

Ergonomie: Mensch - Produkt - Arbeit - Systeme

Band 12

Sylvia Hubalek

LuxBlick

Messung der täglichen Lichtexposition zur Beurteilung
der nicht-visuellen Lichtwirkungen über das Auge

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Zürich, ETH, Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7097-1

ISSN 1610-1898

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Geleitwort

In der heutigen Gesellschaft gehören Tätigkeiten zu Zeiten, die gegen die natürliche endogene biologische Rhythmik verschoben sind, fast zur Normalität. Künstliche Beleuchtung begleitet die Menschheit während Arbeit und Freizeit durch den Tag. Die Entdeckung einer neuen Klasse lichtempfindlicher, retinaler Ganglienzellen und deren Bedeutung für die biologische Rhythmik und das Wohlbefinden haben die klassische Betrachtung von Licht und Beleuchtung in eine neue Dimension geführt. Traditionell stehen in der Praxis der Gestaltung von Beleuchtungssystemen lichttechnische Gütemerkmale im Vordergrund. Es sind Faktoren wie die Gleichmäßigkeit einer Beleuchtungsstärkeverteilung im Bereich der Sehaufgabe, die Begrenzung von Spiegelung und Blendung sowie die Farbwiedergabeeigenschaften. In den letzten Jahren erscheint nunmehr eine zunehmende Zahl von Untersuchungen zu unspezifischen biologischen Wirkungen von Licht. Erwähnt sei die Synchronisierung der endogenen Rhythmik durch ein geeignetes Regime von Lichtreizen einerseits und die physische, wie auch die psychische Aktivierung durch Licht andererseits. Saisonale abhängige Depression (SAD) wird erfolgreich mit einer Lichttherapie behandelt.

Es ist daher erstaunlich, dass über die retinale Beleuchtungsstärke von Personen am Arbeitsplatz und deren Verlauf über einen Arbeitstag sowie die statistische Häufigkeit des Auftretens bestimmter Beleuchtungspegel praktisch keine Daten in der Literatur vorliegen. Für den Büroarbeitsplatz sind die von der Autorin exemplarisch erhobenen Daten erste Bemühungen, die Erfassung wie auch die Darstellung und die Auswertung der Lichtexposition in der realen Umgebung darzulegen. Die vorliegende Arbeit schließt eine Lücke zwischen den naturwissenschaftlich medizinischen Erkenntnissen auf der einen Seite und den Bedürfnissen der Beleuchtungspraxis auf der anderen Seite im Sinne einer Transfer-Forschung. Selbstverständlich ist ein solches Unternehmen umfangreich und in einer einzigen Arbeit nicht abschließend zu behandeln. Die vorliegende Arbeit bietet aber mit Sicherheit eine gute Grundlage für weitere Forschungsvorhaben.

Die Arbeit gibt in einem ersten Abschnitt einen Überblick über die wichtigsten Grundlagen biologischer Lichtwirkungen, die über die Netzhaut vermittelt werden. Er beschreibt den aktuellen Stand der Erkenntnisse. Dieser betrifft die biologischen Lichtwirkungen, so wie sie sich momentan darstellen. Besondere Bedeutung hat im

Hinblick auf praktische Anwendungen der Umstand, dass blaues Licht nicht allein positive, sondern auch negative gesundheitliche Wirkungen bei ähnlichem Verlauf spektraler Empfindlichkeit entfalten kann. "Blaues" Licht kurzer Wellenlänge ausreichender Intensität kann die Netzhaut einerseits schädigen und andererseits positiv die endogene Rhythmik beeinflussen. So kommt der Wahl eines richtigen Maßes für die Dosis eine wichtige Bedeutung zu. Speziell wird die Wirkung des Lichtes auf die Qualität des Schlafes, auf die Vigilanz (Aktiviertheit) und auf das Wohlbefinden behandelt.

Ein zweiter Teil liefert Information zur Entwicklung eines mobilen Gerätes für die Registrierung des auf das Auge treffenden Lichtes. Zugrunde liegen der Messanordnung einerseits die spektrale Empfindlichkeitskurve für die Hellempfindlichkeit des Sehens $V(\lambda)$ und zum andern eine vorläufig definierte spektrale Empfindlichkeitskurve für die Melatonin-Suppression $c(\lambda)$ durch Licht.

Der dritte Teil der vorliegenden Studie liefert orientierende Ergebnisse der täglichen Lichtexposition von Büroangestellten über einen Arbeitstag. Gemessen und bewertet wurde die Lichtexposition zu Hause und am Arbeitsplatz.

Die von der Autorin erarbeitete Methode ist für die aktuelle Entwicklung der Licht und Beleuchtungstechnik und ihrer Umsetzung in den Arbeitswissenschaften von großer Bedeutung. Die vorliegenden orientierenden Versuche zeigen vor allem, dass die entwickelte Methode zur Erfassung der Lichtexposition auf der visuellen und der physiologischen Ebene in der arbeitswissenschaftlichen Praxis mit Erfolg eingesetzt werden kann.

Zürich, Dezember 2007



(Prof. Christoph Schierz, TU Ilmenau)



(Prof. em. Helmut Krueger, ETH Zürich)

Danksagung

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Wehner, der mir den Abschluss dieser Arbeit ermöglichte, bei Herrn Prof. Dr. Dr. Krueger, der immer an mich glaubte und bei Herrn Prof. Dr. Gall, der mir fachlich den Weg bereitete. Im Besonderen möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Schierz bedanken, dessen umsichtiger Denkweise und steter Unterstützung es zu verdanken ist, dass ich an einem aktuellen und spannenden Thema arbeiten konnte.

Ein herzliches Dankeschön an alle, die bei der Entwicklung des Gerätes *LuxBlick* und der dazugehörigen Programme mitgewirkt haben. Ein detaillierter Nachweis des Umfangs und der Art der Fremdleistungen ist auf der folgenden Seite wiedergegeben. Besonders möchte ich an dieser Stelle Hanspeter Honegger, Dr. Dietmar Zöschg und Dr. habil. Alexander Rosemann für ihre Beiträge danken.

Ein weiteres Dankeschön an

- alle Personen, die an dem Feldversuch teilnahmen
- Prof. Peter Ahnelt für seine Korrektur des Kapitels Übertragungspfade
- Dr. Barbara Fries für die zeitnahe und motivierende Durchsicht der Arbeit
- Rahel Liesch und Stefan Oberhänsli von der Statistikberatung, die mich mit dem linearen gemischten Modell vertraut machten
- die SUVA (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt), den VSR (Verband Schweizerischer Anbieter von Sonnen- und Wetterschutz-Systemen) und die Fa. Osram, München für ihre finanzielle Unterstützung
- MeteoSchweiz für die Bereitstellung von Daten
- alle derzeitigen und ehemaligen Mitglieder des IHA (Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie) und des ZOA (Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften) für die angenehme Zusammenarbeit

Der größte Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich - auf ihre Art und Weise - immer unterstützen.

Nachweis Fremdleistungen

Sowohl das Gerät *LuxBlick* als auch die zugehörige Software entstanden unter meiner Leitung. Aufgrund meiner fachfremden Ausbildung (s. Lebenslauf) wären diese Entwicklungen jedoch ohne die aufgeführten Beiträge weder in dieser Zeit noch in diesem Umfang möglich gewesen.

Hanspeter Honegger baute auf Grundlage der Pläne von Dr. Christoph Schierz den ersten Prototyp des Gerätes *LuxBlick*. Parallel dazu entwickelte Simon-Luis Keel (2004) die Software *illumina*, um die Sensor-Elektronik über den Mini-Computer anzusprechen.

Sowohl die Sensor-Elektronik als auch die Software wurden von Dr. Dietmar Zöschg weiterentwickelt. Am Bau und dem Test der zehn Prototypen war schließlich neben Hanspeter Honegger und Dr. Dietmar Zöschg auch Dr. Klaus Kudielka beteiligt.

Tobias Daub, Dominik Meier, Tim Ritson und Christian Schörg führten im Rahmen ihres Lichttechnik-Projektes an der FH Konstanz erste Kalibrierungen und Pilotmessungen mit *LuxBlick* durch. Rainer Nolte gab mir wertvolle Tipps für die Vergleichsmessungen mit dem *circadianen Gesichtsfeldsensor* an der TU Ilmenau.

Dr. habil. Alexander Rosemann programmierte in Matlab bereits während des Feldversuchs eine Software zur Datenaufbereitung, Auswertung und Bilderzeugung. Damit ermöglichte er die zeitnahe Präsentation erster Daten. Matlab-Grafiken finden sich in Hubalek et al. (2005a), Hubalek & Schierz (2005b) und Hubalek et al. (2006a) wieder.

Das in dieser Arbeit vorgestellte umfangreiche Programmpaket wurde später von Marcel Christoffel entwickelt. Es dient zur Datenaufbereitung, Auswertung und graphischen Darstellung sowohl der Messdaten als auch der Daten aus den Fragebogen.

Allen Beteiligten danke ich an dieser Stelle nochmals herzlich für die engagierte und fruchtbare Zusammenarbeit. Besonders bedanke ich mich bei Dr. Dietmar Zöschg und Dr. habil. Alexander Rosemann, die selbstlos zahlreiche Stunden ihrer Freizeit in dieses Projekt investiert haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Summary	7
1 Zusammenfassung	9
2 Ziele.....	11
Teil A Grundlagen.....	13
3 Biologische Lichtwirkungen	15
3.1 Einführung	15
3.2 Definition grundlegender Bezeichnungen.....	17
3.2.1 Licht	17
3.2.2 Nicht-visuelle Lichtwirkungen.....	17
3.2.3 Vertikale Beleuchtungsstärke am Auge	18
3.2.4 'Blaulich'-Intensität am Auge.....	19
3.2.5 Dosis.....	20
3.3 Übertragungspfade des Lichts über das Auge	21
3.3.1 Übertragungspfad für den Sehvorgang.....	21
3.3.2 Übertragungspfad für die nicht-visuellen Lichtwirkungen.....	22
3.3.3 Verflechtung der Übertragungspfade	24
3.4 Beispiele nicht-visueller Lichtwirkungen	25
3.4.1 Licht und circadianer Rhythmus.....	25
3.4.2 Melatonin-Suppression durch Licht.....	27
3.4.3 Anwendungsgebiete von Licht und Melatonin zur Beeinflussung der circadianen Rhythmik	28
3.4.4 Behandlung von SAD mit Licht	29
3.5 Grenzen.....	31
3.5.1 Schädigende Wirkung von UV- und IR-Strahlung	31
3.5.2 Schädigende Wirkung von Licht.....	31
3.5.3 Lichtdosis oder Dunkeldosis	32
3.5.4 Kritische Hinterfragung einzelner Versuchsergebnisse.....	33

4	Drei Lichtwirkungen im Alltag	35
4.1	Einleitung	35
4.2	Einfluss des Lichts auf die Schlafqualität	36
4.2.1	Begriffsklärung: Schlafqualität	36
4.2.2	Messung der Schlafqualität	36
4.2.3	Licht und Schlafstörungen	37
4.2.4	Licht und Schlafqualität	37
4.3	Einfluss des Lichts auf die Aktiviertheit	41
4.3.1	Begriffsklärung: Aktiviertheit	41
4.3.2	Messung der Aktiviertheit	41
4.3.3	Licht während der Nacht und Aktiviertheit	41
4.3.4	Licht während des Tages und Aktiviertheit	42
4.3.5	Grenzen der Aktiviertheit durch Licht	44
4.4	Einfluss des Lichts auf das Wohlbefinden	45
4.4.1	Begriffsklärung: Wohlbefinden	45
4.4.2	Messung des Wohlbefindens	45
4.4.3	Frauen und Wohlbefinden	45
4.4.4	Licht und Wohlbefinden	46
4.5	Ausblick	50
4.5.1	Wohlbefinden versus Aktiviertheit?	50
4.5.2	Psychologische versus biologische Farbwirkungen	51
5	Photometrie	53
5.1	Die spektrale Empfindlichkeit	53
5.1.1	Die spektrale Hellempfindlichkeit	54
5.1.2	Die spektrale Empfindlichkeit für die Melatonin-Suppression	54
5.1.3	Spektrale Empfindlichkeiten für weitere nicht-visuelle Lichtwirkungen	56
5.1.4	Die spektrale Empfindlichkeit für die Lichttherapie	56
5.1.5	Weitere Einflussgrößen auf die spektrale Empfindlichkeit	57
5.1.6	Der circadiane Wirkungsfaktor a_{cv} als Verhältnis zwischen 'Blaulich'-Intensität und Beleuchtungsstärke	57
5.1.7	Zusammenfassung	58
5.2	Die räumliche Integration	59
5.3	Das zeitliche Verhalten	61
5.3.1	Zeitpunkt	61
5.3.2	Dauer bzw. Dynamik	62
5.3.3	Intensität	63
5.3.4	Dosis	64
5.3.5	Zusammenfassung	65

Teil B	<i>LuxBlick</i> – mobiles Aufzeichnungsgerät für Licht am Auge	67
6	Messgeräte: Einleitung	69
6.1	Anforderungen an ein Messgerät	69
6.2	Existierende mobile Messgeräte.....	71
7	<i>LuxBlick</i> – mobiles Messgerät für Licht am Auge.....	75
7.1	Allgemeines.....	75
7.2	Sensoren	76
7.2.1	Beschreibung der Sensoren	76
7.2.2	Die spektrale Anpassung	77
7.2.3	Die räumliche Anpassung	79
7.3	Hardware	80
7.4	Software	81
7.5	Kalibrierung des Messgerätes	81
7.6	Verifikation des Messsystems	82
7.6.1	Linearität	82
7.6.2	Farbmessung.....	83
7.7	Anwendung	84
7.8	Weiteres Entwicklungspotential	84
7.8.1	Sensorik.....	84
7.8.2	Hardware	85
7.8.3	Software.....	85
7.8.4	Kalibrierung.....	85
8	<i>LuxBlick</i> – Datenaufbereitung.....	87
8.1	Datenbank und Analyseprogramm	87
8.1.1	Datenbank	87
8.1.2	Analyseprogramm.....	88
8.2	Graphische Darstellung der Daten	88
8.2.1	Darstellungsoptionen	88
8.2.2	Beispiel eines Tagessatzes	89
8.2.3	Beispieldatensatz paralleler Messungen.....	91
8.2.4	Kumulierte Verteilung.....	94
8.3	Statistische Aufbereitung der Daten	96
8.3.1	Messzeiträume.....	96
8.3.2	Intensitätsparameter	97

Teil C	Explorativer Feldversuch zur täglichen Lichtexposition von Büroarbeitern.....	99
9	Feldversuch: Einleitung	101
9.1	Wirkungen des Lichts am Auge im Alltag.....	102
9.2	Bisherige Forschungsergebnisse zur täglichen Lichtexposition des Auges	103
9.2.1	Licht zu Hause.....	103
9.2.2	Licht am Büroarbeitsplatz.....	104
9.2.3	Licht während der Dämmerung	105
9.2.4	Tägliche Lichtexposition	106
9.3	Forschungsziele.....	110
9.3.1	Tägliche Lichtexposition des Auges	110
9.3.2	Einfluss des Lichts auf Schlafqualität, Aktiviertheit und Wohlbefinden	111
10	Methodik	113
10.1	Beschreibung der Versuchsteilnehmer	113
10.2	Beschreibung der Büroumgebung	115
10.3	Die subjektiven Fragebogen	117
10.3.1	Einstiegsfragebogen.....	117
10.3.2	Startfragebogen.....	117
10.3.3	Befindlichkeitstagebuch.....	118
10.3.4	Schlussfragebogen.....	119
10.4	Versuchsablauf	119
10.4.1	Einweisung.....	119
10.4.2	Ablauf der sieben Versuchstage.....	119
10.4.3	Abschluss des Versuchs	121
10.5	Auswertung der subjektiven Fragebogen.....	122
10.5.1	Einfluss des <i>LuxBlick</i> Messgerätes	122
10.5.2	Ermittlung der Lichtsensitivität.....	125
10.5.3	Ermittlung der Schlafqualität.....	126
10.5.4	Ermittlung der Aktiviertheit.....	127
10.5.5	Ermittlung des Wohlbefindens.....	130
10.5.6	Ermittlung weiterer möglicher Einflussgrößen	133
10.6	Auswertung der objektiven Versuchsdaten	134
10.6.1	Berücksichtigung des Transmissionsgrades der Sehhilfen	134
10.6.2	Verwendbarkeit der Datensätze	134
10.6.3	Beginn, Ende und Dauer der Aufzeichnungen	135
10.6.4	Zeit im Büro	138
10.6.5	Verwendung der Wetterdaten während der Versuchszeit	139

11	Resultate	141
11.1	Korrelation von Beleuchtungsstärke und 'Blaulicht'-Intensität	141
11.1.1	Korrelation - Zeit im Büro	142
11.1.2	Korrelation - tägliche Lichtexposition	143
11.2	Beleuchtungsstärke - Zeit im Büro.....	145
11.2.1	Belichtung, Perzentile und Dauer über Schwelle	145
11.2.2	Korrelation der Intensitätsparameter	148
11.2.3	Einfluss der architektonischen Variablen	149
11.3	Beleuchtungsstärke - tägliche Lichtexposition.....	154
11.3.1	Belichtung, Perzentile und Dauer über Schwelle	154
11.3.2	Korrelation der Intensitätsparameter	157
11.3.3	Einflussgrößen auf die tägliche Lichtexposition	158
11.4	Schlafqualität, Aktiviertheit und Wohlbefinden.....	164
11.4.1	Korrelation von Wohlbefinden und Aktiviertheit.....	164
11.4.2	Einfluss der täglichen Lichtexposition	165
11.4.3	Einfluss des Spektrums der täglichen Lichtexposition	166
11.4.4	Einfluss weiterer möglicher Größen	167
11.4.5	Einfluss der Lichtsensitivität	169
11.4.6	Einfluss der täglichen Lichtexposition unter Berücksichtigung weiterer möglicher Einflussgrößen.....	170
11.4.7	Morgen/Abend-Verhältnis der Lichtexposition.....	177
12	Diskussion	179
12.1	Methodenkritik	179
12.1.1	Intensitätsparameter	179
12.1.2	Methodik	181
12.2	Resultate	183
12.2.1	Korrelation von Beleuchtungsstärke und 'Blaulicht'-Intensität.....	183
12.2.2	Lichtexposition während der Zeit im Büro	183
12.2.3	Tägliche Lichtexposition.....	185
12.2.4	Lichtexposition während der Zeit im Büro im Vergleich zur täglichen Lichtexposition.....	188
12.2.5	Schlafqualität, Aktiviertheit und Wohlbefinden	189
12.3	Weiterer Forschungsbedarf	193
13	Schlussfolgerung	195
14	Relevanz für die Praxis.....	197

Anhang	201
ETH E-Collection	201
Literaturverzeichnis	203
Abkürzungen	215
Begriffsdefinitionen	219
Index	223