachtet werden kann (nicht dargestellt).

Bei differenzierter Betrachtung der unterschiedliche Lichtbedingungen zeigt sich eine signifikante Wechselwirkung (MANOVA: Lichtbedingung x Zeitpunkt: $p=0.022*$; vgl. Abb. 10). In der ersten Woche der dynamischen BRAC-Lichtbedingung (DL1) zeigt sich eine deskriptiv höhere Erholungsaktivität, welche in der dritten Woche merklich abfällt. Bei den Bedingungen DL2 und SL ist hingegen der gegenläufige Trend zu beobachten.

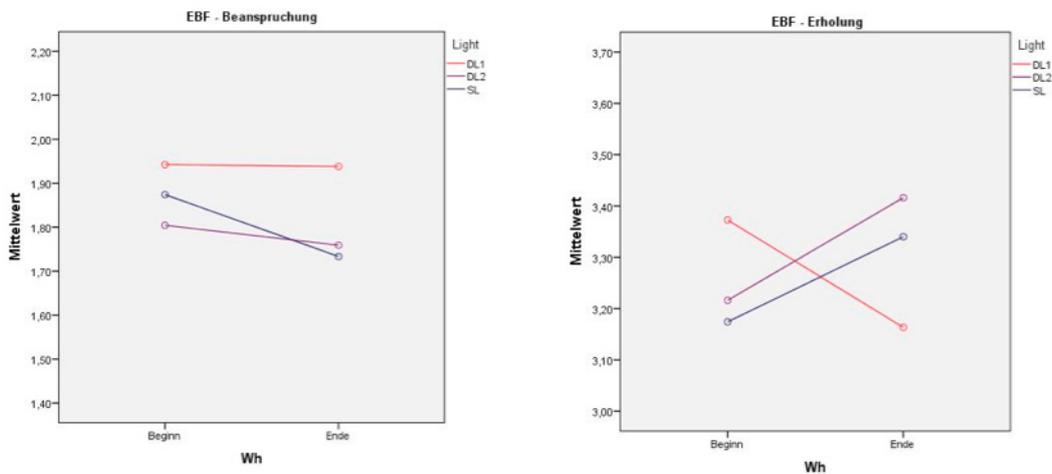


Abb. 10: Lichtbedingungen und Erholungs-Beanspruchungsbilanz (EBF).

Bei univariater Betrachtung der einzelnen Dimensionen des EBF's zeigt sich, dass die Skala „Energierlosigkeit einen Lichteffect zeigt. Diese ist in der Bedingung DL2 am geringsten ausgeprägt (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Subskalen des EBF – statistische Kennwerte.

	EBF-Subskalen: Tests auf Univariate									
	Light			Wh			Light * Wh			
	F	p	Eta ²	F	p	Eta ²	F	p	Eta ²	
Subtest 1: Allgemeine Beanspruchung	.341	.713	.012	1.120	.299	.037	.666	.517	.022	
Subtest 2: Emotionale Beanspruchung	.837	.438	.028	4.257	.048	.128	b.	1.238	.298	.041
Subtest 3: Soziale Beanspruchung	.893	.415	.030	.908	.349	.030	.282	.755	.010	
Subtest 4: Ungelöste Konflikte	2.913	.062	.091	2.171	.151	.070	.734	.484	.025	
Subtest 5: Übermüdung	.964	.387	.032	.438	.513	.015	.591	.557	.020	
Subtest 6: Energierlosigkeit	3.246	.046	.101	a.	.763	.390	.026	.786	.460	.026
Subtest 7: Körperliche Beschwerden	1.546	.222	.051	2.154	.153	.069	.620	.541	.021	
Subtest 8: Erfolg	2.407	.099	.077	.005	.942	.000	1.606	.209	.052	
Subtest 9: Erholung im sozialen Bereich	1.144	.326	.038	.475	.496	.016	2.209	.119	.071	
Subtest 10: Körperliche Erholung	1.967	.149	.064	.033	.856	.001	2.697	.076	.085	
Subtest 11: Allgemeine Erholung	.056	.945	.002	.541	.468	.018	3.731	.030	.114	c.
Subtest 12: Erholbarer Schlaf	.225	.799	.008	11.033	.002	.276	2.007	.144	.065	

a. DL1: 1.86; DL2: 1.56; SL: 1.71

b. Beginn: 1.95; Ende: 1.81

c. DL1: 3.65-3.30; DL2: 3.45-3.50, SL: 3.45-3.58

Physiologische Ergebnisse

In Ergänzung zu den wöchentlichen psychologischen Messungen fanden die 24h-EKG-Messungen zur Bestimmung der cardiovegetativen Aktivierung in einem zwei Wochen Raster statt. Somit erfolgte jeweils in der ersten Woche bzw. in der dritten (letzten) Woche einer Lichtexpositionsbedingung eine circadiane Messung. In der Bedingung SL (statisches, „altes“ Licht) erfolgte jeweils eine Messung [Baseline, WashOut (WO) 1 & 2].

In der Herzrate und HRV-Kennwerten im Wachen bzw. im Schlafen zeigt sich eine zeitliche Veränderung im Studienverlauf (Herzrate: $p=.058$, $\ln HFrr$: $p=.009$, $\ln LFrr$: $p=.103$, $\ln TOTrr$: $p=.050$, $\ln VLFr$: $p=.102$, $\log RSArr$: $p=.020$, $SD1$: $p=.016$, $SD2$: $p=.061$, $SDNN$: $p=.061$, $VQrr$: $p=.008$), welche auf eine circaannuale bzw. jahreszeitliche Rhythmik rückschließen lässt: Die Herzrate steigt über den Winter zum Frühjahr hin leicht an und die HRV-Kennwerte sinken, wodurch es zu einer Verschiebung in Richtung Sympathikotonie kommt. Auch der Weihnachtsurlaub scheint hier einen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung auszuüben (nicht dargestellt).

Cardiovegetative Aktivierung im Studienverlauf und bei einzelnen Lichtbedingungen

Bei einem Vergleich der (gekreuzt durchgeführten) Lichtbedingungen zeigen sich in der Herzrate - je nach Berechnungsmodell - leichte Unterschiede zwischen den Lichtbedingungen (vgl. Tabelle 6), wobei die Bedingung DL1_2 (3. Woche unter DL1), durch eine etwas höhere Herzrate auffällt (Post-HocLSD: sign. Unterschied zu SL-Base, SL-WO1 & DL2_1; nicht dargestellt).

Tabelle 6: Signifikanzniveaus cardiovegetativer HRV-Kennwerte in Abh. von den Lichtbedingung/-folge (n=26).

HRV-Kennwert	Zeitraum	Tests auf Univariate			Multivariat		
		F	p	Eta ²	F	p	Eta ²
ATMF	Schlaf	1.105	.362	.042	.980	.468	.038
	Wach	.775	.591	.030			
HR	Schlaf	2.227	.043	.082	1.891	.035	.070
	Wach	1.442	.202	.055			
InHFrr	Schlaf	2.669	.017	.096	2.267	.009	.083
	Wach	2.333	.035	.085			
InLFrr	Schlaf	1.720	.120	.064	1.207	.277	.046
	Wach	1.092	.370	.042			
VQrr	Schlaf	2.585	.021	.094	3.064	.000	.109
	Wach	3.021	.008	.108			
InTOTrr	Schlaf	1.893	.085	.070	1.288	.224	.049
	Wach	1.466	.194	.055			
InVLFrr	Schlaf	1.433	.205	.054	1.252	.247	.048
	Wach	1.619	.145	.061			
logRSArr	Schlaf	2.802	.013	.101	2.190	.012	.081
	Wach	1.735	.116	.065			
SD1	Schlaf	2.083	.058	.077	1.888	.035	.070
	Wach	2.440	.028	.089			
SD2	Schlaf	1.749	.113	.065	1.416	.157	.054
	Wach	1.775	.108	.066			
SDNN	Schlaf	1.693	.126	.063	1.320	.206	.050
	Wach	1.709	.123	.064			
QPArSa	Schlaf	2.150	.051	.079	1.683	.070	.063
	Wach	1.342	.242	.051			
r.valid	Schlaf	1.402	.217	.053	1.102	.358	.042
	Wach	.805	.568	.031			

Potentielle Auswirkungen der einzelnen Lichtfolgen sind v.a. in vagalen (Schlaf-)Kennwerten zu erkennen (vgl. Tabelle 6; InHFrr, logRSArr und SD1), wobei die Dauer der Lichtexposition (erste vs. dritte Woche) eine entscheidende Rolle zu spielen scheint (vgl. Abb. 11 & Abb. 12). So zeigt sich in der vegetativen Balance bei DL1 eine Zunahme des VQrr (In LF/HF ratio) in der dritten Woche im Wachzustand, wohingegen im Schlaf der umgekehrte Effekt, eine Verschiebung in Richtung einer vagotoneren Einstellung bei DL1 zu beobachten ist. Bei DL2 ist dieser Effekt so nicht zu beobachten. Dies führt zu einer verstärkten circadianen Amplitude bzw. Tagesgang in der Bedingung DL1 nach drei wöchiger Lichtexposition, wohingegen diese bei DL2 nur anfänglich, in der ersten Woche beobachtet werden kann (vgl. Abb. 12). Die statistischen Kennwerte der vegetativen Balance zu den einzelnen Lichtbedingungen werden in Tabelle 7 vorgestellt.

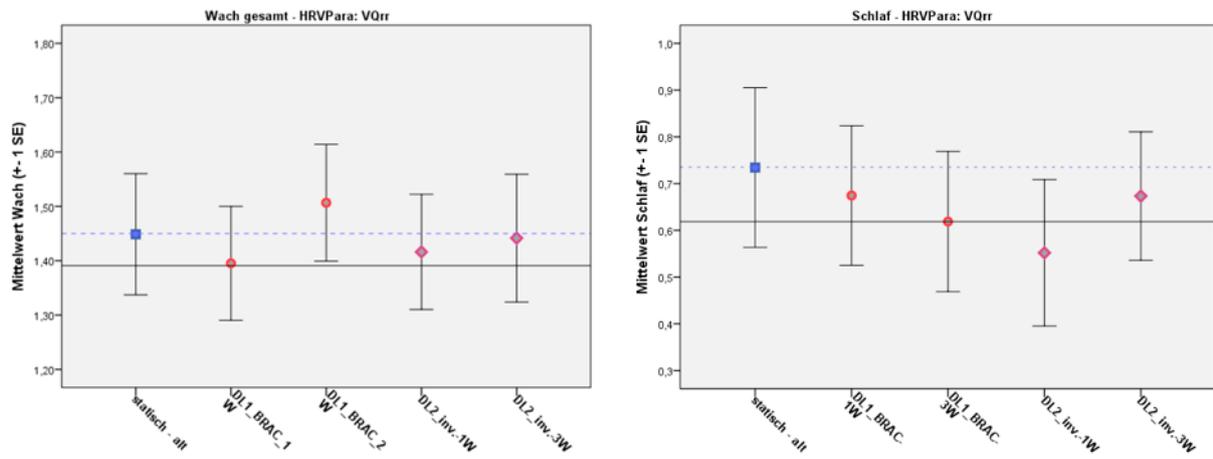


Abb. 11: Vegetative Balance (VQrr; LF/HF ratio) zu den Lichtbedingungen im Wachen bzw. anschließendem Schlaf.
 — gesunden Referenzdaten; - - - - statisches Licht: mean(WO1 & WO2)

Tabelle 7: Vegetative Balance (VQrr) im Wachen und Schlaf – statistische Kennwerte.

		Lichttreatment * Wach_Schlaf							
Maß:VQrr (n=26)		Mittelwert	95%-Konfidenzintervall		Effekt	abh. MANOVA			
Lichtfolge	Untergrenze		Obergrenze	F		p	Eta ²		
Schlaf	SL_Base	0.52	0.18	0.86					
	DL1_1	0.67	0.37	0.98	Abfolge	2.459	.027*	0.09	
	DL1_2	0.62	0.31	0.93	WW	3.263	.005**	0.12	
	SL_WA1	0.75	0.40	1.11					
	DL2_1	0.55	0.23	0.87	<i>sign. Post-Hoc Tests Abfolge:</i>				
	DL2_2	0.67	0.39	0.96	SL_Base vs. alle außer DL2_1				
	SL_WA2	0.71	0.35	1.08	DL2_1 vs. SL_WA2				
Wach	SL_Base	1.34	1.11	1.57					
	DL1_1	1.39	1.17	1.61	Univariate Testung:				
	DL1_2	1.49	1.26	1.71	Schlaf	2.585	.021*	0.094	
	SL_WA1	1.38	1.14	1.62					
	DL2_1	1.39	1.17	1.61	Wach	3.473	.003**	0.118	
	DL2_2	1.41	1.17	1.66					
	SL_WA2	1.48	1.24	1.72					

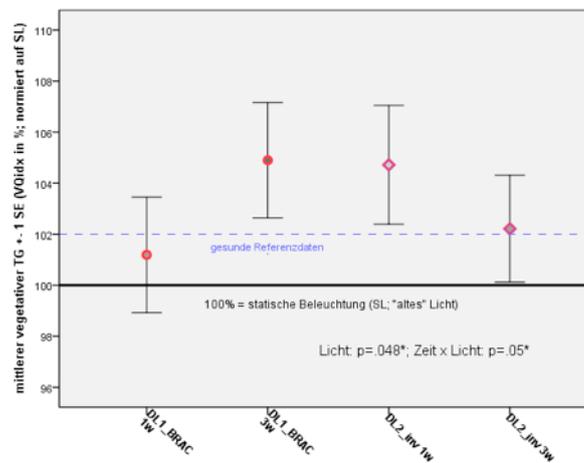


Abb. 12: Cardiovegetativer Tagesgang in % (VQidx*).

— gesunde Referenzdaten; statisches Licht: mean(WO1 & WO2)

*. Der Parameter VQidx errechnet sich aus dem vegetativen Quotienten [$VQ = \ln(LF/HF)$], wobei die Dauer des Schlafes zur Gesamtlänge der Messaufzeichnung berücksichtigt wird. Dieses Verhältnis dient zur Bestimmung eines Schwellenwerts. Der theoretisch ideale Wert liegt bei 100%, d.h. man hat während der gesamten Schlafdauer durchgängig erholungsbezogene Werte, die in der Wachphase nie erreicht wurden.

Bei näherer Betrachtung der LF und HF-Komponenten zeigt sich, dass die durchschnittlich höheren Beleuchtungsstärken und Farbtemperaturen in den dynamischen Beleuchtungssituationen eine Aktivierung im Wachen durch eine Senkung des Vagustonus ($\ln HF_{rr}$) bewirkt haben (vgl. Tabelle 8 & Abb. 13). Dieses vegetative Verhalten ist als Folgewirkung der Arbeitsplatzbeleuchtung am Tag - v.a. bei DL2 - auch im Schlaf zu beobachten. Die $\ln LF_{rr}$ im Wachen zeigt hingegen keine signifikanten Verlaufsreaktionen auf die unterschiedlichen dynamischen Lichtbedingungen. Anders im Schlaf, wo die LF-Komponente nach dreiwöchiger dynamischer (intensiverer) Lichtexposition (DL1 & DL2) im Vergleich zur ersten Woche abnimmt, was auf allgemein ruhigeren Schlaf hindeutet. In Verbindung mit der $\ln HF_{rr}$ -Ausprägung führt dies zu einer relativen Absenkung des VQ im Schlaf und zu den bereits in Abb. 12 vorgestellten stärker ausgeprägtem circadianen Tagesgang.

Tabelle 8: Statische Kennwerte der LF und HF-Komponente in Abh. von den Lichtbedingung/-folge (n=26).

LFrr un HFrr für Schlaf_Wach * Lichtfolge									
Maß	Lichtfolge	Mittelwert	95%-Konfidenzintervall		Effekt	abh. MANOVA			
			Untergrenze	Obergrenze		F	p	Eta ²	
InHFrr Tageszeit: F=30.58, p=.00	Schlaf	SL_B	6.07	5.52	6.61	Lichtfolge WW	1.619	.085(*)	.061
		DL1_1	5.84	5.34	6.33				
		DL1_2	5.79	5.30	6.29				
		SL_WA1	5.71	5.15	6.26				
		DL2_1	5.95	5.46	6.45				
		DL2_2	5.74	5.25	6.24				
	Wach	SL_WA2	5.62	5.05	6.19	sign. Post_Hoc-Tests: InHFrr SL_B vs. DL1_1, DL1_2, SL_WA1; DL2_2; SL_WA2 InLFrr SL_B vs. DL1_2, DL2_2; SL_WA2			
		SL_B	5.28	4.91	5.66				
		DL1_1	5.14	4.78	5.51				
		DL1_2	5.04	4.68	5.41				
		SL_WA1	5.18	4.79	5.57				
		DL2_1	5.11	4.80	5.43				
		DL2_2	5.10	4.72	5.48				
		SL_WA2	5.03	4.65	5.42				
InLFrr Tageszeit: F=0.78, p=.39	Schlaf	SL_B	6.59	6.27	6.90	univariate Testungen: InHFrr Lichtfolge WW	2.709	.016*	.098
		DL1_1	6.51	6.21	6.81				
		DL1_2	6.41	6.10	6.73				
		SL_WA1	6.46	6.15	6.77				
		DL2_1	6.50	6.22	6.79				
		DL2_2	6.42	6.11	6.72				
	Wach	SL_WA2	6.34	6.01	6.66	InLFrr Lichtfolge WW	1.762	.111	.066
		SL_B	6.62	6.38	6.86				
		DL1_1	6.53	6.26	6.80				
		DL1_2	6.53	6.27	6.78				
		SL_WA1	6.56	6.29	6.82				
		DL2_1	6.50	6.28	6.73				
		DL2_2	6.51	6.25	6.76				
		SL_WA2	6.51	6.23	6.79				

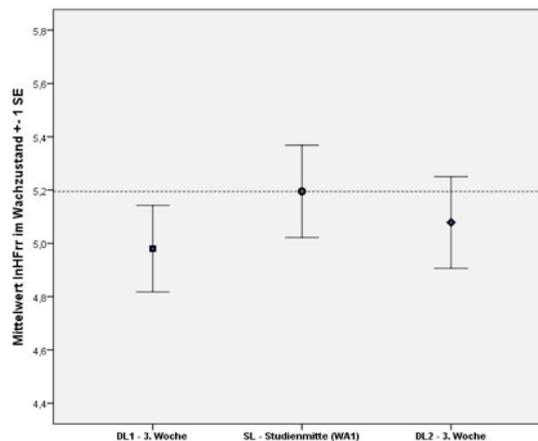


Abb. 13: Vagustonus (InHFrr) im Wachzustand und Lichtwirkung.

F=4.56, p=.016*, Eta2=.133; Post-Hoc-Test: SL vs. DL1_2 & DL2_2; DL1_2 vs. DL2_2 ist nicht sign.: p=.223;

Endokrinologische Ergebnisse

Die Speichelprobenerfolgten zu den zwei Messzeitpunkten zu Ende (dritten Woche) der dynamischen Lichtbedingungen (DL1_2 & DL2_2) erfolgten zu vier Uhrzeiten über den Tagesverlauf. Dabei wurde Kortisol, Melatonin und DHEA (Dehydroepiandrosteron) im Speichel bestimmt. Im Falle der Melatoninbestimmung war dies leider nur für letzten Messzeitpunkt möglich, da der Enzymimmunoassay (ELISA) erst zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stand. In Abb. 14 kann man im Tagesgang des Kortisols erkennen, dass dieser in der dritten Woche bei DL1 deskriptiv betrachtet stärker ausgeprägt zu sein scheint, wobei hier, u.a. auf Grund der großen und heterogenen Streuungen, keine statistische bedeutsamen Unterschiede festgestellt werden können.

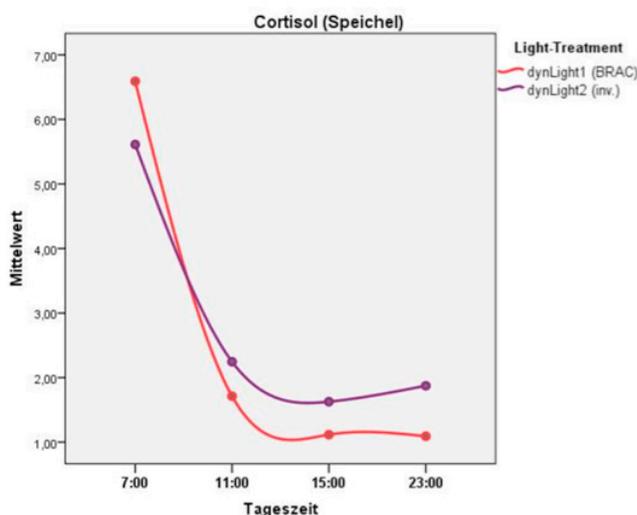


Abb. 14: Endokrinologische Speichelmessungen im Tagesgang.

Cortisol/DHEA - Tageszeit * Treatment (n=25)				
Maß:Cortisol		95%-Konfidenzintervall		
Tageszeit	Treatment	Mittelwert	Untergrenze	Obergrenze
7:00-8:00	DL1	6.59	4.51	8.67
	DL2	5.61	3.95	7.27
11:00-12:00	DL1	1.71	1.21	2.22
	DL2	2.25	1.64	2.85
16:00-17:00	DL1	1.12	0.87	1.36
	DL2	1.63	0.66	2.60
23:00-0:00	DL1	1.09	0.62	1.56
	DL2	1.87	0.42	3.32
Maß:DHEA				
	DL1	374.73	193.71	555.75
	DL2	322.75	174.97	470.53
keine sign. Unterschiede oder WW (p>.10)				

Auf Grund der Verfügbarkeit des ELISA's konnte die Analyse des Melatonins nur im Querschnitt - zu einem Messzeitpunkt - explorativ betrachtet werden (vgl. Tabelle g).

Tabelle g: Deskriptive Kennwerte für Melatoninbestimmung.

Melatonin - Lichtbedingung * Zeit (n=27)				
Maß:Melatonin		95%-Konfidenzintervall		
Lichtbedingung	Zeit	Mittelwert	Untergrenze	Obergrenze
DL1 - BRAC (n=11)	8:00	3.03	2.75	3.30
	24:00	2.37	1.94	2.80
DL2 - invers Circ. (n=16)	8:00	2.74	2.51	2.97
	24:00	2.32	1.96	2.67

ALM: Uhrzeit: p=.001; Licht: p=.352; Lichtbedingung x Zeit: p=.409

Weitere Messergebnisse zum Lichtempfinden am Arbeitsplatz

Sich verändernde Lichtsituationen tragen wesentlich zum Erleben der räumlichen Situation bei und vermitteln dadurch eine bestimmte Stimmung. Zur Einschätzung und subjektiven Beurteilung der Beleuchtungssituation wurden daher regelmäßig semantische Differentiale am Vormittag bis zu Arbeitsende vorgegeben. Die dazugehörigen Ergebnisse werden in Abb. 15 zusammenfassend vorgestellt.

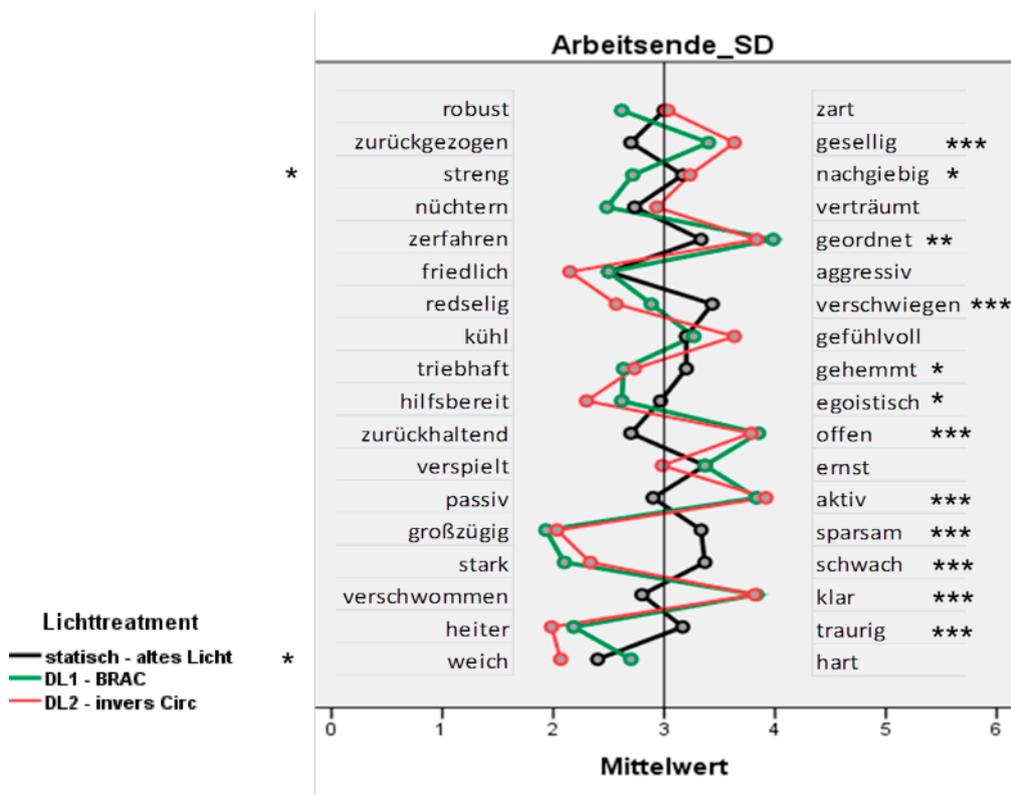


Abb. 15: Semantisches Differential.

Dabei zeigt sich, dass die Beleuchtungssituation bzw. das Raumempfinden am Vormittag und zu Arbeitsende ein vergleichbares Profil zeigt (nicht dargestellt). Die alte, statische Lichtsituation wirkt im Gegensatz zu den beiden dynamischen Lichtbedingungen deutlich unterschiedlich auf/für die StudienteilnehmerInnen (Abb. 15: dazugehörige Signifikanzen sind hier symbolisch auf der re. Seite eingetragen). Die Bedingung SL wird als vergleichsweise zurückgezogen, verschwiegen, verschwommen, traurig und schwach empfunden. Hingegen werden die dynamischen Lichtbedingungen (DL1 & DL2) nur marginal unterschiedlich wahrgenommen und bewertet (vgl. Sign.-Symbole auf der li. Seite) und allgemein sehr positiv eingeschätzt (z.B. heiter, klar, großzügig, aktiv, offen, geordnet und friedlich).

Diskussion

Zur Gesunderhaltung und -werdung sollte jede Ressource des Organismus genutzt und unterstützt werden. Dafür spielen u.a. optimale Lichtbedingungen am Arbeitsplatz eine wichtige Rolle: Sehleistung und Sehkomfort und damit die Beleuchtungssituation hat im Arbeitsleben einen zentralen Stellenwert. So gibt es zahlreiche Beobachtungen zu Produktionssteigerungen nach einer Erhöhung der Beleuchtungsstärke. Neben psychologischen, emotionalen und ästhetischen Wahrnehmungsaspekten von unterschiedlichen Beleuchtungssituationen zeigen neue wissenschaftliche Erkenntnisse, dass Licht einen weitaus stärkeren Einfluss auf Gesundheit und Wohlbefinden hat als dies bisher bekannt war. Die Berücksichtigung der nicht visuellen biologischen circadianen Wirkung des Lichtes und die Entdeckung eines neuen Photorezeptortyps im Auge wird in der architektonischen Lichtgestaltung der Zukunft eine erhebliche Bedeutung bekommen. Von Sonnenlicht ist bekannt, dass es die Produktion von Serotonin und Vitamin D begünstigt und dadurch tagsüber eine fördernde Wirkung auf Gesundheit und Wohlbefinden hat. Die Beleuchtung besitzt darüber hinaus eine wichtige Zeitgeberfunktion für biologische Organismen. Damit scheint die Lichtsituation u.a. für die Modulation von Entzündungsprozessen im Körper eine Rolle zu spielen, die z.B. an der Entstehung von Herz-Kreislaufkrankungen beteiligt sind. Mit den neuen technischen Möglichkeiten und bereits verfügbaren dynamischen Lichtsteuerungen ergeben sich breite Anwendungsmöglichkeiten in der betrieblichen Gesundheitsförderung und Prävention. Leuchtstoffröhren, Energiesparlampen und LEDs zeigen meist Emissionsspektren mit höherer Intensität im biologisch aktiven Bereich um 450nm.

Wir erwarteten uns mit dieser Feldstudie nachweisen zu können, dass dynamisch gesteuerte Lichtsituationen, die an den inneren Rhythmus des Menschen angepasst sind, positive Auswirkungen auf mehrere Ebenen des menschlichen Organismus haben. Sie können den circadianen Rhythmus verstärken, ein stabiles Entrainment des Schlaf-Wach-Rhythmus und zahlreicher psychophysiologischer Prozessen bewirken bzw. Körperfunktionen besser aufeinander abstimmen. Aufgrund chronomedizinischer Erkenntnisse ist anzunehmen, dass diese Effekte erst nach länger andauernder Lichtexposition eintreten. Folgend werden die aufgestellten Fragestellungen bzw. Hypothesenprüfungen kurz näher beschrieben und diskutiert:

Hypothese I. Die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen am Arbeitsplatz zeigen messbare Auswirkungen auf die cardiovegetative Regulation, endokrinologische Tagessgänge, Wohlbefinden und weitere psychometrische Variablen.

Im Rahmen des Studienverlaufs von Oktober bis März zeigen sich zeitliche, saisonale Trends in den psychologischen und physiologischen Daten, welche eine valide Interpretation der Studienergebnisse - trotz gewähltem Cross-Over-Design - erschweren. So zeigt sich in Herzrate und HRV-Kennwerten eine annähernd lineare zeitliche Veränderung im Studienverlauf, welche auf eine circaannuale bzw. jahreszeitliche Rhythmik rückschließen lässt: Die Herzrate steigt über den Winter zum Frühjahr hin leicht an bzw. die HRV-Kennwerte sinken allgemein, wodurch es zu einer Verschiebung in Richtung Sympathikonie kommt. Auch der Weihnachtsurlaub scheint hier einen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung auszuüben. Im Gegensatz dazu kann in den psychologischen Daten ein unerwarteter, signifikanter zeitlicher Trend in Richtung einer allgemeinen Verbesserung festgestellt werden. Diese erinnert an den aus der Fachliteratur bekannten „Hawthorne-Effekt“, welcher sich jedoch nicht in den „objektiven“ physiologischen Ergebnissen wiederfinden lässt. Als eine Alternativerklärung für die beobachtete Verbesserung der Aspekte subjektiven Wohlbefindens kann auch eine unspezifische Lichtwirkung durch die qualitativ hochwertigeren dynamischen Arbeitsplatzbeleuchtungen angeführt werden, welche nur durch relativ kurze WashOut Phasen (mit der alten, statischen Beleuchtung) unterbrochen waren. Darüber hinaus könnten die beobachteten psychologischen Verbesserungen auf die erfolgten Ergebnisrückmeldungen rückführbar sein. Diese erschienen v.a. notwendig, um die Compliance der StudienteilnehmerInnen aufrecht zu erhalten. Bei einigen TeilnehmerInnen kam es dadurch zu einem Überdenken des eigenen Lebensstils bzw. hat dies zu einem verstärkten Körper- und Gesundheitsbewusstsein geführt. Als Folge von daraus resultierenden Verhaltensänderungen (z.B. Ernährungsumstellung, verstärkte Bewegungsaktivitäten etc.) könnte dies unspezifisch (& unkontrolliert) in den Daten sichtbar geworden sein. Dagegen spricht jedoch, dass dies so aus in den physiologischen Daten so nicht abzuleiten ist. Weiter erschwerend für die Interpretation ist die Beobachtung einzelner Großraumbüros und Teams, welche sich durch signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Studienorten manifestieren (nicht dargestellt). Darüber hinaus waren die räumliche Situation (z.B. Tageslichteinflüsse) und die statische Beleuchtungssituation zwischen den Durchführungsorten sehr heterogen.

Zusammenfassend zeigen sich, trotz der genannten Probleme und Einschränkungen, signifikante Auswirkungen auf psychometrischen Variablen und Kennwerten der cardiovegetativen Regulation, welche auf die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen am Arbeitsplatz Rückschlüsse zulässt: Die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen werden bewusst wahrgenommen und unterschiedlich bewertet (vgl. z.B. Tabelle 4, Abb. 15), wobei auch der Körper unterschiedlich auf die Be-

leuchtungssituation reagiert (vgl. z.B. Tabelle 6 f.). Somit kann diese erste Hypothese unter Berücksichtigung der Fachliteratur und den hier vorgestellten Ergebnissen, mit Einschränkungen und unter der Berücksichtigung zeitlicher Änderungen innerhalb einer Lichtbedingung, als bestätigt angesehen werden.

Hypothese II. Eine optimierte Beleuchtungssituation (DL1 & DL2) am Arbeitsplatz bringt messbare Vorteile gegenüber einer herkömmlichen statischen Bürobeleuchtung auf mehreren Messebenen.

Es zeigt sich, dass die dynamischen Lichtsituationen subjektiv häufiger bevorzugt werden, wobei v.a. die inverse dynamische Lichtbedingung (DL2) sehr positiv von den TeilnehmerInnen beurteilt wird (vgl. z.B. Tabelle 4 & Abb. 15). Somit kann bestätigt werden, dass die gewählten höheren Beleuchtungsstärken in den dynamischen Beleuchtungssituationen - gegenüber einer herkömmlichen statischen Bürobeleuchtung - bevorzugt werden (ca. 800 vs. 500lx; vgl. Tabelle 2). Im allgemeinen Wohlbefinden fällt eine Differenzierung unterschiedlicher Lichtwirkungen nicht eindeutig aus (vgl. auch Hyp. I f.), wobei dies bei gesunden Menschen auf Grund von z.B. Ceiling-Effekten nicht unbedingt zu erwarten ist. Auf cardiovegetativer Ebene zeigen sich unterschiedliche Lichtauswirkungen im Wachen und Schlafen, welche sich durch eine stärkere Aktivierung im Wachzustand, eine erholungsbezogenere Einstellung im vegetativen Quotienten im Schlaf und damit ausgeprägten circadianen Tagesgängen in der vegetativen Balance beobachten lassen (Abb. 11 & Abb. 12).

Hypothese III. Neben der Lichtqualität spielt die zeitliche dynamische Abfolge eine einflussreiche Rolle: Unterschiedliche dynamische Lichtbedingungen lassen sich in ihren Wirkungen auf den Organismus unterscheiden.

Hypothese IV. Die positiven Auswirkungen der chronobiologisch optimierten Beleuchtungssituation (DL1) am Arbeitsplatz sind nicht kurzfristig (zu Beginn der Versuchsbedingung) sondern mittelfristig (zu Ende der Versuchsbedingung) messbar. Im Gegensatz zur „inversen“ Lichtbedingung (DL2) bringt v.a. die „endogene“ dynamische Beleuchtungssituation (DL1) mittelfristig messbare Vorteile.

Die Analyse der Daten und aufbereiteten Erkenntnisse aus der Fachliteratur legen nahe, dass eine zeitliche dynamische Lichtabfolge über den Tag Vorteile für ArbeitnehmerInnen bringen kann. So zeigt die dynamische Versuchsbedingung (DL2) eine merkliche kurzfristige bzw. unmittelbare Verbesserung auf mehreren Ebenen, wohingegen die Versuchsbedingungen DL1 sich erst nach dreiwöchiger Exposition zu behaupten scheint (Abb. 11, Abb. 12 & Tabelle 8). Für valide Schlussfolgerungen scheint der Zeitraum von drei Wochen jedoch zu kurz gewählt und die Stichprobe etwas zu klein, was Replikationen in weiteren Studien wünschenswert macht [66, 99, 100]. Eine weitere Einschränkung zur Beurteilung der gewählten dynamischen Lichtsteuerungen ist, dass die künstlichen Beleuchtungssituationen von ihren Lichteigenschaften (z.B. lux, K, acv etc.) her nicht unmittelbar vergleichbar gewesen sind (vgl. Tabelle 2).

Zusammenfassend können die Hypothesen 3 & 4 damit mit Vorsicht bestätigt werden, da sich Unterschiede zwischen DL1 & DL2 nach mehrwöchiger Beobachtung in den Daten abzeichnen.

Methodenkritisch ist - neben den bereits in der Diskussion genannten Limitationen - anzumerken, dass bei dem vorliegenden Studiensetting spezifische Gruppen in Großraumbüros bzw. einzelnen Teams beobachtet wurden, deren Mitglieder miteinander interagieren (und ähnliche arbeitsbezogene Aktivitäten verfolgen), sodass im Idealfall auch diese zusätzliche Interaktion berücksichtigt werden müsste. Aufgefundene Gruppenunterschiede zwischen den beobachteten Teams werden in diesem Bericht nicht explizit angeführt, da sie nicht unmittelbar die primären Fragestellungen zu unterschiedlichen Auswirkungen von (dynamischen) Beleuchtungsszenarios betreffen.

Der vorliegende Bericht hat die Intention die Bedeutung von Licht am Arbeitsplatz aufzuzeigen und zu dokumentieren, mit dem Ziel weitere Evidenz zu schaffen, dass eine Arbeitsplatzbeleuchtung, die sich an „inneren Bedürfnissen“ des Menschen orientiert, Vorteile für die Gesundheit und auch Leistungsbereitschaft von ArbeitnehmerInnen bringt.

Literatur

1. Brainard, G.C., et al., Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci*, 2001. 21(16): p. 6405-12.
2. Berson, D.M., F.A. Dunn, and M. Takao, Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 2002. 295(5557): p. 1070-3.
3. Hattar, S., et al., Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science*, 2002. 295(5557): p. 1065-70.
4. Ecker, J.L., et al., Melanopsin-expressing retinal ganglion-cell photoreceptors: cellular diversity and role in pattern vision. *Neuron*, 2010. 67(1): p. 49-60.
5. licht.de, Wirkung des Lichts auf den Menschen, in licht.wissen, www.licht.de, Editor 2014, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.: Frankfurt am Main. p. 56.
6. DIN, Biologisch wirksame Beleuchtung – Planungsempfehlungen, in DIN SPEC 67600:2013-042013, Normenausschuss Lichttechnik (FNL) im DIN: Berlin. p. 68.
7. DIN, DIN V 5031-100, in Vornorm: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren 2009, Normenausschuss Lichttechnik (FNL) im DIN. p. 16.
8. Forbes, D., et al., Light therapy for managing sleep, behaviour, and mood disturbances in dementia. *Cochrane Database Syst Rev*, 2004(2): p. CD003946.
9. Tuunainen, A., D.F. Kripke, and T. Endo, Light therapy for non-seasonal depression. *Cochrane Database Syst Rev*, 2004(2): p. CD004050.
10. Niederhofer, H. and K. von Klitzing, Bright light treatment as mono-therapy of non-seasonal depression for 28 adolescents. *Int J Psychiatry Clin Pract*, 2012. 16(3): p. 233-7.
11. Figueiro, M.G., et al., Tailored lighting intervention improves measures of sleep, depression, and agitation in persons with Alzheimer's disease and related dementia living in long-term care facilities. *Clin Interv Aging*, 2014. 9: p. 1527-37.

12. Young, C.R., et al., At-sea trial of 24-h-based submarine watch-standing schedules with high and low correlated color temperature light sources. *J Biol Rhythms*, 2015. 30(2): p. 144-54.
13. Walmsley, L.e.a., Colour As a Signal for Entraining the Mammalian Circadian Clock. *PLOS Biology*, 2015: p. 1-20.
14. Santhi, N., et al., The spectral composition of evening light and individual differences in the suppression of melatonin and delay of sleep in humans. *J Pineal Res*, 2012. 53(1): p. 47-59.
15. Rea, M.S. and M.G. Figueiro, Quantifying light-dependent circadian disruption in humans and animal models. *Chronobiol Int*, 2014. 31(10): p. 1239-46.
16. Najjar, R.P.e.a., Chronic Artificial Blue-Enriched White Light Is an Effective Countermeasure to Delayed Circadian Phase and Neurobehavioral Decrements. *PLoS one*, 2014. 9(7): p. 1-10.
17. Rivkees, S.A., Developing circadian rhythmicity in infants. *Pediatrics*, 2003. 112(2): p. 373-81.
18. Folkard, S., R.A. Wever, and C.M. Wildgruber, Multi-oscillatory control of circadian rhythms in human performance. *Nature*, 1983. 305(5931): p. 223-6.
19. Smolders, K.C., Y.A. de Kort, and P.J. Cluitmans, A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Physiol Behav*, 2012. 107(1): p. 7-16.
20. Sahin, L. and M.G. Figueiro, Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon. *Physiol Behav*, 2013. 116-117: p. 1-7.
21. Vandewalle, G., et al., Daytime light exposure dynamically enhances brain responses. *Current biology : CB*, 2006. 16(16): p. 1616-21.
22. Smolders, K.C., Y. de Kort, and P.J.M. Cluitmans, Higher light intensity induces modulations in brain activity even during regular daytime working hours. *Lighting Res. Technol.*, 2015(0): p. 1-16.
23. Perrin, F., et al., Nonvisual responses to light exposure in the human brain during the circadian night. *Current biology : CB*, 2004. 14(20): p. 1842-6.

24. Kaida, K., et al., Indoor exposure to natural bright light prevents afternoon sleepiness. *Sleep*, 2006. 29(4): p. 462-9.
25. Figueiro, M.G. and M.S. Rea, Short-wavelength light enhances cortisol awakening response in sleep-restricted adolescents. *Int J Endocrinol*, 2012. 2012: p. 301935.
26. Cajochen, C., Alerting effects of light. *Sleep medicine reviews*, 2007. 11(6): p. 453-64.
27. Vandewalle, G., P. Maquet, and D.J. Dijk, Light as a modulator of cognitive brain function. *Trends Cogn Sci*, 2009. 13(10): p. 429-38.
28. Thompson, A., et al., The effects of evening bright light exposure on subsequent morning exercise performance. *Int J Sports Med*, 2015. 36(2): p. 101-6.
29. Huiberts, L.M., K.C. Smolders, and Y.A. de Kort, Shining light on memory: Effects of bright light on working memory performance. *Behav Brain Res*, 2015. 294: p. 234-45.
30. Figueiro, M.G., S. Nonaka, and M.S. Rea, Daylight exposure has a positive carryover effect on nighttime performance and subjective sleepiness. *Lighting Research and Technology*, 2013. 46: p. 506-519.
31. Chang, A.-M., et al., Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *PNAS*, 2015. 112(4): p. 1232-1237.
32. Phipps-Nelson, J., et al., Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. *Sleep*, 2003. 26(6): p. 695-700.
33. Munch, M., et al., Effects of prior light exposure on early evening performance, subjective sleepiness, and hormonal secretion. *Behavioral neuroscience*, 2012. 126(1): p. 196-203.
34. Rojas, J.C., A.K. Bruchey, and F. Gonzalez-Lima, Low-Level Light Therapy Improves Cortical Metabolic Capacity and Memory Retention. *Journal of Alzheimer's disease : JAD*, 2012.
35. Vandewalle, G., et al., Brain responses to violet, blue, and green monochromatic light exposures in humans: prominent role of blue light and the brainstem. *PLoS one*, 2007. 2(11): p. e1247.

36. Vandewalle, G., et al., Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure. *Cerebral cortex*, 2007. 17(12): p. 2788-95.
37. Vetter, C., et al., Blue-enriched office light competes with natural light as a zeitgeber. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 2011. 37(5): p. 437-45.
38. Vandewalle, G., et al., Spectral quality of light modulates emotional brain responses in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010. 107(45): p. 19549-54.
39. Iskra-Golec, I. and L. Smith, Daytime intermittent bright light effects on processing of laterally exposed stimuli, mood, and light perception. *Chronobiology international*, 2008. 25(2): p. 471-9.
40. Ilango, A. and M.K. Lobo, Shining light on motivation, emotion, and memory processes. *Front Behav Neurosci*, 2015. 9: p. 1.
41. Hubalek, S., M. Brink, and C. Schierz, Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood. *Lighting Res. Technol.*, 2010. 42: p. 33-50.
42. Figueiro, M.G. and M.S. Rea, Office lighting and personal light exposures in two seasons: Impact on sleep and mood. *Lighting Res. Technol.*, 2014. 0: p. 1-13.
43. Van Bommel, W., Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. *Appl Ergon*, 2006. 37(4): p. 461-466.
44. Stephenson, K.M., et al., Complex interaction of circadian and non-circadian effects of light on mood: Shedding new light on an old story. *Sleep medicine reviews*, 2012.
45. van Norren, D. and J. van de Kraats, Spectral transmission of intraocular lenses expressed as a virtual age. *The British journal of ophthalmology*, 2007. 91(10): p. 1374-5.
46. van de Kraats, J. and D. van Norren, Optical density of the aging human ocular media in the visible and the UV. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2007. 24(7): p. 1842-57.

47. Daneault, V., et al., Does Pupil Constriction under Blue and Green Monochromatic Light Exposure Change with Age? *J Biol Rhythms*, 2012. 27(3): p. 257-64.
48. Smolders, K., Y. De Kort, and S.M. Van den Berg, Daytime light exposure and feelings of vitality: Results of a field study during regular weekdays. *Journal of Environmental Psychology*, 2013(36): p. 270-279.
49. Chellappa, S.L., et al., Light modulation of human sleep depends on a polymorphism in the clock gene *Period3*. *Behav Brain Res*, 2014. 271: p. 23-9.
50. Staples, V.S., et al., Daily light exposure profiles in older non-resident extreme morning and evening types. *J Sleep Res*, 2009. 18(4): p. 466-71.
51. Crowley, S.J., T.A. Molina, and H.J. Burgess, A week in the life of full-time office workers: work day and weekend light exposure in summer and winter. *Appl Ergon*, 2015. 46 Pt A: p. 193-200.
52. Welbourne, L.E., A.B. Morland, and A.R. Wade, Human colour perception changes between seasons. *Curr Biol*, 2015. 25(15): p. 646-647.
53. Thorne, H.C., et al., Daily and seasonal variation in the spectral composition of light exposure in humans. *Chronobiol Int*, 2009. 26(5): p. 854-66.
54. Ruger, M., et al., Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: comparison of daytime and nighttime exposure. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 2006. 290(5): p. R1413-20.
55. Vandewalle, G., et al., Effects of light on cognitive brain responses depend on circadian phase and sleep homeostasis. *J Biol Rhythms*, 2011. 26(3): p. 249-59.
56. Aldworth, R.C. and D.J. Bridgers, Design for variety in lighting. *Lighting Research and Technology*, 1971. 3(1): p. 8-23.
57. van Bommel, W., Dynamic Lighting at work - Both in level and colour, in 2nd CIE Expert Symposium on "Lighting and Health" 2006.

58. Schumann, S. and K. Vamberszky, Vigilanzsteigerung und Förderung des emotionalen Wohlbefindens durch dynamische Lichtführung im Büro, in licht.wissen 19 - Wirkung des Lichts auf den Menschen, www.licht.de, Editor 2007, Zumtobel Lighting GmbH: Dornbirn.
59. Górnicka, G., Lighting at Work, Environmental Study of Direct Effects of Lighting Level and Spectrum on Psychophysiological Variables. Bouwstenen series of the Department of Architecture, Building and Planning of the Eindhoven University of Technology, ed. E.U.o. Technology. Vol. 126. 2008, Eindhoven, The Netherlands: Eindhoven University Press. 159.
60. Barkmann, C., N. Wesselowski, and M. Schulte-Markwort, Wirksamkeit von dynamischem Licht in Hamburger Schulklassen, A.E.u.E.K.u.P.f.K.-u. Jugendpsychosomatik, Editor 2009, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf: Hamburg-Eppendorf. p. 9.
61. de Kort, Y. and K. Smolders, Effects of dynamic lighting on office workers: First results of a field study with monthly alternating settings. *Lighting Research and Technology*, 2010. 42: p. 345-360.
62. Spreeuwenberg, M.D., et al., Dynamic lighting as a tool to influence the day-night rhythm of clients with psychogeriatric disorders: a pilot study in a Dutch nursing home. *Journal of the American Geriatrics Society*, 2010. 58(5): p. 981-2.
63. Lowden, A. and T. Åkerstedt, Assessment of a New Dynamic Light Regimen in a Nuclear Power Control Room Without Windows on Quickly Rotating Shiftworkers—Effects on Health, Wakefulness, and Circadian Alignment: A Pilot Study. *Chronobiology International*, 2012. 29(5): p. 641-649.
64. Van Bommel, W., Light, Health and Alertness. *Health and Safety International*, 2012(43).
65. Mott, M., et al., Illuminating the Effects of Dynamic Lighting on Student Learning. *SAGE Open*, 2012: p. 1-9.
66. Möller, K., V. Grote, and B. Tralau. LED Office Lighting for improved Well-Being and Performance. in LPS, LED professional Symposium. 2014. Bregenz.

67. Möller, K., et al., Vergleich von LED und Leuchtstofflampen in ihrer Wirkung auf Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen in der Büro-Umgebung – eine Laborstudie, in *Licht 2014*, N.S.V.V. (NSVV), Editor 2014, Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde (NSVV): NL, Den Haag. p. 397-405.
68. Begemann, S.H.A., G.J. van den Beld, and A.D. Tenner, Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1997. 20(3): p. 231-239.
69. Hildebrandt, G., M. Moser, and M. Lehofer, *Chronobiologie und Chronomedizin*, 1998, Hippokrates: Stuttgart.
70. Grote, V., C. Kelz, and M. Moser, Endogene Rhythmen für eine dynamische Lichtsteuerung am Arbeitsplatz, in *Interner Bericht 2011*, Medizinische Universität Graz, Institut für Physiologie & Human Research GmbH, Institut für Gesundheitstechnologie und Präventionsforschung: Graz. p. 4.
71. Rivkees, S.A., Developing circadian rhythmicity. Basic and clinical aspects. *Pediatric clinics of North America*, 1997. 44(2): p. 467-87.
72. Aschoff, J., et al., Human circadian rhythms in continuous darkness: entrainment by social cues. *Science*, 1971. 171(3967): p. 213-5.
73. Czeisler, C.A., et al., Entrainment of human circadian rhythms by light-dark cycles: a reassessment. *Photochem Photobiol*, 1981. 34(2): p. 239-47.
74. Lobban, M.C., The entrainment of circadian rhythms in man. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol*, 1960. 25: p. 325-32.
75. Beersma, D.G., S. Daan, and R.A. Hut, Accuracy of circadian entrainment under fluctuating light conditions: contributions of phase and period responses. *J Biol Rhythms*, 1999. 14(4): p. 320-9.
76. Brondsted, A.E., J.H. Lundeman, and L. Kessel, Short wavelength light filtering by the natural human lens and IOLs -- implications for entrainment of circadian rhythm. *Acta Ophthalmol*, 2013. 91(1): p. 52-7.

77. Duffy, J.F. and K.P. Wright, Jr., Entrainment of the human circadian system by light. *J Biol Rhythms*, 2005. 20(4): p. 326-38.
78. Honma, K., S. Honma, and T. Wada, Entrainment of human circadian rhythms by artificial bright light cycles. *Experientia*, 1987. 43(5): p. 572-4.
79. Turek, F.W., Role of light in circadian entrainment and treating sleep disorders--and more. *Sleep*, 2005. 28(5): p. 548-9.
80. Wright, K.P., Jr., et al., Entrainment of the human circadian clock to the natural light-dark cycle. *Curr Biol*, 2013. 23(16): p. 1554-8.
81. Zulley, J., [Diurnal sleep]. *Wien Med Wochenschr*, 1995. 145(17-18): p. 397-401.
82. Zulley, J., et al., [Falling asleep at the wheel: the chief cause of severe traffic accidents]. *Wien Med Wochenschr*, 1995. 145(17-18): p. 473.
83. Prokop, O. and L. Prokop, [Fatigue and falling asleep at the steering wheel]. *Dtsch Z Gesamte Gerichtl Med*, 1955. 44(3): p. 343-55.
84. Voigt, E.D., P. Engel, and H. Klein, [On the daily operation of physical work capacity]. *Int Z Angew Physiol*, 1968. 25(1): p. 1-12.
85. Bochnik, H.J., [Diurnal fluctuations of muscular efficiency; an ergographic study]. *Dtsch Z Nervenheilkd*, 1958. 178(3): p. 270-5.
86. Aschoff, J., et al., Precision of entrained circadian activity rhythms under natural photoperiodic conditions. *Naturwissenschaften*, 1972. 59(6): p. 276-7.
87. Hildebrandt, G., W. Rohmert, and J. Rutenfranz, 12 and 24 h Rhythms in error frequency of locomotive drivers and the influence of tiredness. *Int J Chronobiol*, 1974. 2(2): p. 175-80.
88. Kleitman, N., Basic rest-activity cycle - 22 years later. *Sleep*, 1982. 5(4): p. 311-7.
89. Bes, F., M. Jobert, and H. Schulz, Modeling napping, post-lunch dip, and other variations in human sleep propensity. *Sleep*, 2009. 32(3): p. 392-8.

90. Kelz, C., et al., The effects of chronobiologically driven dynamic lighting on office workers' wellbeing, sleep quality and physiology, in IAPS 2012: Human Experience in the Natural and Built Environment: Implications for Research, Policy, and Practice 2012: Glasgow, Scotland.
91. Corbett, R.W., B. Middleton, and J. Arendt, An hour of bright white light in the early morning improves performance and advances sleep and circadian phase during the Antarctic winter. *Neuroscience letters*, 2012.
92. Sharkey, K.M., et al., Effects of an advanced sleep schedule and morning short wavelength light exposure on circadian phase in young adults with late sleep schedules. *Sleep Med*, 2011. 12(7): p. 685-92.
93. Moser, M., M. Frühwirth, and T. Kenner, The Symphony of Life - Importance, Interaction and Visualization of Biological Rhythms. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 2008. 27(Jan-Feb): p. 29-37.
94. Moser, M., et al. Why life oscillates--biological rhythms and health. in *Conf Proc IEEE Med Biol Soc*. 2006.
95. Moser, M., et al., Cancer and rhythm. *Cancer Causes Control*, 2006. 17(4): p. 483-7.
96. Boyce, P., Education: the key to the future of lighting practice. *Lighting Research Technology*, 2006. 38(4): p. 283-294.
97. DIN/EN, DIN EN 12464-1, in *Lighting of work places - Indoor work places* 2003.
98. Schulz, B. and A. Liesinger, Bestandsaufnahme Licht 2012, ÖNB - Lichtprojekt Weiz, R.L. Institut für Raumgestaltung, Editor 2012, Technische-Universität Graz: Graz.
99. Möller, K., et al. Vergleich von LED und Leuchtstofflampen in ihrer Wirkung auf Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen in der Büroumgebung – eine Laborstudie. in *Licht* 2014. 2014. Den Haag, Holland.
100. Möller, K., et al., LED Office Lighting to Promote Performance and Well-Being, in *HCI 2011: Ergonomics and Health Aspects* M.M. Robertson, Editor 2011, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: LNCS 6779. p. 68-77.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Spektrale Zusammensetzung – Beispiele v. Messergebnisse für die statische Beleuchtung b. Siemens, Weiz.	9
Abb. 2: Messbeispiele für umgesetzte dynamische Lichtsituation am Arbeitsplatz (7am bis 5pm).	10
Abb. 3: Durchführungsorte & Beleuchtungssituationen: „Alte“ und „dynamische steuerbare“ Leuchtstofflampen.	11
Abb. 4: Studiendesign und zeitlicher Ablauf.	12
Abb. 5: ChronoCord– Hochauflösender EKG-Rekorder.	15
Abb. 6: Stichprobenbaum – Flussdiagramm.	17
Abb. 7: Subjektive Auswahl einer Lichtbedingung.	18
Abb. 8: Subjektive Beschwerden im Studienverlauf (B-L).	20
Abb. 9: Subjektives Befinden im Studienverlauf (MDBF).	21
Abb. 10: Lichtbedingungen und Erholungs-Beanspruchungsbilanz (EBF).	22
Abb. 11: Vegetative Balance (VQrr; LF/HF ratio) zu den Lichtbedingungen im Wachen bzw. anschließendem Schlaf.	26
Abb. 12: Cardiovegetativer Tagesgang in % (VQidx*).	27
Abb. 13: Vagustonus (lnHFrr) im Wachzustand und Lichtwirkung.	28
Abb. 14: Endokrinologische Speichelmessungen im Tagesgang.	29
Abb. 15: Semantisches Differential.	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potentielle Kenngrößen mit prominenten chronobiologischen Tagesgängen.	6
Tabelle 2: Prüfmittel: Überblick Bürobeleuchtung ohne Tageslichteinfluss (vgl. Abb. 1 & Abb. 2).	8
Tabelle 3: Stichprobenmerkmale bei Eingangsuntersuchung bzw. Baselinemessung (Analysestichprobe; N=31*).	16
Tabelle 4: Subjektive Lichtbewertung – statistische Kennwerte.	19
Tabelle 5: Subskalen des EBF – statistische Kennwerte.	23
Tabelle 6: Signifikanzniveaus cardiovegetativer HRV-Kennwerte in Abh. von den Lichtbedingung/-folge (n=26).	25
Tabelle 7: Vegetative Balance (VQrr) im Wachen und Schlaf – statistische Kennwerte.	26
Tabelle 8: Statische Kennwerte der LF und HF-Komponente in Abh. von den Lichtbedingung/-folge (n=26).	28
Tabelle 9: Deskriptive Kennwerte für Melatoninbestimmung.	29