



Projekt „Licht und Gesundheit“ - Feldstudie in Industriebetrieben

Bearbeiter:

Technische Universität Ilmenau
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik

Dr.-Ing. Karin Bieske

Dr.-Ing. Cornelia Vandahl

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz

Auftraggeber:

Berufsgenossenschaft Holz und Metall

Ilmenau, Oktober 2011

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden Lichtwirkungen am Tag auf das Wohlbefinden, die Aktiviertheit, die Schlafqualität und die Akzeptanz für unterschiedliche Beleuchtungsszenarien an Industriearbeitsplätzen untersucht.

Während fünf Projektzyklen von je mindestens 4 Wochen wurden Probanden befragt und lichttechnische und farbmetrische Messungen durchgeführt. Verglichen wurde die Wirkung der bestehenden Beleuchtungsverhältnisse (IST-Situation) mit derjenigen, wenn zusätzlich zur vorhandenen Beleuchtungsanlage große Flächenleuchten (60 cm x 60 cm) im Vorfeld mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 8000 K (FL 8000 K) montiert sind, wenn zusätzlich große Flächenleuchten (60 cm x 60 cm) im Vorfeld montiert sind, deren Lichtfarbe im Verlaufe der Schicht von einer ähnlichsten Farbtemperatur von 8000 K zu einer ähnlichsten Farbtemperatur von 3000 K (FL dynamisch) variiert, und wenn die bestehende Beleuchtungsanlage mit Lampen mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 8000 K ausgerüstet wird (8000 K). An der Untersuchung nahmen 41 Probanden im Alter zwischen 21 und 61 Jahren teil, die an fünf Standorten typische Montage und Reparaturarbeiten durchführten. Die Studie fand im Zeitraum von September 2010 bis April 2011 statt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die untersuchten Beleuchtungsszenarien von den Probanden mehrheitlich akzeptiert wurden. Probleme traten mit den Flächenleuchten dort auf, wo störende Blendung oder Reflexe auftraten oder die Integration der Flächenleuchte am Arbeitsplatz schwierig war. Die Untersuchungsergebnisse sprechen nicht gegen den Einsatz von Lampen hoher ähnlichster Farbtemperatur an Arbeitsplätzen. Die veränderte Beleuchtung führte teilweise zu höherer Aktivierung am Tag und zu positiven Einflüssen auf den Schlaf. Jedoch waren diese Einflüsse oft nicht signifikant und oft war die Validität der Ergebnisse nicht hinreichend.

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	V
Formelzeichen und Abkürzungen	VI
Danksagung	VII
1 Einleitung.....	8
1.1 Motivation	8
1.2 Forschungsthese.....	9
1.3 Aufgabenstellung.....	17
2 Voruntersuchungen	18
2.1 Beleuchtungssituationen	19
2.2 Versuchsparameter	22
2.3 Messungen.....	23
2.4 Befragung.....	25
2.5 Blenduntersuchung	25
2.6 Ergebnisse	25
3 Feldexperiment – Versuchsdesign	30
3.1 Versuchsarbeitsplätze	31
3.2 Versuchsszenarien.....	31
3.3 Flächenleuchten.....	33
3.4 Messtechnische Erfassung	34
3.5 Befragung.....	35
3.6 Wetterdaten.....	37

4	Feldexperiment – Versuchsdurchführung.....	38
4.1	Probanden.....	38
4.2	Zeitplan	39
4.3	Datenbasis	40
5	Feldexperiment – Ergebnisse.....	44
5.1	Lichttechnische und nichtvisuelle Parameter	45
5.2	Abschlussbefragung.....	56
5.3	Befragung.....	58
6	Diskussion.....	70
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	73
8	Literaturverzeichnis	74
9	Anhang.....	76
9.1	Fragebogen zu Bewertung der Beleuchtungsszene - Voruntersuchung	77
9.2	Daten Einstellungen Flächenleuchte	78
9.3	Beschreibung der Versuchsarbeitsplätze	79
9.4	Fragebögen des Feldexperiments.....	91
9.5	Messergebnisse der LuxBlick-Messungen	97

Bezeichnungen

Allgemeinbeleuchtung

Beleuchtungssystem, das einen Raum von der Decke her beleuchtet und eine Grundbeleuchtung schafft

Beleuchtungsniveau

Gütemerkmal der Beleuchtung, das sich aus den Faktoren $\rightarrow$ Beleuchtungsstärke oder $\rightarrow$ Leuchtdichte bestimmt

Beleuchtungsstärke E in lx

Lichttechnische Größe, die die Dichte des auf einer Fläche auftreffenden $\rightarrow$ Lichtstroms beschreibt

Bestrahlungsstärke E_e in W/m^2

physikalische Größe, die die Dichte des auf einer Fläche auftreffenden $\rightarrow$ Strahlungsflusses beschreibt

Leuchtdichte L in cd/m^2

Lichttechnische Größe, die die Helligkeit einer Fläche charakterisiert

Lichtstrom Φ in lm

Lichttechnische Größe zur Charakterisierung der von einem Körper ausgesendeten oder reflektierten Lichtleistung, ist die mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ bewertete Strahlungsleistung, multipliziert mit 683 lm/W

Strahlungsfluss Φ_e in W

Physikalische Größe zur Charakterisierung der von einem Körper ausgesendeten oder reflektierten Strahlungsleistung

Reflexionsgrad ρ

Stärke der Reflexionsfähigkeit eines Stoffes, Verhältnis des reflektierten $\rightarrow$ Lichtstroms zu dem auf den Stoff auftreffenden $\rightarrow$ Lichtstrom

Formelzeichen und Abkürzungen

FL	Flächenleuchte
$s_{ms}(\lambda)$	relative spektrale Empfindlichkeit der Melatonininsuppression
$V(\lambda)$	Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges
λ	Wellenlänge in nm
CCT	ähnlichste Farbtemperatur
L_{FL}	mittlere Leuchtdichte der Flächenleuchte
L_N	Leuchtdichte auf dem Reflexionsnormal
E_h	horizontale Beleuchtungsstärke
X_V	mit der $V(\lambda)$ -Kurve bewertet Strahlungsgröße
$X_{S_{ms}}$	mit der $s_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewertet Strahlungsgröße
E_v	vertikale Beleuchtungsstärke
a_{msv}	biologischen Wirkungsfaktor
$\rho(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad
LAP100%, LAP75%, LAP50%	Laborarbeitsplatz mit Flächenleuchte im Vorfeld bei mittleren Leuchtdichte von $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$ oder $L_{FL} = 750 \text{ cd/m}^2$

Danksagung

Die Festlegungen für Normen und Empfehlungen zu den Güte Merkmalen der Beleuchtung basieren im Wesentlichen auf Erkenntnissen zu visuellen Anforderungen wie Sehleistung und Sehkomfort bei jungen Probanden. Eine gute Beleuchtung unterstützt jedoch nicht nur die Sehleistung, sondern hat auch Einfluss auf Wohlbefinden und Aktiviertheit des Menschen. Neue Erkenntnisse zur biologischen Lichtwirkung fanden bisher kaum Eingang in die Betrachtungen zur Lichtqualität. Viele Untersuchungen beziehen sich auf Lichtwirkungen in der Nacht. Erkenntnisse zur Wirkung des Lichtes am Tag unter realen Bedingungen sind kaum vorhanden.

Dankenswerter Weise wurde diese Thematik von der Berufsgenossenschaft Holz und Metall aufgegriffen und das Forschungsprojekt Licht und Gesundheit initiiert.

Besonders danken möchten wir den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die Diskussion und organisatorische Unterstützung bei der Durchführung des Feldexperiments. Ein besonderer Dank gilt Herrn Rödder für seine Hilfe vor Ort.

Ohne die Unterstützung der Firmen OSRAM AG mit der Bereitstellung von Lampen, die Firmen Philips, Siteco, TRILUX und Tridonic GmbH & Co KG bei der Beschaffung von Leuchten und Lichtsteuerungstechnik wären die Voruntersuchungen und das Feldexperiment nicht möglich gewesen.

Dank an die Firmen Ford-Werke GmbH in Köln, H. Heinz Messwiderstände GmbH in Elgersburg, IL Metronic Sensortechnik GmbH in Ilmenau, MEG Mechanik GmbH in Gießübel und ThyssenKrupp Steel AG in Duisburg, die in ihren Unternehmen die Durchführung des Feldexperiments ermöglichten. Nur durch die Unterstützung von Mitarbeitern in den Unternehmen waren die umfangreichen Montagearbeiten an den Arbeitsplätzen und die Durchführung der Befragungen realisierbar.

Ein besonderer Dank gilt den 41 Probanden, durch die die Ergebnisse zum vorliegenden Bericht erst möglich wurden.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Bisherige Normen und Empfehlungen zu Güte Merkmalen der Beleuchtung am Arbeitsplatz wurden lange Zeit als notwendig und hinreichend für eine gute Lichtqualität angesehen. Die Anforderungen orientierten sich dabei im Wesentlichen an den Aspekten Produktivität und Arbeitssicherheit und damit an visuellen Anforderungen¹. Zugrunde gelegt wurden mehrheitlich Daten, die an jungen, normalsichtigen Probanden erhoben wurden. Mit dem Alter verändert sich jedoch das visuelle System des Menschen und reduziert sich die Sehleistung. Da die Bevölkerung immer älter wird, muss auch am Arbeitsplatz von erhöhten Anforderungen an die Beleuchtung ausgegangen werden und ist die Gültigkeit bisheriger normativer Vorgaben zu prüfen.

In den letzten Jahren sind neue Kenntnisse zu biologischen, nichtvisuellen Lichtwirkungen bekannt geworden. Diese werden zwar über das Auge, nicht aber über den für das Sehen verantwortlichen spezifischen neuronalen Pfad („retino-hypothalamische“) Sehbahn) übertragen. Es zeigte sich, dass unspezifische Lichtwirkungen („NIF-Effekte“ = „non-image forming effects“) wichtige biologische Vorgänge im Menschen vermitteln². Bekannt sind Effekte, wie:

- Unterdrückung der Melatonin-Produktion in der Nacht,
- Störung oder Stabilisierung der biologischen inneren Uhr (circadiane Rhythmik),
- Steigerung des Wachheitsgrades, Aktivierung,

¹ SCHMITS PW: *Arbeitsstättenbeleuchtung - auf der Suche nach neuen Lichtqualitäten*: In: Tagungsband - Zweites Symposium Licht und Gesundheit. Berlin: 2001, 39-49.

² DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren*. DIN V5031 Teil 100, Berlin: Beuth Verlag, Juni 2009.

- erfolgreiche Behandlung saisonaler Depressionen (SAD) mit Lichttherapie.

Licht hat damit nicht nur Bedeutung für das Sehen, sondern hat ebenso Einfluss auf biologische Vorgänge und damit Wirkungen auf Wohlbefinden und Gesundheit. Für die Beurteilung der Lichtqualität von Beleuchtungssystemen müssen daher nicht nur visuelle Kriterien sondern auch biologische Lichtwirkungen berücksichtigt werden. Da sich biologische Lichtwirkungen sowohl in Quantität, Spektrum, räumlicher Verteilung, in Zeitpunkt und Dauer grundlegend von der visuellen Lichtwirkung unterscheiden, sind unterschiedliche Bewertungen und Festlegungen für beide Aspekte erforderlich.

Die aktivierende Wirkung von Licht hat großes Potential für die Beleuchtungspraxis. Leider ist dies die – insbesondere am Tage – am wenigsten untersuchte biologische Lichtwirkung. Auch die Stabilität der inneren Uhr dürfte in einer Zeit unregelmäßiger Arbeits- und Freizeitaktivitäten stärker variieren als früher. Über die sinnvolle Anwendung der Erkenntnisse zu biologischen Lichtwirkungen am Arbeitsplatz ist derzeit sehr wenig bekannt. Im Blickpunkt dieser Studie steht daher der Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungsszenarien an Industriearbeitsplätzen am Tage auf Wohlbefinden, Schlafqualität und Akzeptanz der Mitarbeiter.

1.2 Forschungsthemen

These 1:

Da biologische Lichtwirkungen über den nichtvisuellen Pfad des Auges vermittelt werden, sind die Beleuchtungsverhältnisse am Auge entscheidend. Um Lichtwirkungen erzielen zu können, ist eine ausreichend hohe biologisch bewertete Bestrahlungsstärke am Auge erforderlich.

Die biologische Wirkung von Licht wird im Wesentlichen durch melanopsinhaltige Ganglienzellen in der Netzhaut des Auges vermittelt, die eine Verbindung zum Nucleus suprachiasmaticus (SCN), einem Kerngebiet im Hypothalamus des Gehirns, besitzen³. Der SCN gilt beim Menschen als interner Rhythmusgeber, der über Nervenfasern die Epiphyse (Zirbeldrüse) erregt und damit die Melatoninsekretion steuert. Studien weisen darauf hin, dass der circadian bedingte Melatoninanstieg am Abend

³ BERSON DM, DUNN FA, TAKAO M: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. Science 2002; 295 (5557): 1070-1073.

eng mit dem Gefühl der Schläfrigkeit und einer erhöhten Einschlafneigung verbunden ist^{4, 5, 6}.

Es scheinen zahlreiche Rückkopplungsmechanismen zu bestehen, über die das Hormon Melatonin rezeptorvermittelt die Aktivität von Neuronen des Hypothalamus beeinflussen kann⁷. Der Hypothalamus ist das wichtigste Steuerzentrum des vegetativen Nervensystems, das grundlegende Prozesse im Körper reguliert⁸. Viele Körperprozesse wie z.B. die Regulation der Körperkerntemperatur, die Schlafneigung, die körperliche Leistungsbereitschaft oder die Reaktionsfähigkeit und das Schmerzempfinden werden beeinflusst und verändern sich rhythmisch im Tagesverlauf. Unter normalen Bedingungen ist es das Tageslicht, das diese Rhythmen mit dem Tag-Nacht-Rhythmus synchronisiert. Licht und Beleuchtung haben damit nicht nur Auswirkungen auf die Sehleistung, sondern beeinflussen auch biologische Körpervorgänge entscheidend und nehmen maßgeblich Einfluss auf Verhalten, Wohlbefinden und Gesundheit des Menschen. Forschungen im Bereich der Chronobiologie in den letzten Jahren haben gezeigt, dass ein Lichtmangel oder eine Lichtexposition zum falschen Zeitpunkt Erkrankungen hervorrufen können^{9, 10, 11, 12, 13}.

Abbildung 1 zeigt eine Darstellung des visuellen und biologischen Pfads der Lichtwirkung und eine schematische Beschreibung der biologischen Lichtwirkung.

⁴ DIJK DJ, CAJOCHEN C: Melatonin and the circadian regulation of sleep initiation, consolidation, structure, and the sleep EEG. *Journal Biological Rhythms* 1997; 12 (6): 627-635.

⁵ WYATT JK, RITZ-DE CECCO A, CZEISLER CA, DIJK DJ: *Circadian temperature and melatonin rhythms, sleep and neurobehavioral function in humans living on a 20-h day*. *American Journal of Physiology* 1999; 46 (4): R1152-R1163.

⁶ WEHR TA, AESCHBACH D, DUNCAN WC: *Evidence for a biological dawn and dusk in the human circadian timing system*. *Journal of Physiology* 2001; 535 (3): 937-951.

⁷ ZULLEY J, HAEN E, LUND R, ROSENBERG T: *Licht-Therapie*. Regensburg: Roderer Verlag, 1997, 143-163.

⁸ SCHMIDT R, THEWS G: *Physiologie des Menschen*. Berlin: Springer Verlag, 27. Auflage 1997, 405f.

⁹ ZULLEY J, HAEN E, LUND R, ROSENBERG T: *Licht-Therapie*. Regensburg: Roderer Verlag, 1997.

¹⁰ Rosenthal NE, Kasper SF: *Licht-Therapie*. München: Heyne Verlag, 1997.

¹¹ FRÖHLING I, JACOBY B: *Vitalität und Gesundheit durch Licht*. Niederhausen: Falken Verlag, 1998.

¹² THOR-WIEDEMANN S: *Licht gibt Leben*. München: Knaur Verlag, 1996.

¹³ ARENDT J: *Melatonin and human rhythms*. *Chronobiology International* 2006; 23 (1/2): 21-37.

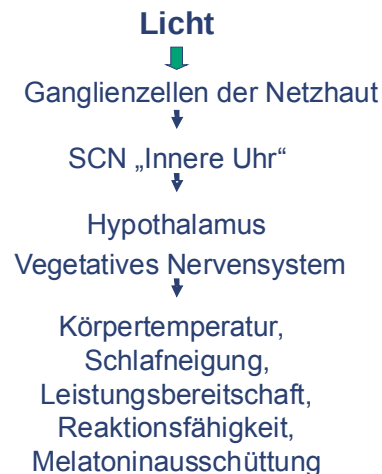
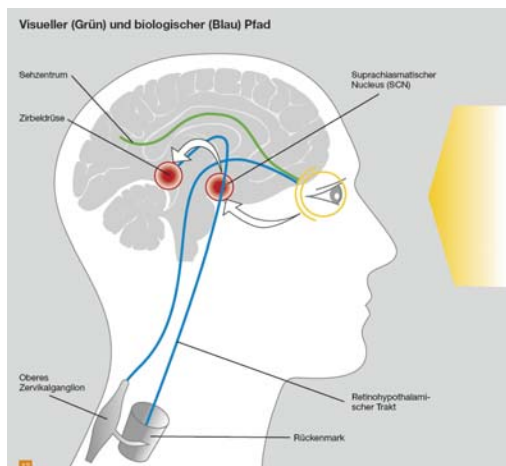


Abbildung 1: Darstellung des visuellen und biologischen Pfads der Lichtwirkung¹⁴ links und schematische Beschreibung der biologischen Lichtwirkung rechts

These 2:

Strahlung mit höherer ähnlichster Farbtemperatur ist biologisch wirksamer.

Mit den Untersuchungen von BRAINARD und THAPAN im Jahre 2001 konnte unabhängig voneinander das spektrale Wirkungsspektrum der Unterdrückung von Melatonin durch monochromatisches Licht bestimmt werden^{15, 16}. GALL leitete daraus die Wirkfunktion für die Melatoninsuppression $s_{ms}(\lambda)$ ab¹⁷. Diese ist in Abbildung 2 dargestellt. Deutlich erkennbar ist der grundlegende Unterschied zum Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen des menschlichen Auges $V(\lambda)$. Es ist daher zu erwarten, dass höhere Anteile im kurzwelligen Spektralbereich einer Strahlung zu höheren biologischen Lichtwirkungen führen und damit der Lichtfarbe einer Lichtquelle eine entscheidende Bedeutung zukommt.

In Arbeitsbereichen werden heute vorwiegend Leuchtstofflampen eingesetzt. Für diesen Lampentyp sind die relativen spektralen Verteilungen für unterschiedliche ähnlichste Farbtemperaturen in Abbildung 3 gezeigt. Strahlung mit höherer ähnlichster Farbtemperatur besitzt einen höheren Strahlungsanteil im kurzwelligen Spektralbe-

¹⁴ FÖRDERGEMEINSCHAFT GUTES LICHT: Licht.wissen 19 - *Wirkung des Lichtes auf den Menschen*. 2010: 12

¹⁵ BRAINARD GC, HANIFIN JP, GREESON JM, BYRNE B, GLICKMAN G, GERNER E, ROLLAG MD: *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor*. Journal of Neuroscience 2001; 21 (16): 6405-6412.

¹⁶ THAPAN K, ARENDT J, SKENE DJ: *An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans*. Journal of Physiology 2001; 535 (1): 261-267.

¹⁷ GALL D: *Circadiane Lichtgrößen und deren meßtechnische Ermittlung*. Licht 2002; 54 (11/12): 1292-1297

reich im Vergleich zur Strahlung mit niedriger ähnlichster Farbtemperatur gleicher Beleuchtungsstärke.

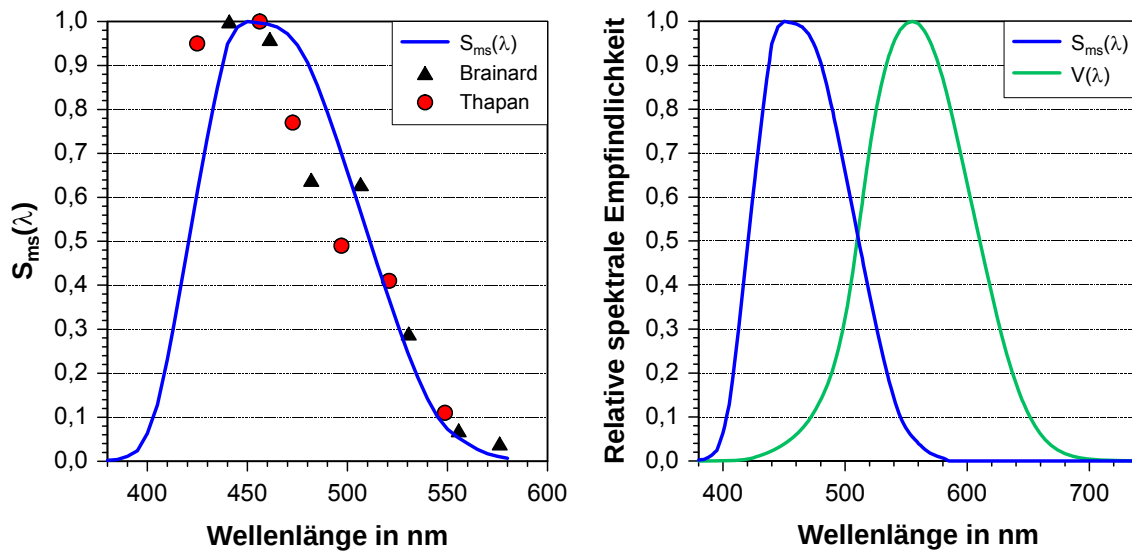


Abbildung 2: Wirkfunktion für die Melatoninunterdrückung $S_{ms}(\lambda)$ nach Daten von BRAINARD, THAPAN und GALL (links) und Vergleich zum spektralen Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen des menschlichen Auges $V(\lambda)$ ¹⁸ (rechts)

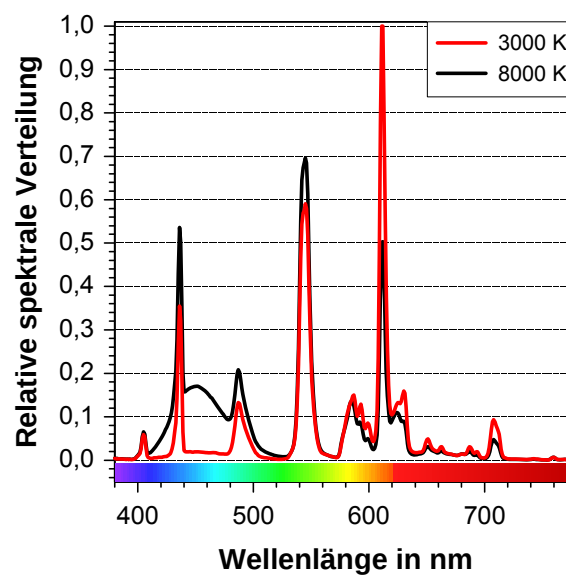


Abbildung 3: Relative spektrale Verteilung von Leuchtstofflampen mit Ähnlichsten Farbtemperaturen von 3000 K und 8000 K bei konstantem Beleuchtungsniveau

Berechnungen der nach Abbildung 2 bewerteten Größen liefern die in Tabelle 1 zusammengefassten Werte. Danach besitzt die Strahlung mit einer ähnlichsten Farb-

¹⁸ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik. DIN V5031 Teil 3, Berlin: Beuth Verlag, März 1982.

temperatur von 8000 K im Vergleich zu der von 3000 K bei gleicher Beleuchtungsstärke eine um den Faktor 2,9 größere biologische Lichtwirkung.

Tabelle 1: Relative bewertete Strahlungsgrößen für ein Beleuchtungsniveau von 500 lx

Lichttechnische Größe	$\frac{X_{V-8000K}}{X_{V-3000K}} = \frac{500 \text{ lx}}{500 \text{ lx}} = 1,0$
biologische Lichtwirkung	$\frac{X_{S_{ms}-8000K}}{X_{S_{ms}-3000K}} = \frac{0,713 \text{ W / m}^2}{0,244 \text{ W / m}^2} = 2,9$

These 3:

Großflächige Leuchten im Vorfeld haben eine höhere biologische Lichtwirkung als kleine leuchtende Flächen im Gesichtsfeld.

Untersuchungen der Netzhaut von Primaten zeigen, dass 0,2% der in der Netzhaut vorhandenen Ganglienzellen Melanopsin enthalten und dass deren Anzahl mit etwa 3000 Zellen im Vergleich zu der Anzahl der visuellen Rezeptoren (120 Millionen Stäbchen und 7 Million Zapfen) gering ist^{19,20}. Während die Zapfen, die für das Sehen am Tage verantwortlich sind, ihre höchste Konzentration auf der Netzhaut in der Fovea mit 120000 Rezeptoren/mm² haben, die zur Peripherie bei +/- 20° gegen Null sinkt, sind die melanopsinhaltigen Ganglienzellen außer in der Fovea über die gesamte Netzhaut mit einer Dichte von 3-5 Zellen/mm² verteilt und haben ihre maximale Konzentration von 20-25 Zellen/mm² im Umfeld der Fovea (Abbildung 4/Abbildung 5).

Wirkung kann Licht nur dann erzielen, wenn es von den Rezeptoren absorbiert werden kann. Aufgrund der großflächigen Verteilung der melanopsinhaltigen Ganglienzellen auf der Netzhaut ist daher zu erwarten, dass großflächig leuchtende Flächen, die die gesamte Netzhaut ausleuchten eine höhere Wirkung erzielen als eine Beleuchtung, die nur punktuell Netzhautareale reizt (Abbildung 6). Das bedeutet damit auch, dass nicht nur die Beleuchtung im Bereich der Sehaufgabe wesentlich ist, sondern Licht in der Peripherie eine wichtige Bedeutung für biologische Lichtwirkungen hat.

¹⁹ DACEY DM ET ALL: Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. Letters to nature 2005; **433** (2): 749-754.

²⁰ BAER R (Hrsg.): *Beleuchtungstechnik*. Berlin: Verlag Technik, 2. Auflage 1996, 47.

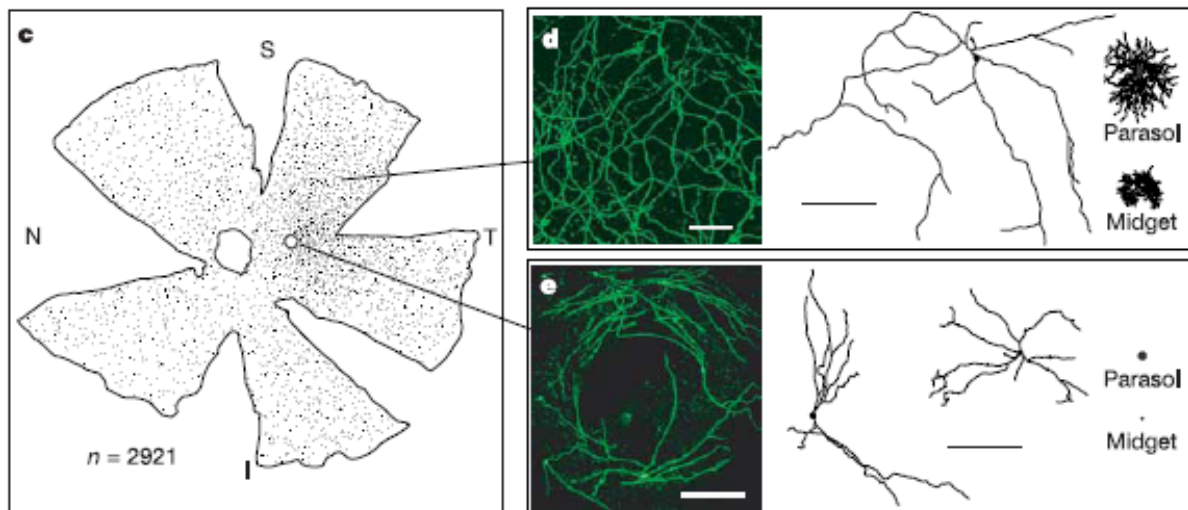


Abbildung 4: Bild c: Verteilung von melanopsinhalten Ganglienzellen in der Netzhaut eines Makaken. N, nasale Netzhaut; T, temporale Netzhaut; S, obere Netzhaut; I, untere Netzhaut). Bild d: melanopsinhalten Ganglienzellen in der Peripherie (Skalierung: 100 µm links, 200 µm rechts).

Bild e: melanopsinhalten Ganglienzellen in der Umgebung der Fovea (Skalierung 200 µm)¹⁹

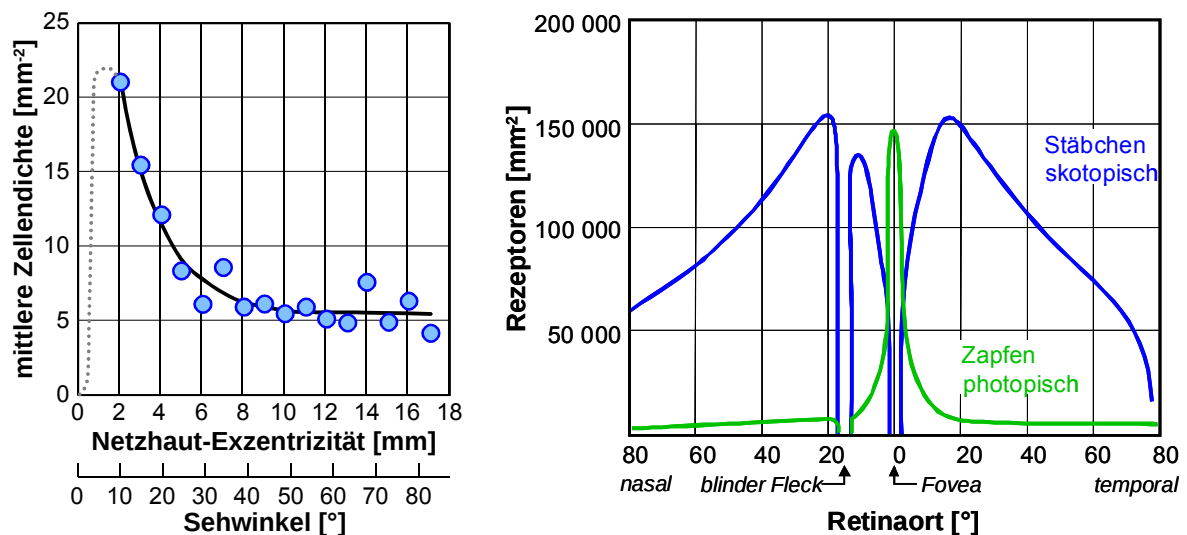


Abbildung 5: Zellendichte in Abhängigkeit von Netzhautort links für melanopsinhalten Ganglienzellen und rechts für Zapfen und Stäbchen nach Schierz²¹

²¹ SCHIERZ C: persönliche Informationen nach Quellen 19 und OSTERBERG G. (1935): *Topography of the layer of rods and cones in the human retina*. Acta Ophthal Suppl. V6 P1–103.

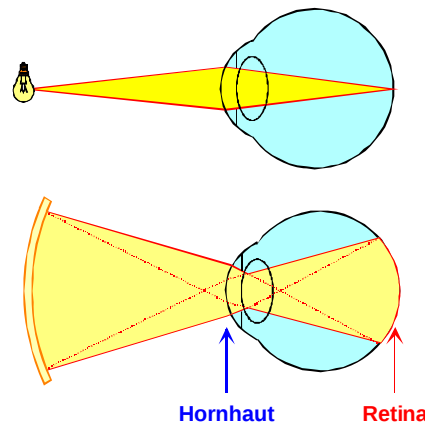


Abbildung 6: Unterschiedliche Beleuchtungssituationen, welche gleiche Hornhautbeleuchtungsstärken, aber unterschiedliche Netzhautbeleuchtungsstärken erzeugen²²

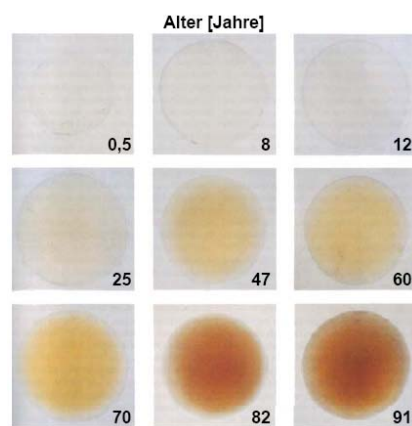


Abbildung 7: Vergilbung der Augenlinse in Abhängigkeit vom Alter²³

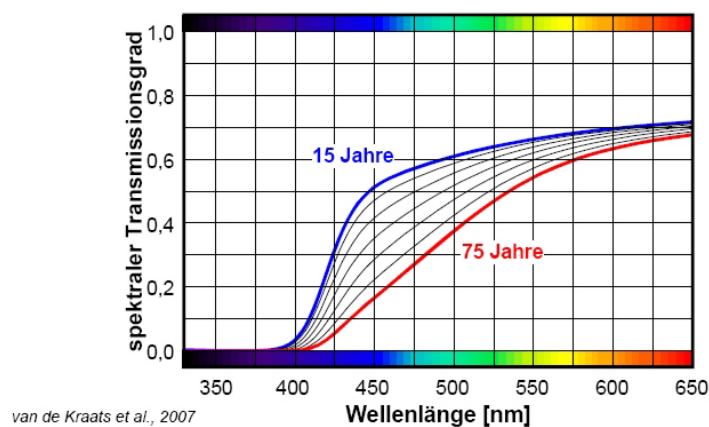


Abbildung 8: Spektraler Transmissionsgrad des menschlichen Auges in Abhängigkeit vom Alter²⁴

²² SCHIERZ C: *Leben wir in „biologischer Dunkelheit“?* In: Tagungsband-Licht 2002. Bern: 2002, 381-389

²³ LERMAN S: *Radiant Energy and the eye*. Macmillan Publishing Co. Inc. New York: 1980, Fig. 3.1

These 4:

Lichtwirkung und Lichtbedürfnisse sind altersabhängig.

Mit zunehmendem Alter vergilbt die Linse im Auge (Abbildung 7). Die Vergilbung führt zu einer Änderung der spektralen Transmissionseigenschaften des Auges, wodurch die Wirkung der ins Auge gelangenden Strahlung beeinflusst wird. Das Auge älterer Menschen ist demnach weniger empfindlich gegenüber kurzwelliger Strahlung und der Gesamttransmissionsgrad sinkt mit dem Alter (Abbildung 8). Daher ist anzunehmen, dass der Lichtbedarf mit dem Alter zunimmt, um die gleiche Wirkung wie in jüngeren Jahren zu erzielen. Dies gilt besonders für die biologische Lichtwirkung.

These 5:

Dynamische Beleuchtung mit sich ändernder Lichtfarbe ist wirksamer als statische Beleuchtung.

Es ist nicht der Fall, dass eine umso größere biologische Lichtwirkung eine umso größere Arbeitsleistung oder eine umso verbesserte Gesundheit verspricht. Das Wohlbefinden und langfristig auch die Gesundheit stehen in einer umgekehrt U-förmigen Beziehung zur Aktivierung. Zu wenig wie auch zu viel Aktivierung ist beanspruchend. Ziel wäre es, mit Licht die innere Uhr auf die äußere Uhr des Tageslichts (Tag-Nacht-Rhythmus) abzustimmen und nebst Steigerungen des Wachheitsgrades auch entsprechende Erholungsphasen zu ermöglichen. Dabei spielt die Tageszeit, zu welcher die biologische Lichtwirkung angeregt oder verhindert wird eine wesentliche Rolle. Gesicherte Erkenntnisse zur zeitlichen Steuerung der Lichtwirkung sind bisher nicht bekannt.

Untersuchungen zur Wirkung von hellem Licht bei Nacht vergleichen eine zeitlich kontinuierliche Beleuchtung mit einer Beleuchtung, die phasenweise zwischen hohen und niedrigen Beleuchtungsniveaus schwankt^{25,26,27}. Sie zeigen, dass mit sich än-

²⁴ SCHIERZ C: *Lighting for the elderly: physiological basics and their consequences* In: Tagungsband-LUX EUROPA 2009. Istanbul: 2009, 147-154

²⁵ GRONFIER C, WRIGHT KP, KRONAUER RE, JEWETT ME, CZEISLER CA: *Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans*. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism 2004; **287** (1): E174-E181.

²⁶ BAEHR EK, FOGG LF, EASTMAN CI: *Intermittent bright light and exercise to entrain human circadian rhythms to night work*. American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 1999; **277** (6): R1598-R1604.

dernden Reizen während einer Zeitdauer ähnliche Wirkungen erzielt werden konnten wie mit statischen Reizen. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass mit einer sich ändernden Lichtfarbe während des Tages größere Effekte erzielt werden können.

1.3 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung biologischer Lichtwirkungen am Tage unter realen Arbeitsbedingungen. Im Rahmen eines Feldexperiments soll der Einfluss ausgewählter Beleuchtungsszenarien auf Wohlbefinden, Schlafqualität und Akzeptanz der Mitarbeiter untersucht werden. Die Untersuchung erfolgte an ausgewählten tageslichtarmen Industriearbeitsplätzen mit typischen Montage- und Reparaturarbeiten. Die Lichtwirkung wurde mittels Fragebogen erfasst. Zur Beschreibung der Beleuchtungsverhältnisse dienten photometrische Messungen an den Arbeitsplätzen.

Erwartet werden Aussagen zum Einfluss auf die Lichtwirkung am Tage folgender Parameter:

- Spektrum, Beleuchtungsniveau und Lichtverteilung
- Lichtdynamik
- Alter

Für die Untersuchungen wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- 40 Industriearbeiter
- Tätigkeit in abgeschlossenen Bereichen und kontinuierlich am Platz
- Arbeitsplätze mit geringem Tageslichteinfluss
- ähnliche Beleuchtungsverhältnisse
- Einbeziehung von Frauen und Männern, von jüngeren und älteren Arbeitern
- Ausschluss von Nachtschichten
- Möglichkeit der Integration von zusätzlichen Leuchten im Arbeitsbereich
- Datenerhebung (messtechnische Erfassung, subjektive Bewertung)
- Versuchsdauer mindestens 4 Wochen je Beleuchtungssituation
- Untersuchungszeitraum in den Herbst- und Wintermonaten
- mittlere Leuchtdichte der zusätzlichen Flächenleuchten $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$

²⁷ RIMMER DW, BOIVIN DB, SHANAHAN TL, KRONAUER RE, DUFFY JF, CZEISLER CA: *Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light*. American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 2000; **279** (5): R1574-R1579.

2 Voruntersuchungen

Anhand von Laboruntersuchungen war zu klären, wie die Beleuchtung für die Feldstudie zu gestalten ist und welche wesentliche Kenngrößen für die Beschreibung der Beleuchtungsverhältnisse am Arbeitsort sein können. Entscheidend für die Lichtwirkung sind die Beleuchtungsverhältnisse am Auge des Arbeitenden. Sie werden maßgeblich durch die Umgebung und die Aktivität der Person (Kopf- und Blickbewegungen, Ortswechsel usw.) bestimmt ²⁸.

An einem Laborarbeitsplatz wurden verschiedene Beleuchtungssituationen hinsichtlich ihrer Beleuchtungsverhältnisse am Auge untersucht. Dazu wurde in einem Versuchsraum ein Arbeitsbereich (Länge: 4 m, Breite: 2,4 m, Höhe: 3 m) eingerichtet. Die Seitenwände und die Vorderseite des Versuchsraums waren verspiegelt, sodass der Eindruck einer großen Halle entstand. An einem Arbeitstisch (Breite: 1 m, Tiefe: 0,6 m, Höhe: 0,75 m) wurden Knarren montiert. Abbildung 9 zeigt den Montagearbeitsplatz im Versuchsraum.



Abbildung 9: Montagearbeitsplatz im Versuchsraum

²⁸ NEUHÄUSER S: Zeitabhängige Messung und Bewertung personenbezogener Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz. Diplomarbeit. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2010

Neben der in der Praxis häufig üblichen Allgemeinbeleuchtung, die über dem Arbeitstisch angeordnet ist, wurden Flächenleuchten im Vorfeld und seitlich zum Arbeitsplatz montiert. Zusätzlich zu den horizontalen und vertikalen Beleuchtungsstärken wurden mit einem LuxBlick-Messgerät (siehe Kapitel 2.3.2) die Beleuchtungsverhältnisse am Auge der Versuchspersonen gemessen. Abbildung 10 zeigt die Teile für die Montage der Knarren, den Laborarbeitsplatz und die unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien. In Abbildung 11 sind Probanden bei Montagearbeiten zu sehen.



Abbildung 10: Teile für die Montage der Knarre (links), Blick auf den Laborarbeitsplatz für die Montage von Knarren mit Flächenleuchten im Vorfeld und seitlich (Mitte), Blick auf die Allgemeinbeleuchtung und Segelleuchten (rechts)



Abbildung 11: Probanden bei der Montage von Knarren während der Vorversuche (Fotos: Arri 2010)

2.1 Beleuchtungssituationen

In Voruntersuchungen wurden verschiedene Beleuchtungsszenarien untersucht. Aus den Ergebnissen wurden Hinweise für die Ausführung der vertikalen Flächenleuchten

für die Feldstudie erwartet. Alle Leuchten waren mit elektronischen Vorschaltgeräten ausgerüstet, sodass jede Leuchte separat in der Helligkeit angepasst werden konnte. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die untersuchten Beleuchtungssituationen.

Tabelle 2: Bezeichnung der einzelnen Beleuchtungssituationen im Vorversuch

Kennzeichnung	Beleuchtungssituationen
Allg.-B.	Allgemeinbeleuchtung über dem Arbeitsplatz angeordnet
groß	reduzierte Allgemeinbeleuchtung und große Flächenleuchte im Vorfeld
unten	reduzierte Allgemeinbeleuchtung und große Flächenleuchte im Vorfeld, wobei die obere Hälfte abgedeckt wurde
oben	reduzierte Allgemeinbeleuchtung und große Flächenleuchte im Vorfeld, wobei die untere Hälfte abgedeckt wurde
Segel	reduzierte Allgemeinbeleuchtung und Segelleuchte
rechts+links	reduzierte Allgemeinbeleuchtung und Flächenleuchten links und rechts seitlich montiert
rechts	reduzierte Allgemeinbeleuchtung und Flächenleuchten rechts seitlich montiert
links	reduzierte Allgemeinbeleuchtung und Flächenleuchten links seitlich montiert

2.1.1 Allgemeinbeleuchtung

Die Ausführung und Anordnung zum Arbeitsplatz ist in Abbildung 12 ersichtlich.

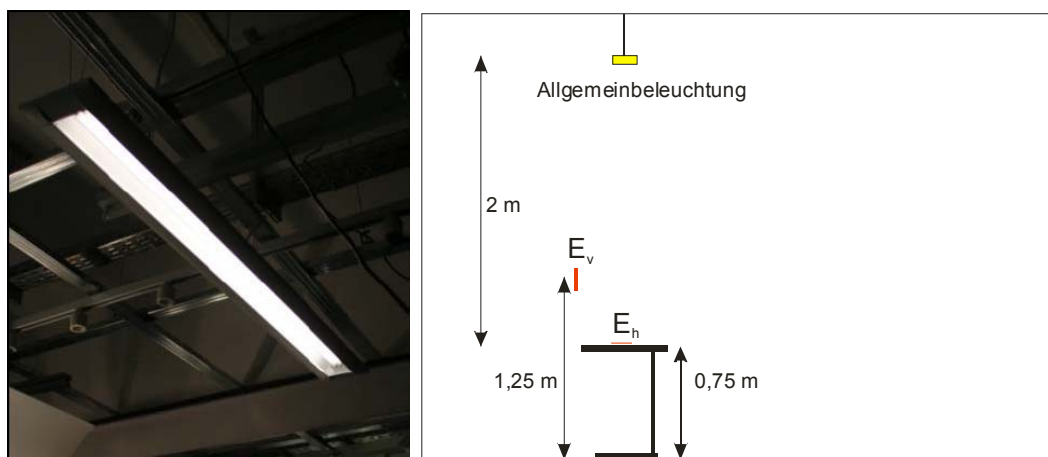


Abbildung 12: Aufbau der Beleuchtungssituation: Allgemeinbeleuchtung

Für die Realisierung der Allgemeinbeleuchtung (Leuchte als abgependelte Deckenleuchte ausgeführt) wurde eine einfache Leuchte ohne Raster mit einer Länge von

1,55 m verwendet, die mit zwei Leuchtstofflampen des Typs T5 FH 49W/840 und einem elektronischen Vorschaltgerät bestückt war.

2.1.2 Flächenleuchte im Vorfeld

Die Flächenleuchte im Vorfeld (Abbildung 13) wurde mit einer Leuchte der Größe 135 cm x 135 cm der Firma Trilux realisiert und in 1,4 m vor dem Arbeitsplatz vertikal aufgestellt. Die Leuchte enthielt je 8 Leuchtstofflampen des Typs T5 FH 28W/830 HE und des Typs T5 FH 28W/865 und eine diffuse Abschlussfolie. Die Lampen waren in der Leuchte symmetrisch angeordnet und über eine digitale Ansteuerung separat ansteuerbar, sodass die Lichtfarbe und die Helligkeit der Leuchte angepasst werden konnte. Die Flächenleuchte wurde in den Ausführungen groß (Gesamtfläche), unten (untere Hälfte) und oben (obere Hälfte) untersucht.

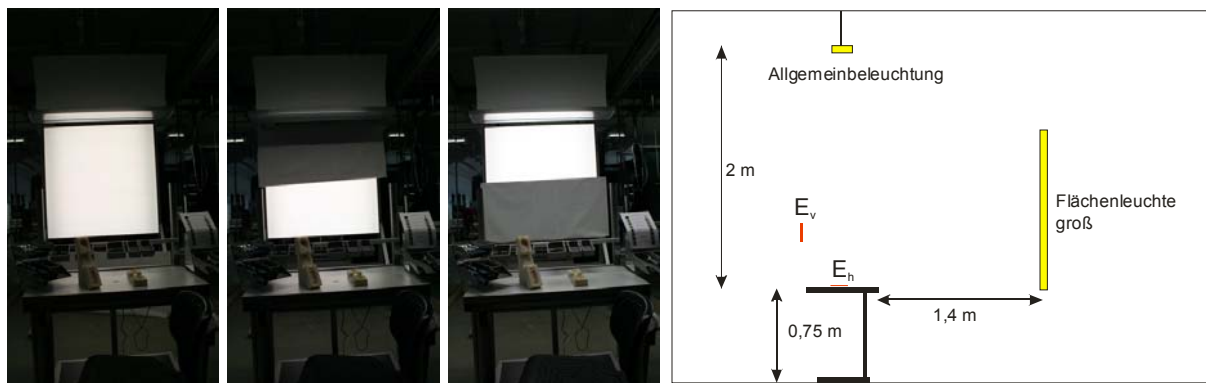


Abbildung 13: Aufbau der Beleuchtungssituation: Flächenleuchte im Vorfeld in den Ausführungen Flächenleuchte groß, Flächenleuchte unten, Flächenleuchte oben

2.1.3 Segelleuchte

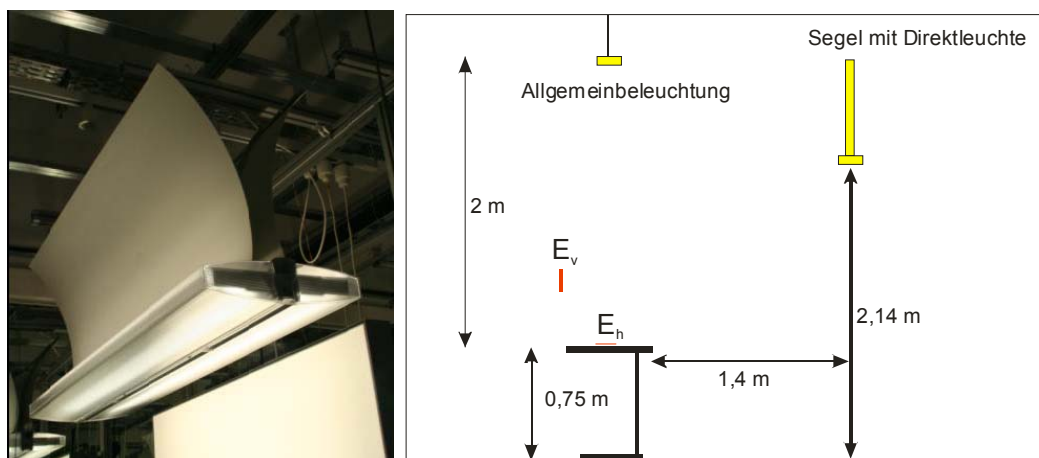


Abbildung 14: Aufbau der Beleuchtungssituation: Segelleuchte mit einem Lichtanteil der direkt nach unten auskoppelt und einem Indirektanteil der über das Segel abstrahlt

Die Segelleuchte (Abbildung 14) ist eine Leuchte der Firma Siteco mit einer Länge von 1,2 m und einer Tiefe von 0,41 m, deren Schild eine gekrümmte Fläche von 1,2 m x 0,62 m aufspannt. Die Leuchte enthielt Lampen des Typs FQ 80W/840 HQ.

2.1.4 Flächenleuchte seitlich

Für die seitlichen Flächenleuchten (Abbildung 15) wurden Leuchten der Firma planista Lichttechnik GmbH (2B2-VD) mit DALI-Steuerungstechnik verwendet. Diese waren mit Lampen des Typs FQ 24/840 ausgestattet und einzeln ansteuerbar.

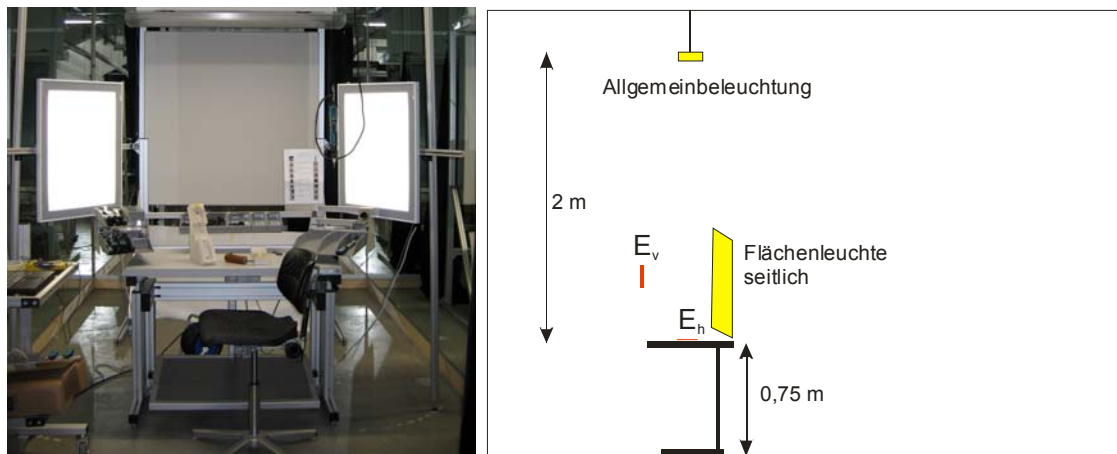


Abbildung 15: Aufbau der Beleuchtungssituation: Flächenleuchte seitlich in den Ausführungen Flächenleuchten links und rechts, Flächenleuchte rechts, Flächenleuchte links

2.2 Versuchsparameter

Die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen wurden bei einer konstanten Beleuchtungsstärke von $E_v = 500$ lx in der Arbeitsebene bezüglich der Beleuchtungsbedingungen am Auge untersucht. Die Messungen erfolgten bei Allgemeinbeleuchtung und bei reduzierter Allgemeinbeleuchtung mit zusätzlichen vertikalen Flächenleuchten. Die Leuchtdichte der Flächenleuchten betrug jeweils $L_{FL} = 1000$ cd/m². Für die Voruntersuchung wurde eine neutralweiße Lichtfarbe mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $CCT = 4000$ K verwendet. An der Voruntersuchung nahmen 20 Probanden, darunter 9 Frauen, teil. Das Alter der Probanden lag zwischen 17 und 64 Jahren ($\bar{x} = 37 \pm 14$ Jahre). Die Probanden arbeiteten unter jeder Beleuchtungssituation 15 min und führten im Anschluss daran die Bewertungen der Beleuchtungssituation durch. Voruntersuchungen über 90 min und 30 min zeigten für die durchgeführte Montagetätigkeit keine signifikant anderen Ergebnisse. Für die abschließende Auswertung der LuxBlick-Messungen wurde ein Zeitraum von 10 min herangezogen.

2.3 Messungen

2.3.1 Bestimmung der vertikalen und horizontalen Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich

Die Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke (E_h) erfolgte mittig in der Arbeitsebene. Die vertikale Beleuchtungsstärke (E_v) wurde in der Position des Auges nach DIN 33402 Teil 2²⁹ in einer Höhe von 1,25 m über dem Boden senkrecht zur Tischebene gemessen. Als Messgerät diente das Spektralradiometer der Firma Yeti Specbos 1201³⁰. Je nach Vorsatz können spektrale Strahldichten oder spektrale Bestrahlungsstärken bestimmt werden. Das Messgerät besitzt ein Wellenlängenauflösungsvermögen von 5 nm und erlaubt die Berechnung integraler bewerteter Größen. Auf diese Weise ist die Messung lichttechnischer Größen wie der Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte an einem definierten Messort möglich. Außerdem können farbmimetrische Größen bestimmt werden, wie beispielsweise Farbwertanteile x, y oder u', v' und ähnlichste Farbtemperatur CCT mit der die Lichtfarbe angegeben werden kann. Es lassen sich auch biologische Lichtwirkungsgrößen aus den gemessenen Daten berechnen.



Abbildung 16: Spektralradiometer Specbos 1201 (Firma Yeti)

²⁹ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Werte*. DIN 33402 Teil 2, Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2005.

³⁰ <http://www.opteema.com/upload/pubfiles/specbos1201.pdf>, gelesen am 01.03.2011

2.3.2 LuxBlick-Messgerät

Die Lichtwirkung auf den menschlichen Körper wird durch die in den Rezeptoren des Auges absorbierte Strahlung vermittelt. Das Licht, das ins Auge gelangt, hängt entscheidend von der Blickrichtung und damit maßgeblich von der Kopfposition ab. Da der Mensch während der Arbeit weder starr geradeaus blickt noch fix in einer Position verharrt, ist zu erwarten, dass sich die Lichtverhältnisse am Auge ändern und die horizontale und vertikale Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz kein unmittelbar aussagekräftiges Maß sind. Dazu wurde am Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau ein LuxBlick-Messgerät entwickelt, das mobile Langzeitaufzeichnungen von Beleuchtungsstärken und mit der s_{ms} -Kurve bewerteten Bestrahlungsstärken am Auge ermöglicht ³¹. Abbildung 17 zeigt die für die Anpassung der spektralen Empfindlichkeiten der Einzelsensoren benutzten Normkurven und die Ausführungsform des Messgerätes.

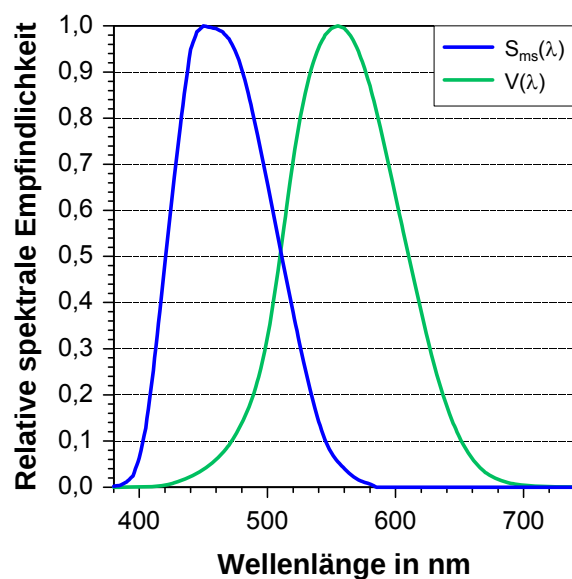


Abbildung 17: Normkurven für die Anpassung der spektrale Empfindlichkeit der Sensoren des LuxBlick-Messgerätes, die an einem Brillengestell befestigt der Erfassung der Beleuchtungsstärke und der mit der s_{ms} -Kurve bewerteten Bestrahlungsstärke dient, die für die Erfassung der biologischen Lichtwirkung herangezogen wird

³¹ WOLF S: LuxBlick – Mobile Langzeitaufzeichnung von Beleuchtungsstärke und circadianer Bestrahlungsstärke am Auge. Lux junior 2009, Dörfeld

2.4 Befragung

Jede dargebotene Beleuchtungssituation wurde von den Probanden hinsichtlich der Beleuchtungsverhältnisse bewertet. Die wesentlichen Aspekte dafür waren:

- Gefallen und Natürlichkeit
- Helligkeit und Lichtfarbe
- Blendung und Belästigung
- Einfluss auf die Leistungsbereitschaft

Der verwendete Fragebogen ist im Anhang 9.1 Seite 77 zu finden.

2.5 Blenduntersuchung

Für die Festlegung der Leuchtdichte der Flächenleuchten im Feldexperiment wurden Blendbewertungen mit fünf Probanden vorgenommen. Ausgehend von einer mittleren Leuchtdichte von $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$ wurde die Leuchtdichte der Flächenleuchte in Stufen bis zur Blendschwelle erhöht. Die Bewertungen wurden für horizontale Beleuchtungsstärken von $E_h = 300 \text{ lx}$ und $E_h = 500 \text{ lx}$ erhoben und mit zwei Messwiederholungen durchgeführt.

2.6 Ergebnisse

2.6.1 Messungen

Die vertikale Beleuchtungsstärke wird maßgeblich durch die Lichtverteilung im Vorfeld bestimmt. Für ein konstantes Beleuchtungsniveau in der Arbeitsebene variiert die vertikale Beleuchtungsstärke je nach Beleuchtungssituation. Abbildung 18 stellt die Ergebnisse grafisch dar. In Tabelle 3 ist das Verhältnis der vertikalen Beleuchtungsstärke zur horizontalen Beleuchtungsstärke für die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen zusammengefasst. Danach beträgt bei Allgemeinbeleuchtung die vertikale Beleuchtungsstärke 61 % der horizontalen Beleuchtungsstärke. Werden Flächenleuchten im Vorfeld oder seitlich eingesetzt, werden höhere Werte erreicht. Großflächige Leuchten nahe der Blicklinie erzeugen die größte vertikale Beleuchtungsstärke. Die vertikale Beleuchtungsstärke für die Ausführungen der Flächenleuchte unten, oben oder links + rechts zeigt vergleichbare Werte, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Flächenleuchten für die Praxis unterschiedlich ausgeführt werden können.

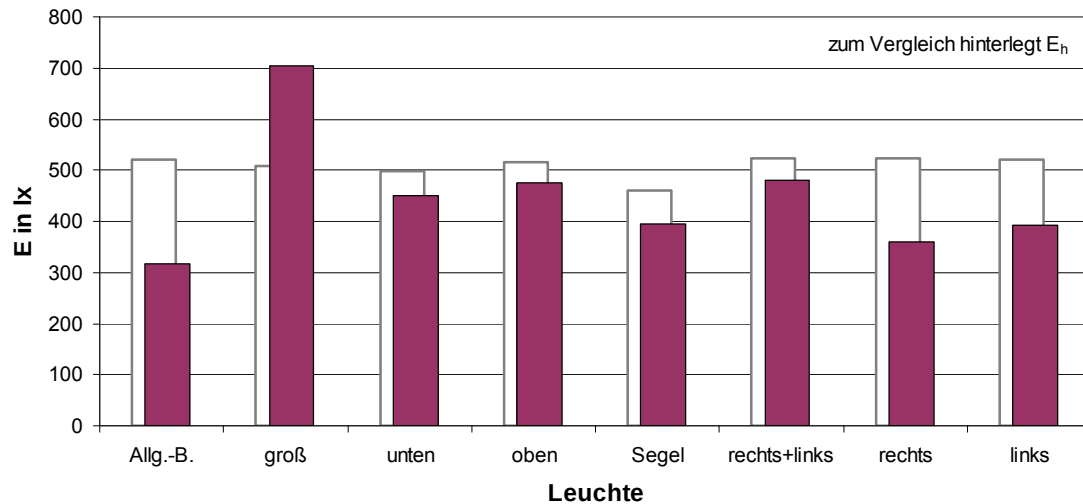


Abbildung 18: Vertikale Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von den Beleuchtungsverhältnissen am Laborarbeitsplatz bei gleicher horizontaler Beleuchtungsstärke $E_h = 500$ lx

Tabelle 3: Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Beleuchtungsstärke E_v/E_h für verschiedene Beleuchtungssituationen

Allg.-B.	groß	unten	oben	Segel	rechts+links	rechts	links
0,61	1,39	0,90	0,92	0,86	0,92	0,69	0,75

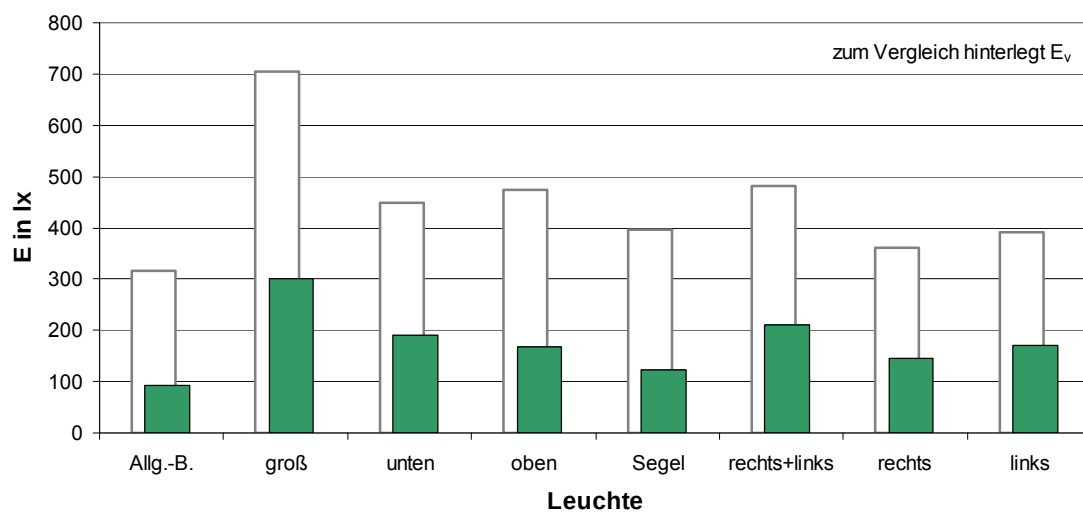


Abbildung 19: Beleuchtungsstärke am Auge in Abhängigkeit von den Beleuchtungsverhältnissen am Laborarbeitsplatz bei gleicher horizontaler Beleuchtungsstärke $E_h = 500$ lx

Tabelle 4: Verhältnis der Beleuchtungsstärke am Auge zur vertikalen Beleuchtungsstärke E_{Auge}/E_v für verschiedene Beleuchtungssituationen

Allg.-B.	groß	unten	oben	Segel	rechts+links	rechts	links
0,29	0,43	0,43	0,36	0,31	0,44	0,40	0,43

Abbildung 19 stellt die Mittelwerte über 20 Probanden der mit dem LuxBlick-Messgerät gemessenen Beleuchtungsstärken am Auge grafisch dar. Die größte Beleuchtungsstärke am Auge wird bei Verwendung der großen Flächenleuchte im Vorfeld erreicht. Die Wirkung des unteren Teils der Flächenleuchte im Vorfeld und der seitlich rechts und links angeordneten Flächenleuchten bezüglich der Beleuchtungsstärke am Auge ist vergleichbar, sodass beide Varianten im Feldexperiment äquivalent eingesetzt werden können. Die geringste Beleuchtungsstärke am Auge wird bei Allgemeinbeleuchtung erzeugt. Sie beträgt etwa 30% der vertikalen und 20% der horizontalen Beleuchtungsstärke. Tabelle 4 fasst das Verhältnis von Beleuchtungsstärke am Auge zur vertikalen Beleuchtungsstärke zusammen. Etwa 30% bis 44 % der vertikalen Beleuchtungsstärke werden während der Tätigkeit am Probandenauge wirksam.

2.6.2 Befragung

Die Ergebnisse der Befragung sind in Abbildung 20 zusammengefasst.

Die Lichtsituation ...

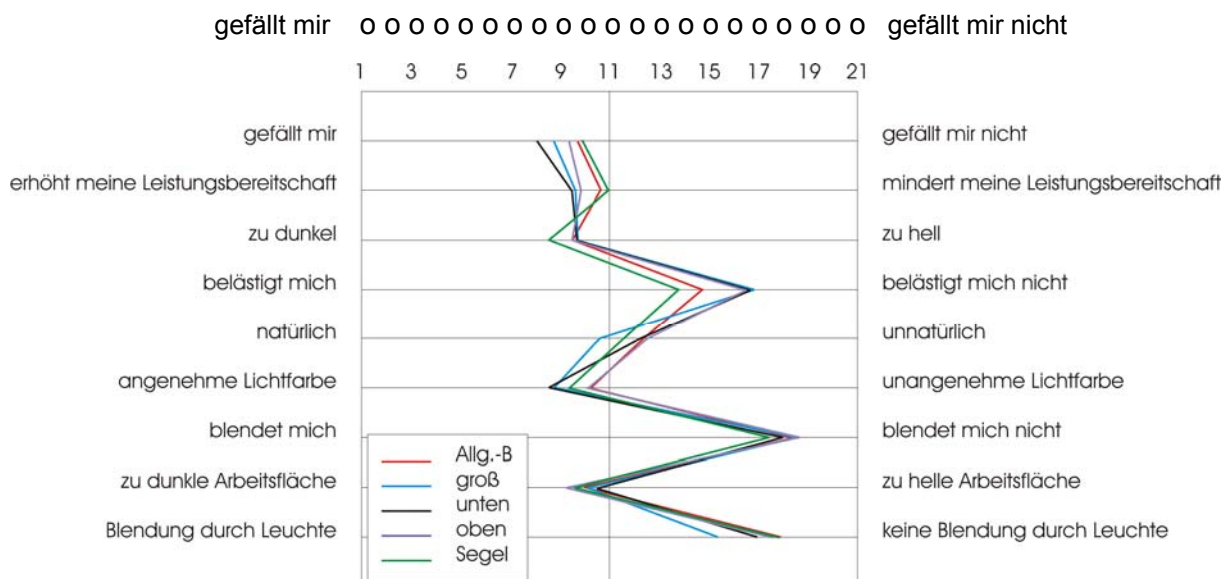


Abbildung 20: Ergebnis der Befragung der Testpersonen zur Bewertung der Beleuchtungssituationen in den Voruntersuchungen von 20 Probanden

Die Auswertung der Befragung ergab für die untersuchten Beleuchtungssituationen ähnliche Bewertung durch die Probanden. Die Flächenleuchten im Vorfeld wurden von den Probanden für die Arbeitssituation akzeptiert und verursachten keine Probleme. Die Flächenleuchten können damit für das Feldexperiment als geeignet angesehen werden.

2.6.3 Blendung

Die Ergebnisse der Blenduntersuchung sind in Abbildung 21 dargestellt.

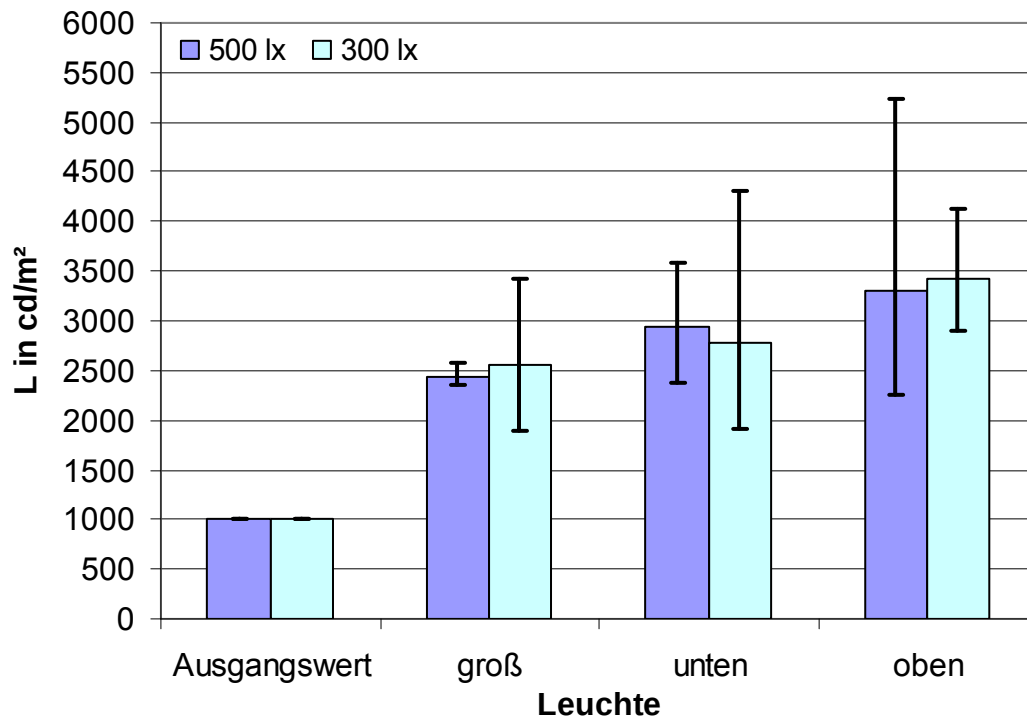


Abbildung 21: Blendschwelle in Abhängigkeit von der Flächenleuchte, Mittelwerte, Minimum und Maximum von 15 Urteilen von 5 Probanden

Danach werden von den Probanden Leuchtdichten im Mittel bis zu $L_{FL} = 2000 \text{ cd/m}^2$ für die Flächenleuchte toleriert. Im Feldexperiment können damit mittlere Leuchtdichten von $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$ getestet werden. Um signifikante Effekte nachweisen zu können, wurde die Helligkeit der Flächenleuchten im Vorfeld möglichst groß gewählt.

2.6.4 Einfluss der Lichtfarbe

Aus den Spektraldaten ist eine Berechnung visueller und biologischer Lichtwirkungen möglich. Die Berechnung der visuellen Größe erfolgt durch Bewertung der spektralen Strahlung mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen des menschlichen Auges $V(\lambda)$ nach Gleichung (1).

Gleichung (1):
$$X_v = \int X_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Die biologische Größe berechnet sich nach Gleichung (2) durch Bewertung mit der Wirkfunktion für die Melatoninsuppression $s_{ms}(\lambda)$.

Gleichung (2):
$$X_{S_{ms}} = \int X_{e\lambda}(\lambda) \cdot S_{ms}(\lambda) d\lambda$$

Das Verhältnis beider Größen gibt den biologischen Wirkungsfaktor a_{msv} nach Gleichung (3) an. Je größer dieser Wert ist, umso größer ist die biologische Wirkung des Lichts bei vorgegebener Beleuchtungsstärke.

Gleichung (3):
$$a_{msv} = \frac{\int X_{e\lambda}(\lambda) \cdot S_{ms}(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}$$

Auf der Basis typischer Spektralverteilungen von Leuchtstofflampen lässt sich für unterschiedliche Lichtfarben bei gleichem Beleuchtungsniveau die biologische Wirksamkeit abschätzen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Einfluss der Lichtfarbe auf die biologische Wirksamkeit beispielhaft für Leuchtstofflampen

CCT	3000 K	4000 K	6500 K	8000 K
Lichtfarbe	warmweiß	neutralweiß	tageslichtweiß	skywhite
a_{msv}	0,34	0,52	0,9	0,98
E_{msv} bei $E_v = 500 \text{ lx}$	0,249 W/m ²	0,381 W/m ²	0,659 W/m ²	0,805 W/m ²
E_{msv}/E_{msv_3000K}	1,0	1,5	2,6	3,2
E_{msv}/E_{msv_4000K}	0,7	1,0	1,7	2,1

Durch Variation der Lichtfarbe lässt sich die biologische Wirksamkeit variieren. Je größer der kurzwellige Spektralanteil einer Strahlung mit weißer Lichtfarbe ist, umso höher ist die ähnlichste Farbtemperatur CCT und umso größer ist die biologische Wirkung zu vermuten. Im Vergleich zu warmweißen Lichtfarben ist eine Lichtfarbe mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $CCT = 8000 \text{ K}$ um den Faktor 3, im Vergleich zu neutralen Lichtfarben um den Faktor 2 wirksamer.

3 Feldexperiment – Versuchsdesign

Die Auswahl der Arbeitsplätze, die Festlegungen von Versuchsdesign und Methodik für das Feldexperiment erfolgte in Abstimmung mit den Kooperationspartnern des projektbegleitenden Lenkungsausschusses. Ziel war es, möglichst viele Probanden an den Standorten Köln und Duisburg zu gewinnen. Da dies nicht realisiert werden konnte, wurden weitere Standorte hinzugezogen.

Die Durchführung eines Feldexperiments bedeutet Untersuchung im natürlichen Umfeld. Aufgrund der technischen und arbeitsorganisatorischen Gegebenheiten waren Kompromisse bei der Durchführung nicht vermeidbar. Das bedeutet:

- Ähnliche Beleuchtungsverhältnisse an allen Arbeitsplätzen waren nicht realisierbar. Zum einen fehlten die technischen Voraussetzungen zur Variation der Beleuchtung, zum anderen war ein Eingriff in Arbeitsabläufe und Anordnungen der Arbeitsmittel im Arbeitsbereich nicht möglich. Dadurch sind Variationen der Beleuchtungsverhältnisse zwischen Arbeitsplätzen nicht vermeidbar.
- Einzelne Beleuchtungsszenarien wurden durch zusätzliche Flächenleuchten im Arbeitsbereich als Ergänzung zur bestehenden Beleuchtung realisiert. Damit sind Variationen in der Wirksamkeit der Beleuchtung nicht auszuschließen.
- Stellenweise wurden die Flächenleuchten als zu hell und störend im Vorfeld empfunden. In Einzelfällen wurden diese daher mit reduzierter Helligkeit betrieben. Damit verbunden sind jedoch eine Reduzierung des Lichteinflusses der Flächenleuchte und eine mögliche Verringerung der Lichtwirkung.
- In der Versuchsroutine waren tägliche Befragungen der Mitarbeiter nicht möglich, sodass in einem wöchentlichen Turnus befragt wurde. Die Beleuchtungssituationen wurden zeitlich punktuell messtechnisch erfasst. Eine Streuung der Daten für die objektive und subjektive Bewertung ist daher nicht zu vermeiden.
- Es ist wahrscheinlich, dass während der Durchführung der Studie Störeinflüsse durch Freizeitverhalten, Variation der Arbeitsaufgaben und Tätigkeitsbereiche und Wettereinflüsse auftreten. Diese sind nicht alle detailliert erfassbar und können Lichteffekte maskieren.

3.1 Versuchsarbeitsplätze

Die Untersuchung wurde an fünf Unternehmen mit unterschiedlichen Standorten mit 41 Probanden durchgeführt. Tabelle 6 gibt dazu einen Überblick. Eine Auflistung und Beschreibung der Einzelarbeitsplätze ist im Anhang 9.3 ab Seite 79 zu finden.

Tabelle 6: Überblick über die an der Studie beteiligten Unternehmen

Unternehmen	Bereich	Probanden
ThyssenKrupp Steel Europe AG in Duisburg (TK)	Mechanische Werkstatt Hamborn (TK-HB)	7
	Mechanische Werkstatt Ruhrort (TK-RO)	3
Ford-Werke GmbH in Köln (FORD)	Getriebemontage Halle A (FORD-A)	2
	Hydraulikmontage Halle Y (FORD-Y)	9
MEG Mechanik GmbH in Gießübel (MEG)	Endmontage (MEG I)	4
	Fertigung (MEG II)	6
H. Heinz Messwiderstände GmbH in Elgersburg (HMW)	Sensorfertigung	6
IL Metronic Sensortechnik GmbH in Ilmenau (ILM)	Sensorfertigung	4

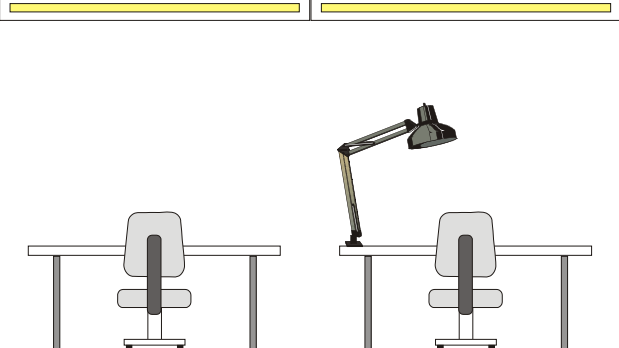
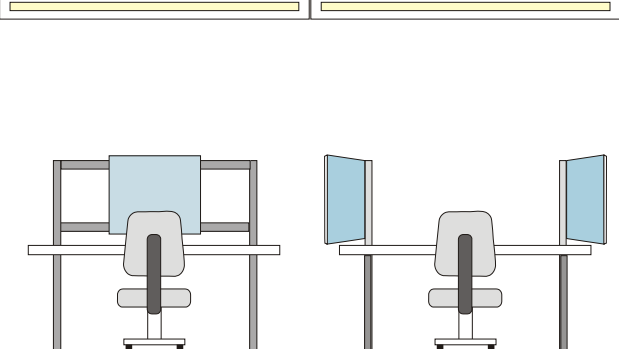
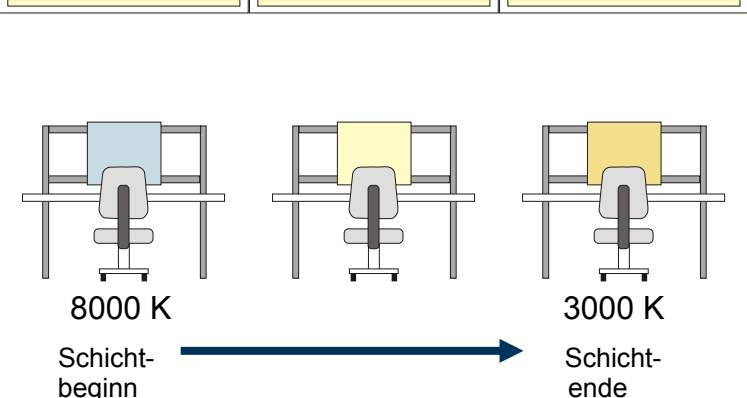
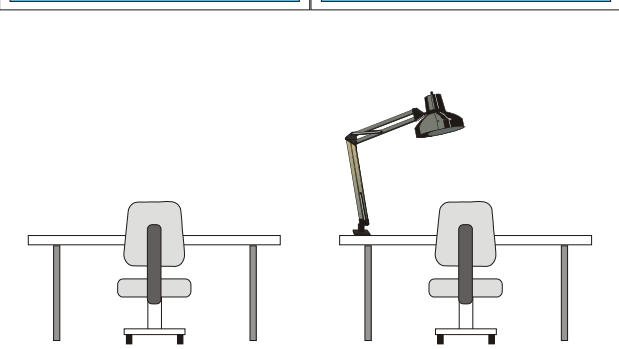
3.2 Versuchsszenarien

Bedingt durch die Gegebenheiten an den Arbeitsplätzen war es nicht möglich, einheitliche Beleuchtungsverhältnisse für die einzelnen Versuchsszenarien zu schaffen. Betrachtet werden daher in dieser Studie die Änderungen bezüglich der an den Arbeitsplätzen vorgefundenen Beleuchtungsverhältnisse (Situation S1 – Ist-Situation). Die Realisierung der unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien erfolgte in Ergänzung zur bestehenden Beleuchtungsanlage an den Arbeitsplätzen und durch Einbau von Lampen anderer Lichtfarbe in die vorhandenen Leuchten. Einen Überblick und eine Beschreibung über die untersuchten Beleuchtungssituationen gibt Tabelle 7.

Um den Einfluss von großflächigen leuchtenden Flächen zu untersuchen, wurde die Situation S2 - Flächenleuchte im Vorfeld/seitlich entworfen. Für einen Vergleich zwischen statischer Lichtfarbe und dynamischer Lichtfarbenvariation dient die Situation S3. Situation S4 wurde für die Bewertung des Einflusses der Lichtfarbe konzipiert. Für den Nachweis der Validität der Ergebnisse wurde zum Abschluss der Stu-

die die Ausgangssituation wiederholt untersucht (Situation S5). Jede Versuchssituation wurde über einen Zeitraum von mindestens vier Wochen untersucht.

Tabelle 7: Überblick über die untersuchten Beleuchtungssituationen

Situation S1/ Situation S5: Ist-Situation Allgemeinbeleuchtung oder Allgemeinbeleuchtung in Kombination mit arbeitsplatzbezogener Beleuchtung	
Situation S2: Ist-Situation mit Flächenleuchte im Vorfeld/seitlich Lichtfarbe $CCT = 8000\text{ K}$ statisch, $L_{FL} = 1500\text{ cd/m}^2$ (alternativ $L_{FL} = 1000\text{ cd/m}^2$ bzw. $L_{FL} = 750\text{ cd/m}^2$)	
Situation S3: Beleuchtung Ist-Situation mit Flächenleuchte im Vorfeld/seitlich, dynamische Lichtfarbenvariation 8000 K bis 3000 K im Tagesverlauf, $L_{FL} = 1500\text{ cd/m}^2$ (alternativ $L_{FL} = 1000\text{ cd/m}^2$ bzw. $L_{FL} = 750\text{ cd/m}^2$)	
Situation S4: Ist-Situation mit veränderter Lichtfarbe $CCT = 8000\text{ K}$ (Lampenwechsel)	

3.3 Flächenleuchten

Um den Einfluss großer leuchtender Flächen im Gesichtsfeld untersuchen zu können, wurden Flächenleuchten eingesetzt. Dafür wurden Leuchten der Firma Philips SmartForm TBS473 mit einer leuchtenden Fläche von 55,5 cm x 55,5 cm verwendet. Sie sind für sechs T5 Leuchtstofflampen ausgelegt, verfügen über elektronische Vorschaltgeräte mit DALI-Schnittstelle. Die Abschlussscheibe ist in OLC-Microlinsenoptik für die Lichtmischung realisiert. Verwendet wurden je Leuchte zwei Lampen Phillips Master T5 HO 827 24 W und vier Lampen Phillips Master T5 HO Activiva Natural 24 W. Für die Leuchte können Helligkeit und Lichtfarbe definiert werden.

Für die Realisierung der zeitlichen Lichtfarbendynamik wurde als Steuereinheit die DALI X TouchBox der Firma Tridonic eingesetzt. Über die Definition von Gruppen, Szenen und Sequenzen wurden Tages- und Wochenpläne für die Ansteuerung der Helligkeit und Lichtfarbe entworfen und realisiert. Das Prinzip ist in Abbildung 22 dargestellt.

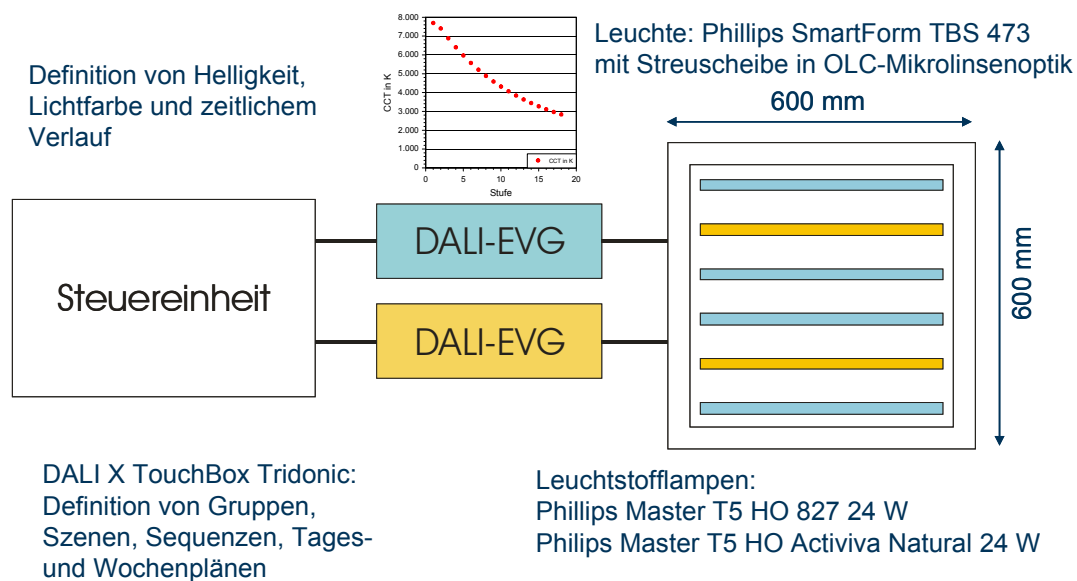


Abbildung 22: Aufbau und Steuerung der Flächenleuchte zur Realisierung definierter Lichtfarben bei bestimmten Leuchtdichten

Ein Überblick über die Steuerdaten für die Flächenleuchten ist im Anhang 9.2 auf Seite 78 zu finden. Welche Einstellungen an den jeweiligen Arbeitsplätzen gewählt wurden, ist aus Tabelle 8 ersichtlich. Danach wurde an 23 Arbeitsplätzen (56 %) Flächenleuchten mit einer mittleren Leuchtdichte von 1500 cd/m², an 8 Arbeitsplätzen (20%) Flächenleuchten mit einer mittleren Leuchtdichte von 1000 cd/m² und an 10 Arbeitsplätzen (24%) Flächenleuchten mit einer mittleren Leuchtdichte von 750 cd/m²

eingesetzt. Die unterschiedlichen Helligkeiten der Flächenleuchte während der Untersuchungszeit können zu unterschiedlichen Wirksamkeiten führen.

Tabelle 8: Überblick über die Einstellung der Flächenleuchte in Versuchssituation S2 und S3

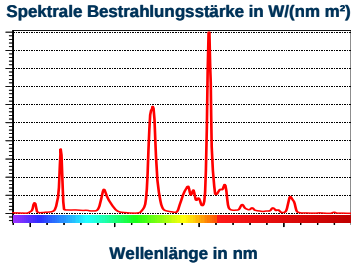
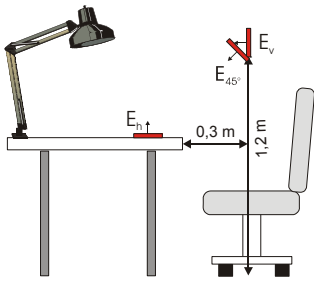
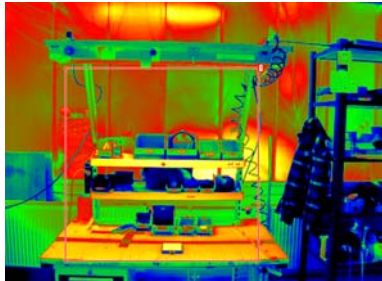
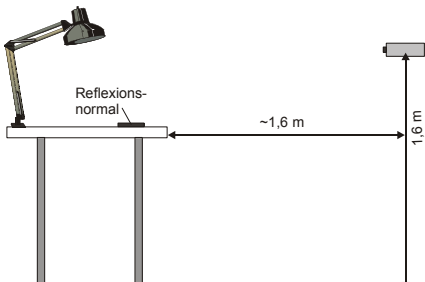
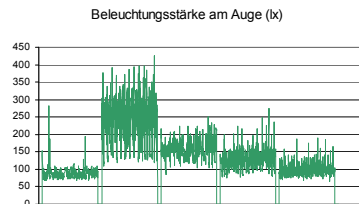
Proband	Fa.	L_{FL}
AP01	MEG I	1500 cd/m ²
AP02	MEG I	1500 cd/m ²
AP03	MEG I	1500 cd/m ²
AP04	MEG I	1500 cd/m ²
AP05	HMW	1000 cd/m ²
AP06	HMW	1000 cd/m ²
AP07	HMW	1000 cd/m ²
AP08	HMW	1000 cd/m ²
AP09	HMW	1000 cd/m ²
AP10	HMW	1000 cd/m ²
AP11	TK-RO	1000 cd/m ²
AP13	TK-RO	1500 cd/m ²
AP14	TK-RO	1500 cd/m ²
AP15	TK-HB	1500 cd/m ²
AP16	TK-HB	1500 cd/m ²
AP17	TK-HB	1500 cd/m ²
AP18	TK-HB	1500 cd/m ²
AP19	TK-HB	1500 cd/m ²
AP20	TK-HB	1500 cd/m ²
AP22	TK-HB	1500 cd/m ²
AP23	FORD-Y	750 cd/m ²
AP24	FORD-Y	750 cd/m ²
AP25	FORD-Y	750 cd/m ²
AP26	FORD-Y	750 cd/m ²
AP27	FORD-Y	750 cd/m ²
AP28	FORD-Y	750 cd/m ²
AP29	FORD-Y	750 cd/m ²
AP30	FORD-Y	750 cd/m ²
AP31	FORD-Y	750 cd/m ²
AP33	FORD-A	1500 cd/m ²
AP34	FORD-A	750 cd/m ²
AP35	MEG II	1500 cd/m ²
AP36	MEG II	1500 cd/m ²
AP37	MEG II	1000 cd/m ²
AP38	MEG II	1500 cd/m ²
AP39	MEG II	1500 cd/m ²
AP40	MEG II	1500 cd/m ²
AP43	ILM	1500 cd/m ²
AP44	ILM	1500 cd/m ²
AP45	ILM	1500 cd/m ²
AP47	ILM	1500 cd/m ²

3.4 Messtechnische Erfassung

Im Rahmen der Studie wurde jede Beleuchtungssituation bezüglich Spektrum, Leuchtdichte- und Farbverteilung sowie exemplarisch während der Arbeit mit dem LuxBlick-Messgerät vermessen. Einen Überblick zu den eingesetzten Verfahren, der verwendeten Messgeometrie und den erfassten Messdaten ist in Tabelle 9 gegeben.

Aus den Messdaten lassen sich die Beleuchtungsverhältnisse in der Arbeitsebene, vertikal in Augenposition, in Augenposition mit einem Blick unter 45° in Richtung der Arbeitsebene für die lichttechnischen und mit der $S_{ms}(\lambda)$ -Funktion bewerteten Größen bestimmen und Aussagen zur Lichtfarbe über die ähnlichste Farbtemperatur gewinnen. Zusätzlich können Größenrelationen bestimmt werden. Die LuxBlick-Messungen liefern Daten zu den tatsächlichen während der Arbeitstätigkeit am Auge herrschenden Beleuchtungsverhältnissen. Diese können dann in Relation zu den anderen Messdaten betrachtet werden.

Tabelle 9: Überblick über die verwendeten Verfahren zur messtechnische Erfassung

Messverfahren/ Messgerät	Messgeometrie	Messwerte
Spektralmessung/ Specbos 1201, Firma Jeti 	 Messhöhe für Steharbeitsplätze: 1,6 m	$L_{\text{Normal}} (E_h), E_v, E_{45^\circ},$ $CCT, a_{ms_v}, E_{ms_h}, E_{ms_v},$ $E_{ms_{45^\circ}}$
Ortsaufgelöste Farbmessung LMK color, Firma TechnoTeam 		Örtlich Verteilung von: $L, L_{ms} \text{ und } a_{ms_v}$
LuxBlick-Messgerät, TU Ilmenau 	Messung am Kopf in Augenposition 	$E_{\text{Auge}}, E_{ms_Auge}, a_{msv_Auge}$ $E_{ms} = \frac{E_c}{k_m}$ $E_c = k_m \cdot \int E_{e\lambda} \cdot S_{ms}(\lambda) d\lambda$

3.5 Befragung

Die inhaltlichen Schwerpunkte der Fragebögen sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Die verwendeten Fragebögen sind im Anhang 1.1 ab Seite 91 zu finden.

Tabelle 10: Inhaltliche Schwerpunkte der im Feldexperiment verwendeten Fragebögen

Fragebogen zur Person

- Geschlecht
- Alter
- Sehhilfe (Brille/ Kontaktlinsen)
- Chronotyp

Allgemeine Angaben

- Schicht und Arbeitstage
- Aufenthalt im Freien
- Fragen zum Befinden

Fragebogen zum Schlafverhalten

- Schlafenszeit
- Ein- und Aufstehzeit
- Schlafdauer
- Einschlafprobleme
- Schlafunterbrechungen
- Schlafqualität
- Schlafmittelkonsum
- Besonderheiten

Fragebogen zur Beleuchtung

- Helligkeit
- Blendung
- Lichtfarbe
- Störempfinden
- Gefallen
- Befinden

Abschlussfragebogen

- Bewertung der einzelnen Versuchsszenarien
- Einfluss der Beleuchtung auf Befinden und Schlaf
- Größtes Wohlbefinden
- Wunschbeleuchtungssituation
- Anmerkungen zum Versuch

Zu Beginn des Feldexperiments wurden die Probanden über die geplante Studie informiert. Dabei wurden die einzelnen Versuchssituationen vorgestellt, auf die durchzuführenden Messungen eingegangen und die Fragebögen im Detail besprochen. Von jedem Probanden wurden allgemeine Angaben erfasst (Fragebogen zur Person). Diese Daten dienen dazu die Datenbasis für die Auswertung zu gruppieren, um Vergleiche beispielsweise bezüglich Alter und Geschlecht vornehmen zu können.

Zum Ende jeder Arbeitswoche wurden die Probanden zum Befinden, Schlafverhalten und zur Bewertung der Beleuchtung befragt (Allgemeine Angaben, Fragebogen zum Schlafverhalten, Fragebogen zur Beleuchtung). Dabei wurden je Befragung 32 Angaben erfasst.

Um einen Überblick über eine vergleichende Bewertung zwischen den Versuchssituationen zu gewinnen und persönliche Meinungen und kritische Anmerkungen zu erfassen, wurde am Ende des Feldexperiments jeder Proband persönlich befragt und ein Abschlussfragebogen ausgefüllt.

3.6 Wetterdaten

Für die Bewertung eines möglichen Einflusses von Tageslicht durch das Freizeitverhalten auf Wohlbefinden und Schlafqualität während der Dauer des Feldexperiments wurden täglich die Wetterdaten für die einzelnen Versuchsstandorte erhoben. Dafür wurde der online-Wetterdienst genutzt. Dabei wurden Höchsttemperatur, Sonnenstunden und Niederschläge erfasst und Jahresdurchschnittstemperaturen und Sonnenscheindauer für den jeweiligen Monat herangezogen. Auf der Basis dieser Daten wurde eine Einschätzung der Wetterbedingungen für die Arbeitswoche (Montag bis Freitag) und für das Wochenende im Mittel bestimmt und auf einen Bereich zwischen 0 (sehr schlecht) bis 1 (sehr schön) abgebildet.

4 Feldexperiment – Versuchsdurchführung

4.1 Probanden

Am Feldexperiment nahmen 41 Probanden im Alter zwischen 21 und 61 Jahren ($\bar{X} 43 \pm 10$ Jahre) teil. Die Zusammensetzung des Probandenkollektivs ist in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Zusammensetzung des Probandenkollektivs

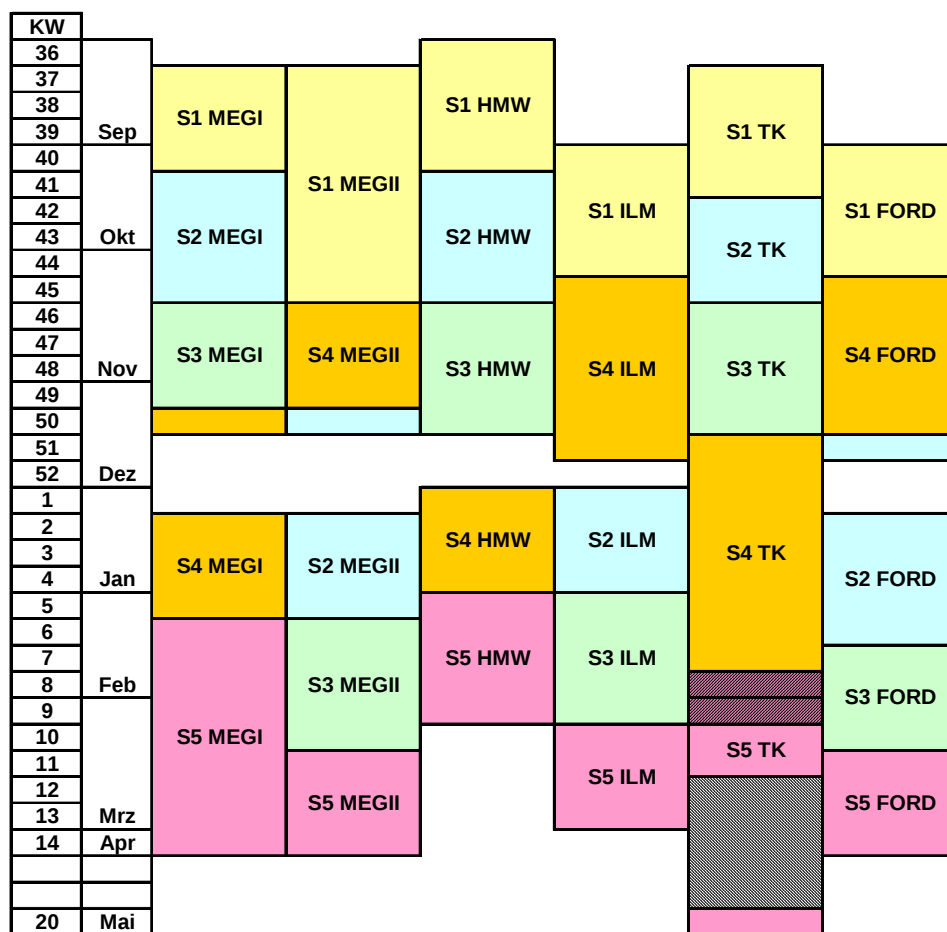
41 Probanden

davon:

Geschlecht	männlich	23
	weiblich	18
Alter	< 45 Jahre	20
	> 45 Jahre	21
Chronotyp	Frühtyp	6
	Normaltyp	15
	Spättyp	20
Schicht	nur Normal-/ Frühschicht	25
	Früh- & Spätschicht	16
Firma	MEG	10
	HMW	6
	TK	10
	FORD	11
	ILM	4
Sehhilfe	Brille/ Kontaktlinsen	12
	keine	29

4.2 Zeitplan

Das Feldexperiment wurde im Zeitraum September 2010 bis April 2011 durchgeführt. An jedem Arbeitsplatz wurden fünf Beleuchtungssituationen von je mindestens vier Wochen Dauer untersucht. Die Reihenfolge der Versuchsszenen S2 bis S4 variiert je nach Einsatzort. Dadurch konnte der Einfluss der Versuchsabfolge und der Materialaufwand für Flächenleuchten, Lampen und Steuereinheiten minimiert werden. Der detaillierte Zeitplan für die Durchführung des Feldexperiments ist in Abbildung 23 dargestellt.



Legende

KW	Kalenderwoche
MEG	MEG Mechanik GmbH
HMW	H. Heinz Messwiderstände GmbH
ILM	IL Metronic Sensortechnik GmbH
TK	ThyssenKrupp Steel Europe AG
FORD	Ford-Werke GmbH

Situation	Allgemeinbeleuchtung	Zusatzbeleuchtung
S1	Ist-Situation	keine
S2	Ist-Situation	FL 8000 K
S3	Ist-Situation	FL 8000 K zu 3000 K dynamisch
S4	8000 K	keine
S5	Ist-Situation	keine

Abbildung 23: Zeitplan des Ablaufs des Feldexperiments

4.3 Datenbasis

4.3.1 Befragung

Während des Feldexperiments wurden insgesamt 749 Fragebögen von 41 Probanden erfasst. Eine Übersicht zur Datenlage zeigt Abbildung 24. Ursachen für nicht vollständige Erfassung der Daten waren, Urlaubs- und Fehlzeiten der Mitarbeiter, nicht absehbare zeitweilige Änderungen der Arbeitsorte und Arbeitsaufgaben und Umstrukturierungen in einzelnen Bereichen. Abschlussfragebögen liegen von 36 Probanden vor.

Proband	Fa.	S1	S2	S3	S4	S5
1 AP01	MEG I	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
2 AP02	MEG I	≥4	≥4	≥4	3	≥4
3 AP03	MEG I	3	≥4	≥4	≥4	≥4
4 AP04	MEG I	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
5 AP05	HMW	≥4	2	≥4	0	2
6 AP06	HMW	3	≥4	≥4	0	≥4
7 AP07	HMW	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
8 AP08	HMW	≥4	≥4	≥4	3	3
9 AP09	HMW	≥4	≥4	≥4	3	3
10 AP10	HMW	≥4	≥4	3	0	≥4
11 AP11	TK-RO	≥4	3	3	≥4	≥4
12 AP13	TK-RO	≥4	2	3	≥4	0
13 AP14	TK-RO	3	≥4	≥4	1	0
14 AP15	TK-HB	≥4	≥4	3	≥4	1
15 AP16	TK-HB	2	3	2	1	1
16 AP17	TK-HB	3	2	1	0	0
17 AP18	TK-HB	≥4	2	1	1	0
18 AP19	TK-HB	≥4	3	1	0	1
19 AP20	TK-HB	2	3	1	0	0
20 AP22	TK-HB	≥4	1	2	2	2
21 AP23	FORD-Y	3	0	0	2	2
22 AP24	FORD-Y	2	≥4	≥4	≥4	≥4
23 AP25	FORD-Y	≥4	3	0	3	2
24 AP26	FORD-Y	≥4	≥4	≥4	0	1
25 AP27	FORD-Y	≥4	1	≥4	≥4	≥4
26 AP28	FORD-Y	1	≥4	≥4	2	2
27 AP29	FORD-Y	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
28 AP30	FORD-Y	3	3	≥4	≥4	≥4
29 AP31	FORD-Y	≥4	≥4	1	1	≥4
30 AP33	FORD-A	2	≥4	3	≥4	2
31 AP34	FORD-A	2	3	≥4	≥4	3
32 AP35	MEG II	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
33 AP36	MEG II	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
34 AP37	MEG II	≥4	≥4	≥4	≥4	2
35 AP38	MEG II	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
36 AP39	MEG II	≥4	3	≥4	3	3
37 AP40	MEG II	≥4	≥4	≥4	3	≥4
38 AP43	ILM	≥4	3	≥4	≥4	≥4
39 AP44	ILM	≥4	≥4	≥4	≥4	3
40 AP45	ILM	≥4	≥4	≥4	≥4	≥4
41 AP47	ILM	≥4	3	≥4	≥4	≥4

Legende

≥4	min. 4 Fragebögen in Untersuchungssituation
3	3 Fragebögen in Untersuchungssituation
2	2 Fragebögen in Untersuchungssituation
1	1 Fragebogen in Untersuchungssituation
0	kein Fragebogen

Überblick Fragebogen

gesamt	S1	S2	S3	S4	S5
749	181	150	145	137	136

Anzahl Probanden

	S1	S2	S3	S4	S5
N	41	40	39	34	36

Abbildung 24: Übersicht zur Datenlage der Fragebogenerfassung während des Feldexperiments

Für die Auswertung bezüglich des Einflusses von Alter, Chronotyp, Geschlecht, Tageslicht, Lichtmenge und Versuchsreihenfolge wurden die Daten gruppiert. Tabelle 12 gibt einen Überblick zur Datenlage der einzelnen Gruppen.

Tabelle 12: Überblick über die Verteilung der Fragebögen nach Kategorien

749 Fragebögen von 41 Probanden

davon:

Geschlecht	männlich	364
	weiblich	385
Alter	< 45 Jahre	344
	≥ 45 Jahre	405
Chronotyp	Frühtyp	109
	Normaltyp	311
	Spättyp	329
Schicht	Normal-/ Frühschicht	656
	Spätschicht	93
Firma	MEG	254
	HMW	113
	TK	113
	FORD	174
	ILM	95
Tageslicht	wenig	387
	viel	362
Lichtmenge	wenig	287
	viel	462
Reihenfolge	1-2-3-4-5	328
	1-4-2-3-5	421

4.3.2 Messung

Da innerhalb der Arbeitsbereiche nur zum Teil ähnliche Beleuchtungsverhältnisse vorlagen, wurden nach Möglichkeit Messungen mit dem Spektralradiometer und der orts aufgelösten Messtechnik an allen Arbeitsplätzen durchgeführt. Nur dort, wo die Tätigkeit der Mitarbeiter nicht unterbrochen werden konnte oder wo ähnliche Bedingungen vorlagen, wurde darauf verzichtet. Messungen mit dem LuxBlick-Messgerät erfolgten nach Möglichkeit an repräsentativen Arbeitsplätzen des jeweiligen Arbeitsbereichs. Standen keine Mitarbeiter für die Messung zur Verfügung, wurden die Tätigkeiten durch eine Testperson simuliert und die Messung auf diese Weise durchgeführt. Tabelle 13 gibt einen Überblick über die durchgeführten Messungen.

Tabelle 13: Überblick über die durchgeführten Messungen

Messung	Specbos				LMK color				LuxBlick			
Szene	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
AP01	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP02	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP03	x	x	x	x	x	x	x	x			x	
AP04	x	x	x	x	x	x	x	x			x	
AP05	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
AP06	x	x	x		x	x	x	x				
AP07	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP08	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP09	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP10	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP11	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	(x)	x
AP13	x		x	x	x		x	x				
AP14	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP15	x	x	x	x	x	x	x	x	(x)	x	(x)	(x)
AP16	x	x	x		x	x	x					
AP17	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP18	x	x	x		x		x					
AP19	x		x	x	x		x	x				
AP20	x		x	x	x			x				
AP21	x		x	x	x			x				
AP22	x	x	x	x	x	x	x	x				
Tisch 1	x	x	x	x	x	x	x	x	(x)	x	x	(x)
Tisch 2	x	x	x	x	x	x	x	x				
Tisch 3	x	x	x	x	x	x	x	x				
Tisch 4	x	x	x	x	x	x	x	x				
Tisch 5	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP33	x	x	x	x	x	x	x	x	(x)	x	x	(x)
AP34	x	x	x	x	x	x	x	x	(x)	x	x	(x)
AP35	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP36	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP37	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP38	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	(x)
AP39	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
AP40	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP43	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
AP44	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP45	x	x	x	x	x	x	x	x				
AP47	x	x	x	x	x	x	x	x				
LAP 1500	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
LAP 1000		x	x	x		x	x		x	x	x	x
LAP 750		x	x	x		x	x		x	x	x	x

Legende

x Messung
(x) Simulation der Tätigkeit

4.3.3 Wetterdaten

Abbildung 25 gibt einen Überblick über die Wetterverhältnisse im Verlaufe der Studie an den unterschiedlichen Standorten und während der verschiedenen Versuchssituationen.

KW		MEGI W WE	MEGII W WE	HMW W WE	ILM W WE	TK W WE	FORD W WE
36							
37							
38		S1		S1		S1	
39	Sep						
40							
41			S1				
42							
43	Okt	S2		S2	S1	S2	S1
44							
45							
46							
47		S3	S4	S3	S4	S3	S4
48	Nov						
49							
50							
51							
52	Dez						
1							
2				S4			
3							
4	Jan	S4	S2	S4	S2	S4	S2
5							
6							
7							
8	Feb		S3	S5	S3		S3
9							
10		S5				S5	
11							
12							
13	Mrz		S5		S5		S5
14	Apr						
20	Mai						

Legende

	sehr schönes Wetter
	Wetter durchwachsen
	sehr schlechtes Wetter

W	während der Woche
WE	am Wochenende
KW	Kalenderwoche

Situation	Allgemein- beleuchtung	Zusatz- beleuchtung
S1	Ist-Situation	keine
S2	Ist-Situation	FL 8000 K
S3	Ist-Situation	FL 8000 K zu 3000 K dynamisch
S4	8000 K	keine
S5	Ist-Situation	keine

Abbildung 25: Überblick über die Wetterverhältnisse während des Feldexperiments

5 Feldexperiment – Ergebnisse

In Abbildung 26 ist das Prinzip der Datenanalyse gezeigt. Der Auswertung liegen 23968 Daten aus 749 Fragebögen von 41 Probanden zugrunde. Die objektiven Daten ergeben sich aus 783 Messungen. In die Auswertung gehen die Wetterdaten über 32 Wochen an 5 Standorten ein. Insgesamt wurden 1141 Tagessätze zu je 163 Wochen- und Wochenendbewertungen zusammengefasst.

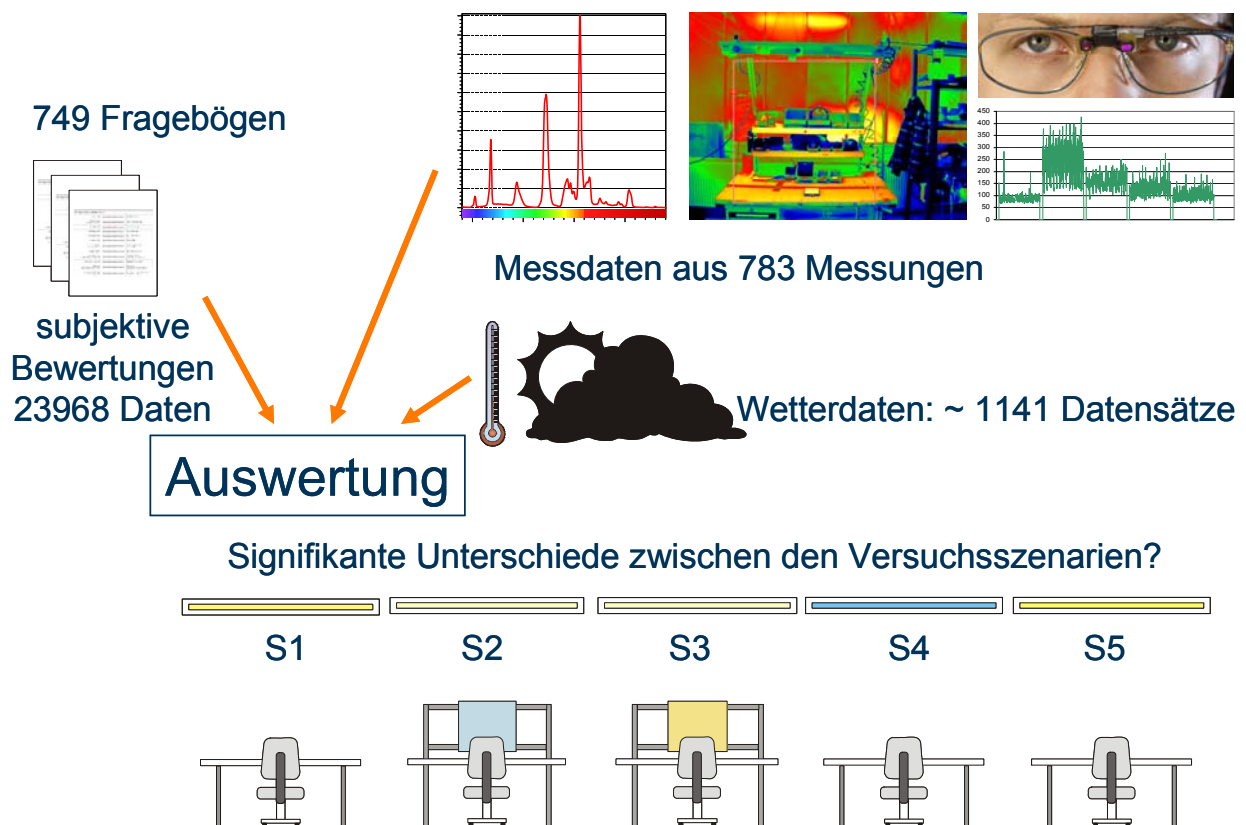


Abbildung 26: Prinzip der Datenauswertung des Feldexperiments

5.1 Lichttechnische und nichtvisuelle Parameter

Tabelle 14 fasst die wesentlichen Messergebnisse für die einzelnen Beleuchtungssituationen zusammen. Sie enthält die horizontale Beleuchtungsstärke E_h , die vertikale Beleuchtungsstärke in Augenhöhe E_v , die Beleuchtungsstärke in Augenhöhe unter einem Blick von 45° zur Arbeitsebene E_{45° sowie die entsprechenden mit der $s_{ms}(\lambda)$ -Funktion bewerteten Bestrahlungsstärken E_{ms} . Zusätzlich sind die Verhältnisse der Größen zueinander angegeben, die Rückschlüsse auf die Lichtverteilung im Arbeitsbereich zulassen. Die Tabelle enthält mit der ähnlichsten Farbtemperatur CCT auch Angaben zur Lichtfarbe in der Arbeitsebene. Der a_{msv} -Wert ist der biologische Wirkfaktor berechnet nach Gleichung (3). Er korreliert mit der Lichtfarbe. In Abbildung 27 bis Abbildung 32 sind die Messergebnisse mit Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung für alle Untersuchungssituationen grafisch dargestellt. Neben den Diagrammen ist das Verhältnis bezogen auf die Ausgangssituation S1 für den jeweiligen Parameter angegeben über das sich die Veränderung durch die jeweilige Beleuchtungssituationen beschreiben lässt.

Tabelle 14: Messdaten (Mittelwert und Standardabweichung) für die einzelnen Untersuchungssituationen

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_h in lx	1006 +/- 570	1118 +/- 551	1118 +/- 551	1041 +/- 561	1142 +/- 584	1090 +/- 475
E_v in lx	360 +/- 298	551 +/- 309	551 +/- 309	492 +/- 295	404 +/- 318	395 +/- 277
E_{45° in lx	129 +/- 71	218 +/- 88	218 +/- 88	205 +/- 90	152 +/- 76	137 +/- 60
E_v/E_h	0,36	0,49	0,49	0,47	0,35	0,36
E_{45°/E_v	0,36	0,40	0,40	0,42	0,38	0,35
E_{45°/E_h	0,13	0,20	0,20	0,20	0,13	0,13

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
CCT in K	4006 +/- 504	4207 +/- 507	4207 +/- 507	3898 +/- 438	6322 +/- 465	4002 +/- 494

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
$a_{msv\ 45^\circ}$	0,45 +/- 0,08	0,65 +/- 0,09	0,65 +/- 0,09	0,39 +/- 0,06	0,74 +/- 0,10	0,45 +/- 0,08

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
$E_{ms\ h}$ in W/m ²	0,76 +/- 0,48	0,86 +/- 0,43	0,86 +/- 0,43	0,71 +/- 0,44	1,37 +/- 0,77	0,82 +/- 0,42
$E_{ms\ v}$ in W/m ²	0,26 +/- 0,22	0,53 +/- 0,27	0,53 +/- 0,27	0,30 +/- 0,21	0,49 +/- 0,41	0,28 +/- 0,20
$E_{ms\ 45^\circ}$ in W/m ²	0,09 +/- 0,05	0,19 +/- 0,10	0,19 +/- 0,10	0,12 +/- 0,06	0,16 +/- 0,09	0,09 +/- 0,04
$E_{ms\ 45^\circ}/E_{ms\ v}$	0,34	0,36	0,36	0,40	0,32	0,32
$E_{ms\ v}/E_{ms\ h}$	0,34	0,62	0,62	0,42	0,36	0,35
$E_{ms\ 45^\circ}/E_{ms\ h}$	0,11	0,22	0,22	0,16	0,11	0,11

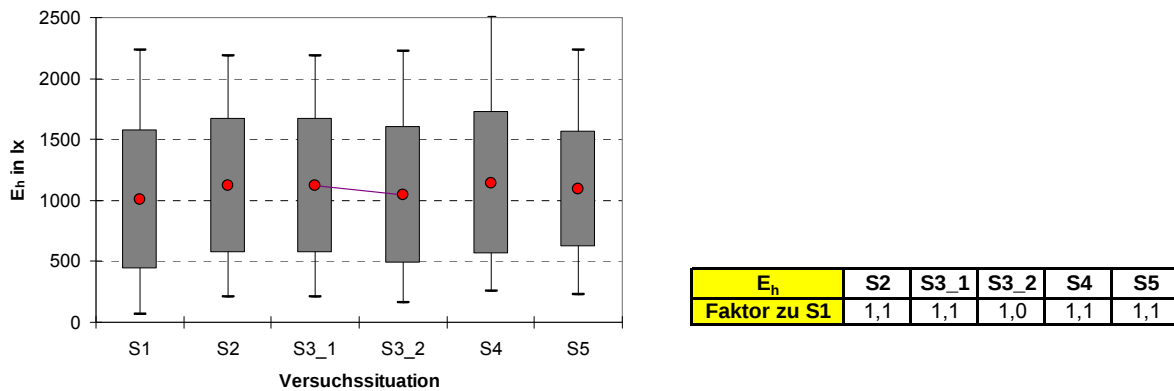


Abbildung 27: Messdaten für die horizontale Beleuchtungsstärke E_h auf der Arbeitsfläche gemessen, Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung gemäß der Datenlage nach Tabelle 13, S3_1 entspricht der Beleuchtung zu Schichtbeginn, S3_2 der Beleuchtung zu Schichtende

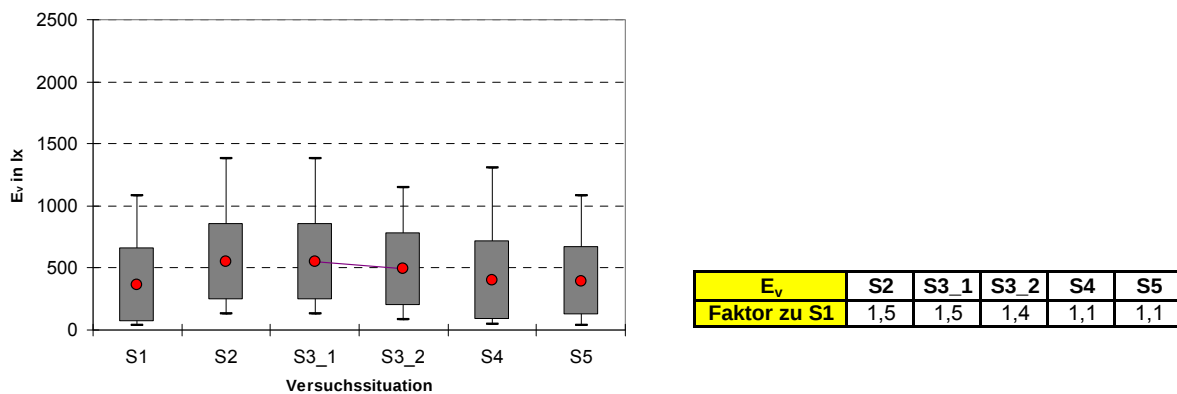


Abbildung 28: Messdaten für die vertikale Beleuchtungsstärke E_v in Augenhöhe gemessen, Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung gemäß der Datenlage nach Tabelle 13, S3_1 entspricht der Beleuchtung zu Schichtbeginn, S3_2 der Beleuchtung zu Schichtende

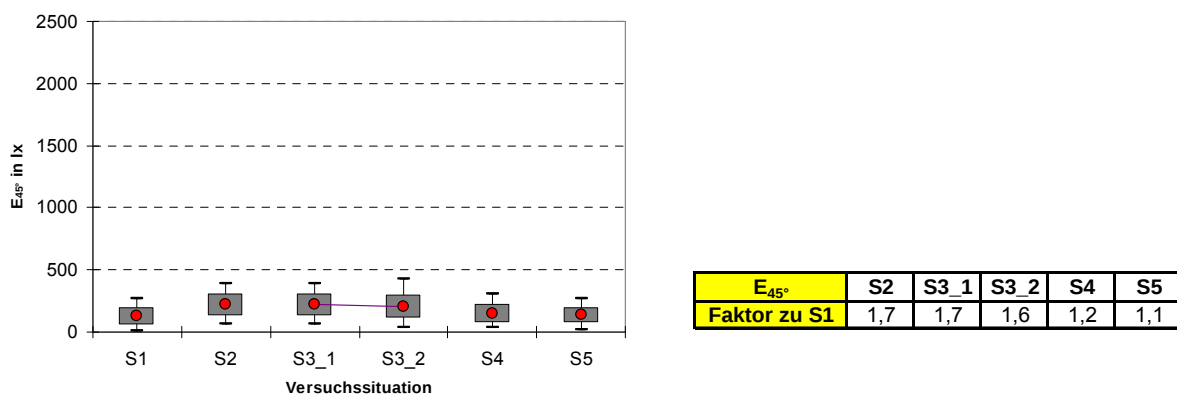


Abbildung 29: Messdaten für die Beleuchtungsstärke E_{45° in Augenhöhe gemessen mit Blick unter 45° auf die Arbeitsfläche, Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung gemäß der Datenlage nach Tabelle 13, S3_1 entspricht der Beleuchtung zu Schichtbeginn, S3_2 der Beleuchtung zu Schichtende

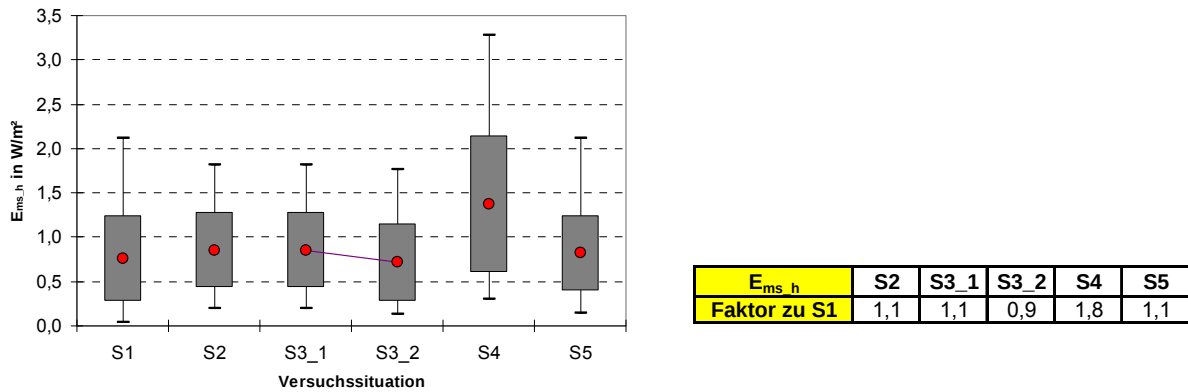


Abbildung 30: Messdaten für die horizontale mit der $S_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewertete Bestrahlungsstärke E_{ms_h} auf der Arbeitsfläche gemessen, Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung gemäß der Datenlage nach Tabelle 13, S3_1 entspricht der Beleuchtung zu Schichtbeginn, S3_2 der Beleuchtung zu Schichtende

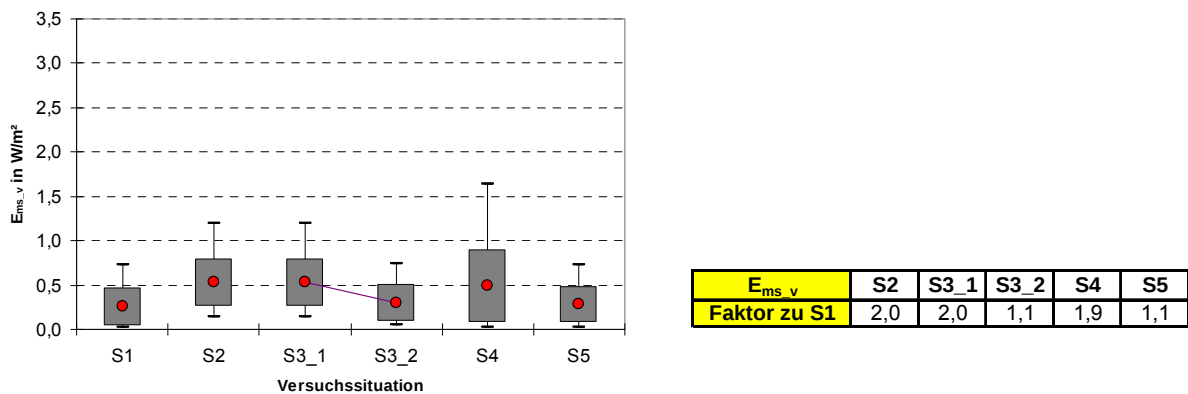


Abbildung 31: Messdaten für die vertikale mit der $S_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewertete Bestrahlungsstärke E_{ms_v} in Augenhöhe gemessen, Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung gemäß der Datenlage nach Tabelle 13, S3_1 entspricht der Beleuchtung zu Schichtbeginn, S3_2 der Beleuchtung zu Schichtende

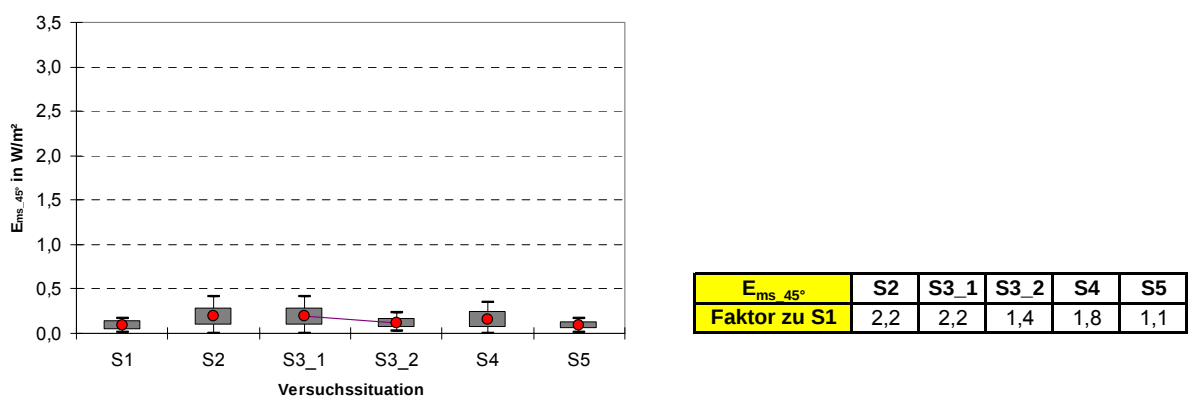


Abbildung 32: Messdaten für die mit der $S_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewertete Bestrahlungsstärke $E_{ms_45^\circ}$ gemessen in Augenhöhe mit Blick unter 45° auf die Arbeitsfläche, Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung gemäß der Datenlage nach Tabelle 13, S3_1 entspricht der Beleuchtung zu Schichtbeginn, S3_2 der Beleuchtung zu Schichtende

Wird die horizontale Beleuchtungsstärke E_h betrachtet, ist eine große Streuung der Messwerte zwischen den Arbeitsplätzen zu erkennen. Für die Ausgangssituation S1 liegen die Messwerte zwischen 65 lx (Ford-Y) und 2236 lx (ILM). Im Mittel wurden über alle Arbeitsplätze 1006 lx mit einer Standardabweichung von 570 lx bestimmt. Damit ist der unmittelbare Arbeitsbereich mehrheitlich bezüglich der visuellen Anforderungen ausreichend beleuchtet. Je nach Sehanforderungen werden nach DIN EN 12464 Teil 1 für Industriearbeitsplätze Beleuchtungsstärken zwischen 300 lx bis 1000 lx gefordert, in Ausnahmefällen für Arbeitsplätze mit hohen visuellen Anforderungen bis zu 1500 lx ³². Die großen Unterschiede an den Arbeitsplätzen ergeben sich durch die von den Mitarbeitern außer Betrieb genommene Allgemeinbeleuchtung im Arbeitsbereich der Halle Y der Ford-Werke, was zu niedrigen Beleuchtungsniveaus führt, da in diesem Arbeitsbereich keine arbeitsplatzbezogene Beleuchtung vorhanden ist. Die hohen Beleuchtungsstärken am AP44 (ILM) kommen durch die neben der Allgemeinbeleuchtung zusätzlich benutzte Tischleuchte zustande, die den Arbeitsplatz im unmittelbaren Sehbereich zusätzlich aufhellt. Aus dem Diagramm geht auch hervor, dass sich die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich zwischen den einzelnen Versuchsszenarien kaum unterscheidet. Das Verhältnis der mittleren horizontalen Beleuchtungsstärken im Vergleich zur Situation S1 liegt bei Werten von 1,0 bis 1,1. Die geringfügig höheren mittleren Werte für die Situation S4 ergeben sich daraus, dass beim Lampenwechsel neuwertige Lampen verwendet wurden, die trotz gleicher Leistung im Vergleich zu S1 die altersbedingte Lichtstromabnahme noch nicht verzeichnen. Die Unterschiede zwischen den Situationen S1 und S5 ergeben sich dadurch, dass die Lampen der Allgemeinbeleuchtung im Bereich Halle Y in den Ford-Werken während der Situation S5 von den Mitarbeitern wie teilweise in S1 nicht wieder außer Betrieb genommen wurden, und dass für diese Situation im Bereich Hamborn (TK-HB) nicht die Originallampen zurück gebaut wurden, sondern neue Lampen zum Einsatz kamen.

Abbildung 28 zeigt die Messwerte für die vertikale Beleuchtungsstärke E_v , die jeweils aus Augenposition (Steharbeitsplätze: Messhöhe 1,6 m, Sitzarbeitsplätze: Messhöhe 1,2 m) gemessen wurde. Deutlich zu erkennen sind die höheren Werte während der Versuchssituationen S2 und S3 durch die Flächenleuchte im Vorfeld. Demnach

³² DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. DIN EN 12464 Teil 1, Berlin: Beuth Verlag, August 2011

konnten durch die zusätzliche Beleuchtung im Vorfeld oder seitlich eine im Mittel um den Faktor 1,5 höhere vertikale Beleuchtungsstärken erzeugt werden.

Die Beleuchtungsstärken E_{45° , die aus Augenhöhe mit einem Blick unter 45° auf die Arbeitsfläche gemessen wurden, sind in Abbildung 29 dargestellt. Hier zeigen sich durch den Einsatz der Flächenleuchten für die Situationen S2 und S3 im Vergleich zur Situation S1 um den Faktor von 1,6 bis 1,7 höhere Werte. Zu erwarten ist daher, dass sich infolge der höheren Beleuchtungsstärken am Auge der Probanden Auswirkungen auf Wohlbefinden und Schlafqualität während der Situationen S2 und S3 ergeben.

Abbildung 30 bis Abbildung 32 zeigen die Messdaten für die mit der $S_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewertete Bestrahlungsstärken für die einzelnen Messorte. Für die Versuchsszenen S1 bis S3 und S5 sind die horizontalen mit der $S_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewertete Bestrahlungsstärken E_{ms_h} ähnlich. Der Austausch der Lampen in Szene S4 führt im Vergleich zur Szene S1 zu 1,8 höheren Werten. Bezüglich der vertikalen mit der $S_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewertete Bestrahlungsstärke E_{ms_v} zeigt sich eine Erhöhung für die Szenen S2 bis S4 um den Faktor 2 im Vergleich zur Szene S1. Die Wirkung der Flächenleuchten wird besonders für die mit der $S_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewertete Bestrahlungsstärken in Augenhöhe mit Blick unter 45° auf die Arbeitsfläche E_{ms_45} deutlich. Danach ist für die Beleuchtungsszene S2 eine größere Wirksamkeit im Vergleich zu S4 zu erwarten. Die Szene S3_2 zeigt im Vergleich zur Szene S3_1 deutlich geringere Werte. Hier wird die reduzierende aktivierende Lichtwirkung durch den Wechsel zu wärmeren Lichtfarben erkennbar. Aufgrund der zusätzlichen Beleuchtung im Vorfeld erhöht sich jedoch der Wert für die Szene S3_2 im Vergleich zur Ausgangssituation S1.

Entsprechend der mittleren ähnlichsten Farbtemperatur CCT nach Tabelle 14 werden an den meisten Arbeitsplätzen Lampen mit neutralweißen Lichtfarben eingesetzt, seltener wurden warmweiße oder tageslichtweiße Leuchtstofflampen an den Arbeitsplätzen vorgefunden. Flächenleuchten mit einer Lichtfarbe von einer ähnlichsten Farbtemperatur von 8000 K erhöhen im Mittel die ähnlichste Farbtemperatur in der Arbeitsebene um 200 K und den $a_{msv_45^\circ}$ -Werte von 0,45 für S1 auf 0,65 für S2 bei einem Blick unter einem Winkel von 45° auf die Arbeitsebene gerichtet. Werden Lampen mit hoher ähnlichster Farbtemperatur eingesetzt, zeigt sich ein deutlicher Anstieg von ähnlichster Farbtemperatur und $a_{ms_45^\circ}$ -Werten. Entsprechend sind hier höhere biologische Wirksamkeiten zu erwarten.

5.1.1 Vergleich zur Voruntersuchung

Tabelle 15 fasst die Messdaten an den Arbeitsplätzen des Feldexperiments und der Vorversuche zusammen.

Tabelle 15: Messdaten im Vergleich: Mittelwerte der Messungen an den Versuchsarbeitsplätzen und Messungen der Vorversuche

Vorversuche (Mittelwerte)

Situation	E_h in lx	E_v in lx	E_{Auge} in lx	E_v/E_h	E_{Auge}/E_h	E_{Auge}/E_v
Allg.-B.	520	317	92,2	0,61	0,18	0,29
FL unten	498	450	191,37	0,90	0,38	0,43
FL rechts+links	523	481	211,51	0,92	0,40	0,44

Feldexperiment (Mittelwerte)

Situation	E_h in lx	E_v in lx	E_{45° in lx	E_v/E_h	E_{45°/E_h	E_{45°/E_v
S1	1006	360	129	0,36	0,13	0,36
S2	1118	551	218	0,49	0,20	0,40
S3_1	1118	551	218	0,49	0,20	0,40
S3_2	1041	492	205	0,47	0,20	0,42
S4	1142	404	152	0,35	0,13	0,38
S5	1090	395	137	0,36	0,13	0,35

Vorversuche (Mittelwerte) CCT = 4000 K

Situation	$E_{ms\ h}$ in W/m ²	$E_{ms\ v}$ in W/m ²	$E_{ms\ Auge}$ in W/m ²	$E_{ms\ v}/E_{ms\ h}$	$E_{ms\ Auge}/E_{ms\ h}$	$E_{ms\ Auge}/E_{ms\ v}$
Allg.-B.	0,40	0,24	0,07	0,61	0,18	0,29
FL unten	0,38	0,34	0,15	0,90	0,38	0,43
FL rechts+links	0,40	0,37	0,16	0,92	0,40	0,44

gerechnet	CCT = 3000 K			CCT = 8000 K		
Situation	$E_{ms\ h}$ in W/m ²	$E_{ms\ v}$ in W/m ²	$E_{ms\ Auge}$ in W/m ²	$E_{ms\ h}$ in W/m ²	$E_{ms\ v}$ in W/m ²	$E_{ms\ Auge}$ in W/m ²
Allg.-B.	0,26	0,16	0,05	0,75	0,45	0,13
FL unten	0,25	0,22	0,10	0,71	0,65	0,27
FL rechts+links	0,26	0,24	0,11	0,75	0,69	0,30

Feldexperiment (Mittelwerte)

Situation	$E_{ms\ h}$ in W/m ²	$E_{ms\ v}$ in W/m ²	$E_{ms\ 45^\circ}$ in W/m ²	$E_{ms\ v}/E_{ms\ h}$	$E_{ms\ 45^\circ}/E_{ms\ h}$	$E_{ms\ 45^\circ}/E_{ms\ v}$
S1	0,76	0,26	0,09	0,34	0,11	0,34
S2	0,86	0,53	0,19	0,62	0,22	0,36
S3_1	0,86	0,53	0,19	0,62	0,22	0,36
S3_2	0,71	0,30	0,12	0,42	0,16	0,40
S4	1,37	0,49	0,16	0,36	0,11	0,32
S5	0,82	0,28	0,09	0,34	0,11	0,32

Der Vergleich zeigt, dass sich die horizontalen Beleuchtungsstärken für die einzelnen Untersuchungssituationen etwa um den Faktor 2 unterscheiden, während die vertikalen Beleuchtungsstärken ähnlich sind. In den Voruntersuchungen wurde die horizontale Beleuchtungsstärke konstant gehalten, sodass sich durch den Einsatz der Flächenleuchte die vertikale Lichtkomponente im Vorversuch deutlich mehr Gewicht erhielt als während des Feldexperiments. Im Feldexperiment wurden die Flächenleuchten zusätzlich zur bestehenden Beleuchtungsanlage eingesetzt. Die hohe vertikale Beleuchtungsstärke im Vorversuch im Verhältnis zur horizontalen Beleuchtungsstärke resultiert auch durch die helle Reflexionsfläche der Flächenleuchte im Vorfeld. In realen Situationen ist das Vorfeld der Arbeitsplätze deutlich dunkler. Ähnliches zeigt sich bezüglich der mit der $s_{ms}(\lambda)$ -Kurve bewerteten Bestrahlungsstärken.

Bei ähnlichen vertikalen Beleuchtungsstärken sind die Größenordnungen von der im Vorversuch gemessenen Beleuchtungsstärke am Auge und der im Feldexperiment in Augenhöhe unter einem Blickwinkel von 45° gemessenen Beleuchtungsstärken ähnlich. Die unter 45° gemessene Beleuchtungsstärke kommt damit den Verhältnissen am Beobachteraue näher als die vertikale Beleuchtungsstärke.

5.1.2 Vergleich zur Laboruntersuchung

Für die Abschätzung des Einflusses der Dimmung der Flächenleuchten wurden für verschiedene Einstellungen [$L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$ (LAP_100%), $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$ (LAP_67%) und $L_{FL} = 750 \text{ cd/m}^2$ (LAP_50%)] bei konstanter Allgemeinbeleuchtung in ähnlicher Anordnung wie im Feldexperiment gemessen. In Abbildung 33 wird der Laborarbeitsplatz für die Beleuchtungsszenarien Allgemeinbeleuchtung und zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld gezeigt. Die Messdaten sind in Tabelle 16 zusammengefasst.



Abbildung 33: Laborarbeitsplatz links bei Allgemeinbeleuchtung (S1, S4), rechts bei Allgemeinbeleuchtung mit Flächenleuchte im Vorfeld (S2, S3)

Tabelle 16: Messdaten im Vergleich: Mittelwerte +/- Standardabweichung der Messungen an den Versuchsarbeitsplätzen und am Laborarbeitsplatz für verschiedene Einstellungen der Flächenleuchte

Situation	Messungen Specbos				Faktor zu S1			
E_n in lx	MW AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%	AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%
S1	1006 +/- 570	622	622	622	1,0	1,0	1,0	1,0
S2	1118 +/- 551	773	728	696	1,1	1,2	1,2	1,1
S3_1	1118 +/- 551	773	728	696	1,1	1,2	1,2	1,1
S3_2	1041 +/- 561	766	718	692	1,0	1,2	1,2	1,1
S4	1142 +/- 584	616	616	616	1,1	1,0	1,0	1,0
S5	1090 +/- 475	622	622	622	1,1	1,0	1,0	1,0
E_v in lx	MW AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%	AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%
S1	360 +/- 298	256	256	256	1,0	1,0	1,0	1,0
S2	551 +/- 309	567	479	444	1,5	2,2	1,9	1,7
S3_1	551 +/- 309	567	479	444	1,5	2,2	1,9	1,7
S3_2	492 +/- 295	570	452	394	1,4	2,2	1,8	1,5
S4	404 +/- 318	242	242	242	1,1	0,9	0,9	0,9
S5	395 +/- 277	256	256	256	1,1	1,0	1,0	1,0
E_{45° in lx	MW AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%	AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%
S1	129 +/- 71	122	122	122	1,0	1,0	1,0	1,0
S2	218 +/- 88	293	250	215	1,7	2,4	2,0	1,8
S3_1	218 +/- 88	293	250	215	1,7	2,4	2,0	1,8
S3_2	205 +/- 90	297	241	202	1,6	2,4	2,0	1,7
S4	152 +/- 76	118	118	118	1,2	1,0	1,0	1,0
S5	137 +/- 60	122	122	122	1,1	1,0	1,0	1,0

Situation	Messungen Specbos				Faktor zu S1			
E_{ms_h} in lx	MW AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%	AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%
S1	0,76 +/- 0,48	0,46	0,46	0,46	1,0	1,0	1,0	1,0
S2	0,86 +/- 0,43	0,67	0,60	0,56	1,1	1,5	1,3	1,2
S3_1	0,86 +/- 0,43	0,67	0,60	0,56	1,1	1,5	1,3	1,2
S3_2	0,71 +/- 0,44	0,52	0,50	0,50	0,9	1,1	1,1	1,1
S4	1,37 +/- 0,77	0,81	0,81	0,81	1,8	1,8	1,8	1,8
S5	0,82 +/- 0,42	0,46	0,46	0,46	1,1	1,0	1,0	1,0
E_{ms_v} in lx	MW AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%	AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%
S1	0,26 +/- 0,22	0,19	0,19	0,19	1,0	1,0	1,0	1,0
S2	0,53 +/- 0,27	0,63	0,50	0,44	2,0	3,3	2,7	2,3
S3_1	0,53 +/- 0,27	0,63	0,50	0,44	2,0	3,3	2,7	2,3
S3_2	0,30 +/- 0,21	0,34	0,28	0,26	1,1	1,8	1,5	1,4
S4	0,49 +/- 0,41	0,31	0,31	0,31	1,9	1,7	1,7	1,7
S5	0,28 +/- 0,20	0,19	0,19	0,19	1,1	1,0	1,0	1,0
$E_{ms_{45^\circ}}$ in lx	MW AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%	AP01-AP47	LAP_100%	LAP_67%	LAP_50%
S1	0,09 +/- 0,05	0,09	0,09	0,09	1,0	1,0	1,0	1,0
S2	0,19 +/- 0,10	0,33	0,26	0,22	2,2	3,8	3,0	2,5
S3_1	0,19 +/- 0,10	0,33	0,26	0,22	2,2	3,8	3,0	2,5
S3_2	0,12 +/- 0,06	0,17	0,14	0,13	1,4	2,0	1,7	1,5
S4	0,16 +/- 0,09	0,15	0,15	0,15	1,8	1,7	1,7	1,7
S5	0,09 +/- 0,04	0,09	0,09	0,09	1,1	1,0	1,0	1,0

Werden die Messdaten, die an den Arbeitsplätzen erfasst wurden, mit denen aus den Labormessungen verglichen, fällt auf, dass die Relationen der Messdaten im Vergleich zu denen der Szenen S1 am besten denen der Flächenleuchte bei einer mittleren Leuchtedichte von 750 cd/m^2 (LAP_50%) entsprechen. Es ist zu vermuten, dass der Einfluss von Arbeitsmitteln, Material, Magazinen und Variationen im Umfeld sich reduzierend auf die Wirkung der Flächenleuchte beim Praxiseinsatz auswirken können. Dies wird durch den Vergleich der Relationen der Messgrößen zueinander innerhalb einer Beleuchtungssituation bestätigt (Tabelle 17 und Tabelle 15). Auch hier ergibt sich, dass an den realen Plätzen die vertikalen Komponenten und damit

auch das am Auge wirksame Licht geringer sind als am Laborarbeitsplatz bei gleicher Helligkeit der Flächenleuchte.

Tabelle 17: Verhältnisrelationen der Messungen am Laborarbeitsplatz für verschiedene Einstellungen der Flächenleuchte

Situation	E_v/E_h	E_{45°/E_h	E_{45°/E_v	E_{Auge}/E_h	E_{Auge}/E_v	$E_{\text{Auge}}/E_{45^\circ}$	LAP100%
S1	0,41	0,20	0,48	0,13	0,31	0,65	
S2	0,73	0,38	0,52	0,46	0,62	1,20	
S3_1	0,73	0,38	0,52	0,46	0,62	1,20	
S3_2	0,74	0,39	0,52	0,44	0,59	1,13	
S4	0,39	0,19	0,49	0,18	0,46	0,94	
S5	0,41	0,20	0,48	0,13	0,31	0,65	
Situation	E_v/E_h	E_{45°/E_h	E_{45°/E_v	E_{Auge}/E_h	E_{Auge}/E_v	$E_{\text{Auge}}/E_{45^\circ}$	LAP67%
S1	0,41	0,20	0,48	0,13	0,31	0,65	
S2	0,66	0,34	0,52	0,39	0,59	1,13	
S3_1	0,66	0,34	0,52	0,39	0,59	1,13	
S3_2	0,63	0,34	0,53	0,36	0,57	1,06	
S4	0,39	0,19	0,49	0,18	0,46	0,94	
S5	0,41	0,20	0,48	0,13	0,31	0,65	
Situation	E_v/E_h	E_{45°/E_h	E_{45°/E_v	E_{Auge}/E_h	E_{Auge}/E_v	$E_{\text{Auge}}/E_{45^\circ}$	LAP50%
S1	0,41	0,20	0,48	0,13	0,31	0,65	
S2	0,64	0,31	0,48	0,32	0,50	1,03	
S3_1	0,64	0,31	0,48	0,32	0,50	1,03	
S3_2	0,57	0,29	0,51	0,30	0,54	1,04	
S4	0,39	0,19	0,49	0,18	0,46	0,94	
S5	0,41	0,20	0,48	0,13	0,31	0,65	

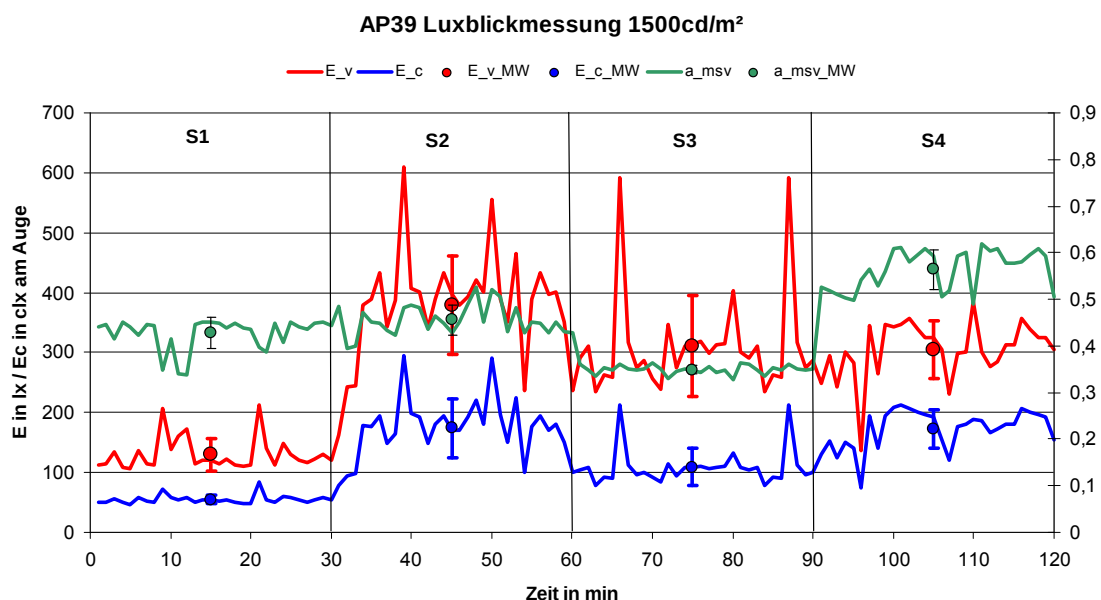
Situation	$E_{\text{ms } v}/E_{\text{ms } h}$	$E_{\text{ms } 45^\circ}/E_{\text{ms } h}$	$E_{\text{ms } 45^\circ}/E_{\text{ms } v}$	$E_{\text{ms } \text{Auge}}/E_{\text{ms } h}$	$E_{\text{ms } \text{Auge}}/E_{\text{ms } v}$	$E_{\text{ms } \text{Auge}}/E_{\text{ms } 45^\circ}$	LAP100%
S1	0,41	0,19	0,45	0,09	0,21	0,46	
S2	0,95	0,49	0,51	0,35	0,36	0,71	
S3_1	0,95	0,49	0,51	0,35	0,36	0,71	
S3_2	0,65	0,32	0,50	0,25	0,38	0,77	
S4	0,39	0,18	0,46	0,11	0,29	0,62	
S5	0,41	0,19	0,45	0,09	0,21	0,46	
Situation	E_v/E_h	E_{45°/E_h	E_{45°/E_v	E_{Auge}/E_h	E_{Auge}/E_v	$E_{\text{Auge}}/E_{45^\circ}$	LAP67%
S1	0,41	0,19	0,45	0,09	0,21	0,46	
S2	0,84	0,44	0,52	0,32	0,38	0,73	
S3_1	0,84	0,44	0,52	0,32	0,38	0,73	
S3_2	0,56	0,29	0,51	0,20	0,36	0,70	
S4	0,39	0,18	0,46	0,11	0,29	0,62	
S5	0,41	0,19	0,45	0,09	0,21	0,46	
Situation	E_v/E_h	E_{45°/E_h	E_{45°/E_v	E_{Auge}/E_h	E_{Auge}/E_v	$E_{\text{Auge}}/E_{45^\circ}$	LAP50%
S1	0,41	0,19	0,45	0,09	0,21	0,46	
S2	0,79	0,39	0,49	0,27	0,34	0,69	
S3_1	0,79	0,39	0,49	0,27	0,34	0,69	
S3_2	0,52	0,26	0,49	0,18	0,35	0,70	
S4	0,39	0,18	0,46	0,11	0,29	0,62	
S5	0,41	0,19	0,45	0,09	0,21	0,46	

Nach Tabelle 17 zeigt der Vergleich der LuxBlick-Messungen mit den Messungen unter 45° für die Laboruntersuchung bezüglich der Beleuchtungsstärke Relationen zwischen 65% bis 94% für die Beleuchtungssituation mit Allgemeinbeleuchtung. Werden Flächenleuchten im Vorfeld eingesetzt, variieren je nach Leuchtdichte der Flächenleuchte die Relationen zwischen 1,03 und 1,2. Für die mit der $s_{\text{ms}}(\lambda)$ -Kurve bewerteten Bestrahlungsstärken liegen die Relationen zwischen 0,46 und 0,73. Die Ergebnisse der Messung am Auge sind geringer als diejenigen, die unter einem Blickwinkel

von 45° gemessen wurden. Details zur LuxBlick-Messung am Laborarbeitsplatz sind im Anhang 9.5.1 ab Seite 97 zu finden.

5.1.3 LuxBlick-Messung

Die LuxBlick-Messungen wurden während der Feldstudie nur an ausgewählten Arbeitsplätzen durchgeführt. Abbildung 34 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Messung am Arbeitsplatz AP39 (MEG). Tabelle 18 fasst die Mittelwerte für die einzelnen Beleuchtungsszenen zusammen und gibt Relationen der Größen zueinander an. Diese sind ähnlich zu den Ergebnissen der Labormessungen bei gleicher Helligkeit der Flächenleuchte. Bei diesem Arbeitsplatz waren auch die Verhältnisse ähnlich zu denen des Laborarbeitsplatzes.



AP39	S1	S2	S3	S4
E_{Auge} in lx (MW)	129,8	378,5	311,4	304,9
E_{Auge} in lx (STABW)	26,6	82,2	84,6	47,9
Messdauer in min	30	30	30	30
$E_{\text{ms_Auge}}$ in W/m² (MW)	0,08	0,25	0,16	0,25
$E_{\text{ms_Auge}}$ in W/m² (STABW)	0,01	0,07	0,04	0,05
Messdauer in min	30	30	30	30
$a_{\text{ms_Auge}}$ (MW)	0,43	0,46	0,35	0,56
$a_{\text{ms_Auge}}$ (STABW)	0,03	0,03	0,01	0,04
Messdauer in min	30	30	30	30

Abbildung 34: LuxBlick-Messung über jeweils 30 Minuten am Arbeitsplatz AP39 (MEG) während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen

Tabelle 18: Mittelwerte der Spechbos- und LuxBlick-Messungen am Arbeitsplatz AP39

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5	
E_{45° in lx	197	317	317	331	305	197	
$E_{ms\ 45^\circ}$ in W/m ²	0,15	0,30	0,30	0,24	0,35	0,15	
$a_{ms\ 45^\circ}$	0,51	0,64	0,64	0,49	0,79	0,51	
E_{Auge} in lx	130	380	380	311	305	130	
$E_{ms\ Auge}$ in W/m ²	0,08	0,25	0,25	0,16	0,25	0,08	
$a_{ms\ Auge}$	0,43	0,46	0,46	0,35	0,56	0,43	
E_{Auge}/E_{45°	0,66	1,20	1,20	0,94	1,00	0,66	Spechbos
$E_{ms\ Auge}/E_{ms\ 45^\circ}$	0,54	0,83	0,83	0,67	0,72	0,54	LuxBlick

Insgesamt konnten Messungen an sechs Arbeitsplätzen ausgewertet werden. Dabei zeigten sich große Unterschiede. Tabelle 19 gibt den Bereich der Mittelwerte für die einzelnen Messgrößen an. Die Diagramme der Messungen sind im Anhang 9.5.2 ab Seite 100 gezeigt.

Tabelle 19: Bereich der Mittelwerte der LuxBlick-Messungen

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4
E_{Auge} in lx	22 - 200	108 - 380	108 - 380	102 - 311	71 - 305
$E_{ms\ Auge}$ in W/m ²	0,01 - 0,08	0,07 - 0,26	0,07 - 0,26	0,05 - 0,16	0,04 - 0,25
$a_{ms\ Auge}$	0,29 - 0,43	0,30 - 0,52	0,30 - 0,52	0,27 - 0,36	0,44 - 0,58

In Nachtstudien wurde mit Beleuchtungsstärken von etwa 100 lx am Auge eine signifikant höhere subjektive Munterkeit nachgewiesen³³. Angaben zu Beleuchtungsstärken für eine aktivierende Wirkung von Licht am Tage sind bisher nicht bekannt. Werden die Angaben für die Nachtwirkung von Licht zugrunde gelegt, deuten die gemessenen Werte an ausgewählten Arbeitsplätzen darauf hin, dass an einzelnen Arbeitsplätzen die Beleuchtungsverhältnisse nicht ausreichend sein können und dass diese Beschäftigten von zusätzlicher Beleuchtung profitieren könnten. Ist das Beleuchtungsniveau jedoch in der Ausgangssituation bereits ausreichend, ist nicht zu erwarten, dass sich durch zusätzliche Beleuchtung signifikante Verbesserungen beobachten lassen.

³³ CAJOCHEN C: Alerting effects of light. Sleep Medicine Reviews 2007; 11 (6): 453-464

5.2 Abschlussbefragung

An der Abschlussbefragung nahmen 36 Probanden teil. Von diesen gaben sechs Probanden (17%) an, dass sie bewusst einen Einfluss der Lichtqualität auf ihr Wohlbefinden, ihre Aktiviertheit und ihre Schlafqualität wahrnahmen (Abbildung 35).

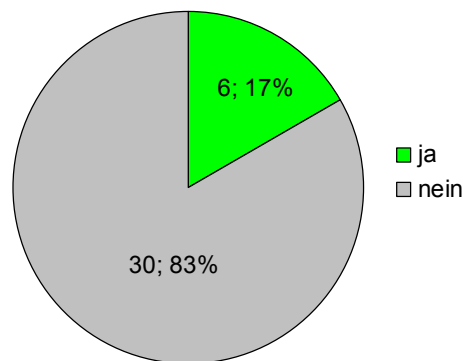


Abbildung 35: Wahrnehmung des Einflusses der Lichtqualität auf Wohlbefinden, Aktiviertheit und Schlafqualität (N = 36)

Die Ergebnisse der anderen Fragen sind in Abbildung 36 dargestellt. Die Bewertung des Gefallens der Lichtszenarien zeigt, dass es keine signifikanten Unterschiede in der Bewertung zwischen der an den Arbeitsplätzen vorhandenen Beleuchtung und der Beleuchtungssituation S4 gibt. Die Beleuchtungssituationen mit Flächenleuchten wurden tendenziell etwas schlechter bewertet.

Auf die Frage unter welcher der erlebten Lichtsituationen sich die Testpersonen am wohlsten gefühlt haben, wurde die Versuchsszene S4 am häufigsten genannt. Diese Lichtsituation würden die Probanden auch für ihre Arbeitssituation bevorzugen. Die Änderung der Lichtfarbe der Lampen in der bestehenden Beleuchtungsanlage hin zu höheren ähnlichsten Farbtemperaturen wurde von den Probanden mehrheitlich positiv wahrgenommen.

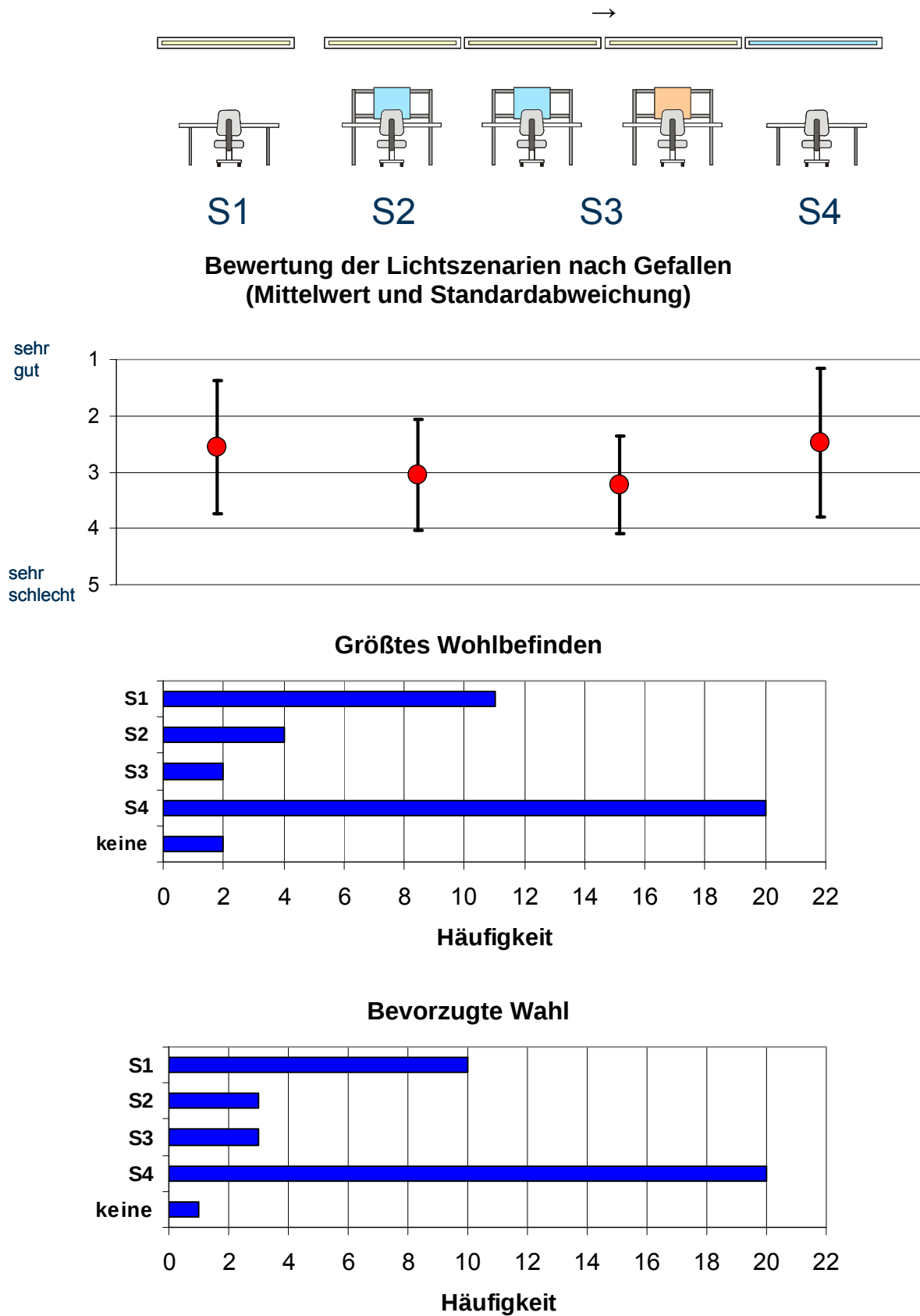


Abbildung 36: Bewertung der Lichtszenarien im Abschlussfragebogen (N = 36), für die Nennung des größten Wohlbefindens und der bevorzugten Wahl waren Mehrfachnennungen möglich

5.3 Befragung

Die Antworten der Fragebögen wurden codiert und in die Statistiksoftware SPSS 19.0 eingepflegt. Die Fragebögen zur Bewertung der Beleuchtungssituation wurden je Situation und Proband mittels t-Test ausgewertet. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt. Die Auswertung der Befragung zu Befinden und Schlafverhalten erfolgte mittels Multivariater Varianzanalyse mit folgenden Faktoren:

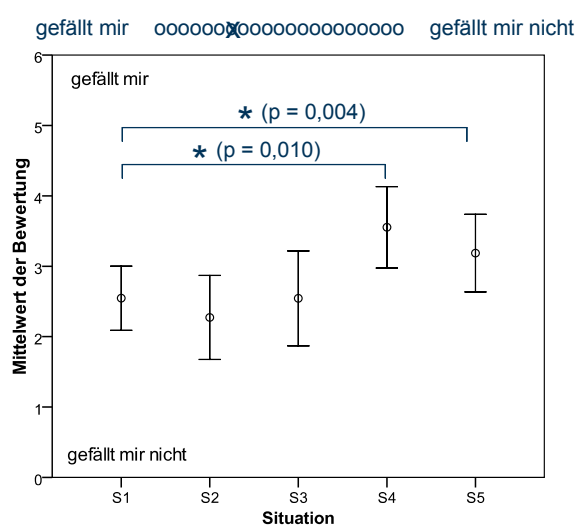
- Situation
- Altersgruppe
- Geschlecht
- Versuchsreihenfolge
- Chronotyp
- Schicht
- Tageslicht
- Lichtmenge am Arbeitsplatz

Die Ergebnisse der Datenanalyse sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

In einer ersten Betrachtung erfolgt eine statistische Auswertung bezüglich signifikanter Unterschiede zur Ausgangssituation S1. In weiteren Auswertungen wird auf die Analyse des Einflusses des Spektrums, der zusätzlichen Beleuchtung im Vorfeld, von dynamischer Beleuchtung und des Alters eingegangen. Darüber hinaus werden die Einflüsse der oben genannten Faktoren geprüft.

5.3.1 Fragebogen zur Beleuchtung

Abbildung 37 zeigt die Auswertung für die Variable Gefallen der Beleuchtungssituation.

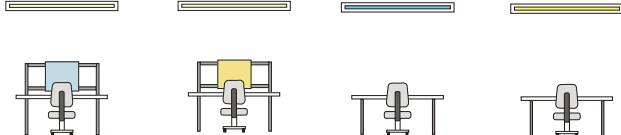


Symbol	Signifikanzniveau			
+	signifikant besser als S1 bewertet ($p < 0,05$)			
(+)	im Trend besser als S1 bewertet ($p < 0,1$)			
o	kein Unterschied in der Bewertung zu S1			
(-)	im Trend schlechter als S1 bewertet ($p < 0,1$)			
-	signifikant schlechter als S1 bewertet ($p < 0,05$)			
Variable	S2	S3	S4	S5
Gefallen	o	o	+	+

Abbildung 37: Auswertung der Variable Gefallen der Beleuchtung mit gekennzeichneten Signifikanzen bezüglich der Ausgangssituation S1 (links) und Prinzip der Zusammenfassung der Signifikanzniveaus (rechts)

Die Darstellung enthält die signifikanten Unterschiede zur Ausgangssituation S1. Diese sind mit einem Stern gekennzeichnet. In Klammern ist das Signifikanzniveau p angegeben. Für eine zusammenfassende Darstellung wurden die Testergebnisse mit Symbolen entsprechend der Kriterien nach Abbildung 37 gekennzeichnet. Tabelle 20 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 20: Ergebnisse der Befragung zur Beleuchtung - Vergleich zur Ausgangssituation S1



Variable	S2	S3	S4	S5
Gefallen	0	0	+	+
Förderung der Aufmerksamkeit	0	0	+	+
Aktivierung (Belebung)	+	0	+	+
Aktivierung (Aufmuntern)	0	0	+	0
ausreichende Helligkeit	0	0	+	(+)
heller Raumeindruck	+	+	+	+
Belästigung	-	(-)	0	0
Auffälligkeit	-	0	0	+
Aufdringlichkeit	-	0	0	0
Blendung	(-)	0	0	0
Gefallen der Lichtfarbe	0	0	0	0
störende Farbunterschiede	(-)	-	0	-

Die Ergebnisse zeigen, dass die Beleuchtung im Arbeitsbereich mit Lichtfarben hoher ähnlichster Farbtemperatur positiv wahrgenommen wird. Im Vergleich zur Ausgangssituation wird von den Probanden angegeben, dass die Beleuchtung besser gefällt und heller empfunden wird. Situation 4 fördert stärker die Aufmerksamkeit, belebt und muntert stärker auf als Situation S1. Störende Effekte werden nicht genannt. Die Flächenleuchten im Vorfeld fördern einen hellen Raumeindruck. Beim Einsatz von Flächenleuchten mit hohen ähnlichsten Farbtemperaturen wird eine Aktivierung wahrgenommen. Flächenleuchten im Vorfeld werden jedoch zum Teil störend em-

pfunden und können Blendung verursachen. Dies wird besonders bei Flächenleuchten mit kalter Lichtfarbe angegeben. Problematisch sind in diesem Zusammenhang Kombinationen unterschiedlicher Lichtfarben innerhalb eines Arbeitsbereiches.

In Abbildung 38 sind zum Vergleich die Mittelwerte der Antworten je Beleuchtungssituation dargestellt.

Die Lichtsituation ...

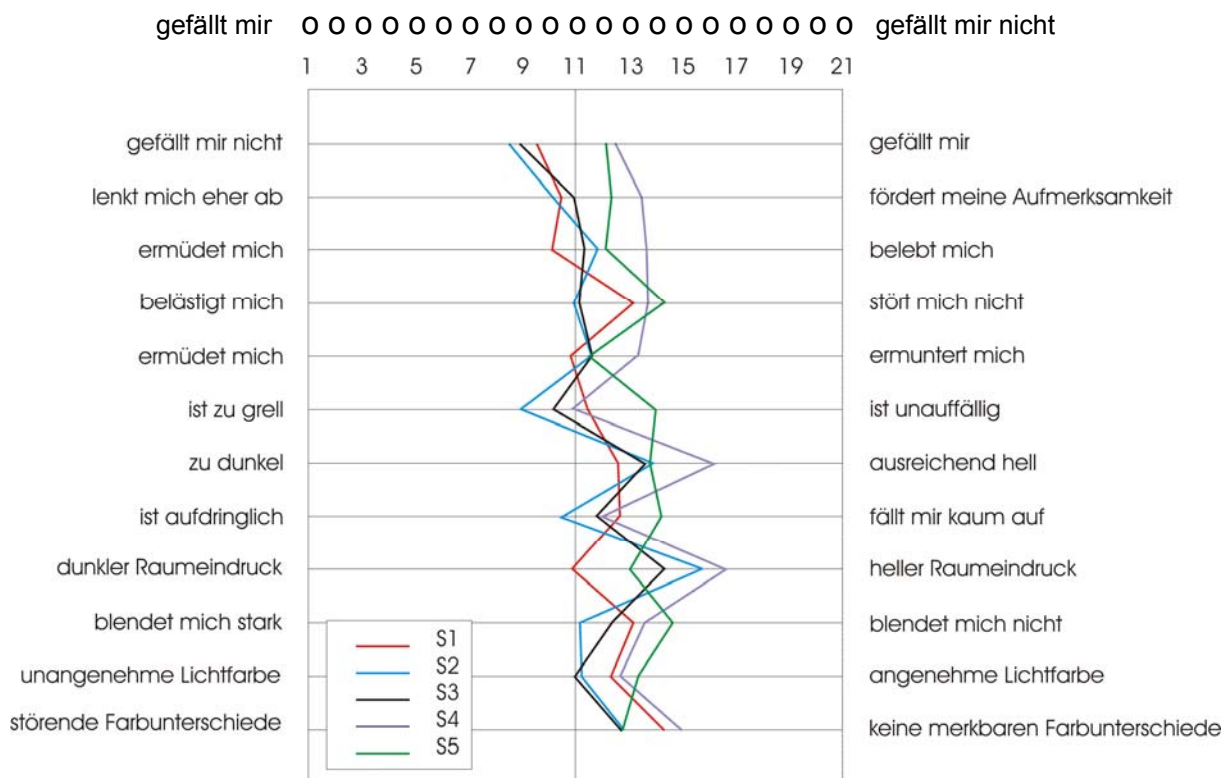


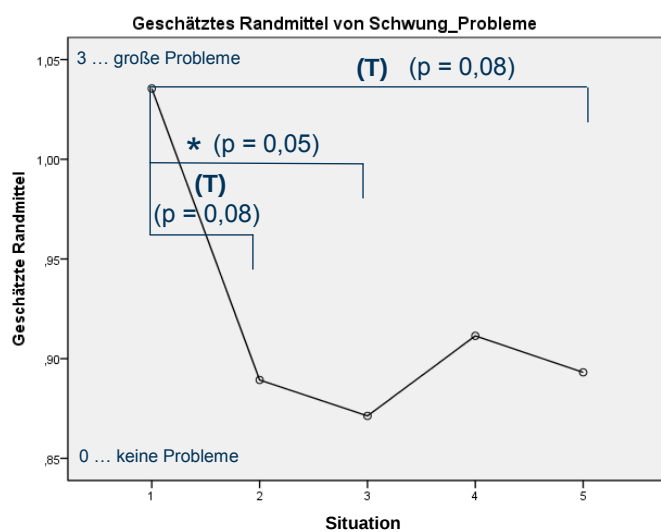
Abbildung 38: Ergebnis der Befragung der Testpersonen zur Bewertung der Beleuchtungssituationen (Mittelwerte)

Für die Praxis ist darauf zu achten, dass innerhalb eines Bereiches nur ähnliche Lichtfarben zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse sprechen nicht gegen eine Anwendung von Lichtfarben mit hoher ähnlichster Farbtemperatur. Die Aussagen der Befragung der Beleuchtungssituation decken sich mit den Aussagen des Abschlussfragebogens.

Problematisch bei der Interpretation der Ergebnisse ist, dass positive Wirkungen auch bei der Zweitbefragung der Ausgangssituation von den Probanden wahrgenommen wurden, obwohl mehrheitlich identische Beleuchtungsverhältnisse an den Arbeitsplätzen im Vergleich zur Situation S1 vorlagen. Möglicherweise zeigen sich hier Einflüsse durch die Feldstudie selbst oder durch den Befragungszeitpunkt.

5.3.2 Fragebogen zu Befinden und Schlafqualität

Abbildung 39 zeigt die Auswertung für die Variable Schwung_Probleme über die Beleuchtungssituationen (letzte Frage im Fragebogen Allgemeine Angaben, vergleiche Anhang 9.4). In der Darstellung sind die signifikante Unterschiede (*) und Trends (T) im Vergleich zur Ausgangssituation S1 gekennzeichnet. Das Signifikanzniveau p ist in Klammern angegeben. Für eine zusammenfassende Darstellung wurden die Testergebnisse mit Symbolen entsprechend der Kriterien nach Abbildung 39 gekennzeichnet. Tabelle 29 fasst die Ergebnisse zusammen.



Symbol	Signifikanzniveau			
+	signifikant besser als S1 bewertet ($p < 0,05$)			
(+)	im Trend besser als S1 bewertet ($p < 0,1$)			
o	kein Unterschied in der Bewertung zu S1			
(-)	im Trend schlechter als S1 bewertet ($p < 0,1$)			
-	signifikant schlechter als S1 bewertet ($p < 0,05$)			
Variable	S2	S3	S4	S5
fehlender Schwung	(+)	+	o	(+)

Abbildung 39: Auswertung der Variable Schwung_Probleme mit gekennzeichneten Signifikanzen bezüglich der Ausgangssituation S1 (links) und Prinzip der Zusammenfassung der Signifikanzniveaus (rechts)

Tabelle 21: Ergebnisse der Befragung zum Befinden - Vergleich zur Ausgangssituation S1

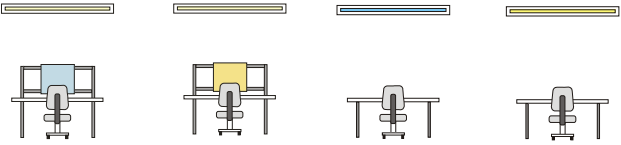
Variable	S2	S3	S4	S5
aktiv fühlen	(-)	+	o	+
Schwierigkeiten wach zu bleiben	(+)	+	+	+
fehlender Schwung	(+)	+	o	(+)

Während der unterschiedlichen Beleuchtungssituationen fühlten sich die Probanden mehrheitlich aktiver und weniger müde als in der Ausgangssituation S1. Jedoch zeigt

sich dies auch signifikant in Situation S5, die den Beleuchtungsbedingungen der Ausgangssituation entspricht.

Tabelle 22 fasst die Ergebnisse zur Bewertung der Schlafqualität zusammen. Die wesentlichen Unterkategorien sind Einschlaf- und Durchschlafprobleme und die Bewertungen von Erholungseffekt und Schlafqualität.

Tabelle 22: Ergebnisse der Befragung zum Schlafqualität - Vergleich zur Ausgangssituation S1



Variable	S2	S3	S4	S5
Bettgehzeit	früher	früher	o	früher
Einschlafdauer	(+)	o	o	o
Aufstehzeit	o	o	o	o
Schlafdauer	o	o	o	o
Einschlafprobleme	o	(+)	+	+
Durchschlafprobleme	o	o	o	o
Erholungseffekt	o	o	o	o
Schlafqualität	o	+	o	+
Schlafmittel	o	+	o	(+)

Während der unterschiedlichen Beleuchtungssituationen zeigen sich im Vergleich zur Ausgangssituation S1 zum Teil positive Effekte auf den Schlaf bezüglich der Einschlafproblematik und der Schlafqualität, jedoch ebenso auch in der Situation S5.

5.3.3 Einfluss des Spektrums

Für eine Abschätzung des Einflusses des Spektrums wurden die Beleuchtungssituationen S1 (Ausgangssituation) und S4 (Beleuchtungssystem mit 8000 K-Lampen) miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in der zweiten Spalte von Tabelle 23 zusammengefasst.

Dabei ergab sich, dass die Beleuchtung mit höherer Farbtemperatur im Vergleich zur Ausgangssituation:

- positiv wahrgenommen und angenehmer empfunden wird
- die Aufmerksamkeit stärker fördert, mehr belebt und stärker aufmuntert
- zu signifikant weniger Schwierigkeiten führt, wach zu bleiben
- geringe positive Wirkung auf Schlaf zeigte, was sich durch signifikant schnelleres Einschlafen am Abend bemerkbar macht
- die Mehrheit der Probanden diese Beleuchtung an ihrem Arbeitsplatz bevorzugen würde

Tabelle 23: Ergebnisse der Befragung

Variable	S4 vs. S1	S2 vs. S1	S3 vs. S1	S4 vs. S2	S3 vs. S2
aktiv fühlen	o	(-)	+	+	+
Schwierigkeiten wach zu bleiben	+	(+)	+	o	o
fehlender Schwung	o	(+)	+	o	o
Bettgezeit	o	früher	früher	o	o
Einschlafdauer	o	(+)	o	o	o
Aufstehzeit	o	o	o	o	o
Schlafdauer	o	o	o	o	o
Einschlafprobleme	+	o	(+)	o	o
Durchschlafprobleme	o	o	o	+	o
Erholungseffekt	o	o	o	o	o
Schlafqualität	o	o	+	o	+
Schlafmittel	o	o	+	o	o

5.3.4 Einfluss der Flächenleuchte im Vorfeld

Für den Vergleich wurden die Situationen S1 (Ausgangssituation) und S2 (zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld mit einer Lichtfarbe von statisch 8000 K) bzw. S3 (zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld mit veränderlicher Lichtfarbe) betrachtet. Außerdem wurde der Vergleich zwischen den Situation S4 (Beleuchtungssystem mit 8000 K-Lampen) und S2 einbezogen.

Die Ergebnisse sind in den Spalten drei bis fünf der Tabelle 23 zusammengefasst. Dabei ergab sich, dass zusätzliche Flächenleuchten im Vorfeld:

- den Arbeitsbereich aufhellen
- subjektiv zu einer signifikant höheren Belebung führen
- in der Tendenz zu weniger Schwierigkeiten wach zu bleiben führen und den Elan für die Tagesaufgaben erhöhen
- zu keinen signifikanten Unterschieden in der Wirkung auf den Schlaf führen, in der Tendenz aber die Probanden schneller einschliefen
- z.T. Störungen und Blendung verursachen können, die jedoch durch Anpassung der Helligkeit vermeidbar sind
- zu problematischen Lichtfarbenkombinationen im Arbeitsbereich führen können
- die Wirkung von 8000 K-Lampen in der bestehenden Anlage wurde geringfügig besser bewertet als die Kombination von bestehendem System mit zusätzlicher Flächenleuchte im Vorfeld

Unter realen Bedingungen sind Flächenleuchten mit Helligkeiten von $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$ unter Umständen zu hell und können subjektiv als störend oder blendend empfunden werden. Dies wurde besonders bei Flächenleuchten mit Lichtfarben mit hoher ähnlichster Lichtfarbe angegeben. Die in der Laboruntersuchung bestimmt Toleranzleuchtdichte von Flächenleuchten im Vorfeld von $L_{FL} = 2000 \text{ cd/m}^2$ ist in realen Situationen offensichtlich zu hoch. Hier ist besonders der Einfluss des unmittelbaren Umfeldes des Arbeitsplatzes zu betrachten, da in Fensternähe deutlich größere Helligkeiten als $L = 2000 \text{ cd/m}^2$ aus Fensterbereichen problemlos akzeptiert werden.

5.3.5 Vergleich statische – dynamische Beleuchtung

Für diese Bewertung wurden die Situationen S2 (zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld mit einer Lichtfarbe von statisch 8000 K) und S3 (zusätzliche Flächenleuchte im Vorfeld bei der sich die Lichtfarbe vom Schichtbeginn zum Schichtende von 8000 K zu 3000 K kontinuierlich ändert) verglichen. Die Ergebnisse sind in der Spalte sechs der Tabelle 23 zusammengefasst. Bei dynamischer Beleuchtung wurden eine signifikant höhere Aktivierung und eine bessere Schlafqualität angegeben. Im Vergleich zur Ausgangssituation wurde die dynamische Beleuchtung weniger störend und blendend empfunden. Es wurde eine höhere Aktiviertheit und bessere Schlafqualität während der dynamischen Beleuchtungssituation angegeben.

5.3.6 Einfluss des Alters

Je nach Alter wurde die Probandengruppe in Jüngere (< 45 Jahre und Ältere (≥ 45 Jahre) eingeteilt. Der Vergleich ist in Tabelle 24 in der linken Spalte zusammengefasst. Details sind Tabelle 25 und Tabelle 26 zu entnehmen.

Tabelle 24: Ergebnisse Befragung nach Geschlecht, Alter, Versuchsreihenfolge, Tageslichtmenge und Lichtmenge am Arbeitsplatz in der Ausgangssituation

Variable	Alte vs. Junge	Frauen vs. Männer	1-4-2-3-5 vs. 1-2-3-4-5	wenig vs. viel TL	viel vs. wenig Licht	Spät- vs. Frühschicht
aktiv fühlen	+	-	+	-	o	o
Schwierigkeiten wach zu bleiben	+	-	o	o	(-)	o
fehlender Schwung	o	-	+	-	-	o
Bettgezeit	o	früher	früher	o	später	später
Einschlafdauer	+	-	o	-	+	o
Aufstehzeit	früher	früher	o	später	(später)	später
Schlafdauer	weniger	o	(länger)	o	o	länger
Einschlafprobleme	o	-	o	o	+	o
Durchschlafprobleme	-	-	-	-	-	o
Erholungseffekt	o	o	o	-	-	o
Schlafqualität	o	o	-	-	-	o
Schlafmittel	-	o	o	-	+	o

Ältere Probanden:

- fühlen sich aktiver, haben weniger Probleme wach zu bleiben und schlafen schneller ein
- schlafen weniger und stehen früher auf
- bewerten ihre Schlafqualität schlechter, wachen häufiger auf und greifen eher zu Schlafmitteln
- geben unter S3 und S4 eine bessere Schlafqualität an

Jüngere Probanden:

- schlafen besser unter S2 und wachen nachts weniger auf
- haben bei S3 weniger Probleme wach zu bleiben

Tabelle 25: Ergebnisse der Befragung Vergleich zur Ausgangssituation für ältere Probanden

Variable	S2	S3	S4	S5
aktiv fühlen	-	0	0	0
Schwierigkeiten wach zu bleiben	0	0	0	0
fehlender Schwung	0	0	0	0
Bettgezeit	früher	früher	0	0
Einschlafdauer	0	0	0	0
Aufstehzeit	0	0	0	0
Schlafdauer	0	0	weniger	0
Einschlafprobleme	0	0	0	0
Durchschlafprobleme	-	-	0	0
Erholungseffekt	0	0	0	0
Schlafqualität	0	(+)	(+)	0
Schlafmittel	0	(-)	0	0

Tabelle 26: Ergebnisse der Befragung Vergleich zur Ausgangssituation für jüngere Probanden

Variable	S2	S3	S4	S5
aktiv fühlen	0	0	0	-
Schwierigkeiten wach zu bleiben	(+)	+	0	+
fehlender Schwung	0	+	0	+
Bettgezeit	0	0	0	0
Einschlafdauer	0	0	0	0
Aufstehzeit	0	0	0	0
Schlafdauer	0	0	0	0
Einschlafprobleme	(+)	0	+	+
Durchschlafprobleme	(+)	-	0	0
Erholungseffekt	0	0	0	0
Schlafqualität	0	(+)	0	0
Schlafmittel	0	(-)	+	+

Die Mehrheit der Effekte ist signifikant vom Alter abhängig und die unterschiedlichen Beleuchtungssituationen üben nur einen geringen Einfluss aus.

5.3.7 Weitere Einflüsse

Die Datenbasis wurde neben den Einflüssen der Beleuchtungssituation und Alter auch auf Effekte von Geschlecht, Chronotyp, Schicht, Lichtmenge am Arbeitsplatz, Tageslichtmenge und Versuchsreihenfolge untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 24 und Tabelle 27 zusammengefasst.

Geschlecht

Frauen fühlen sich im Vergleich zu Männern weniger aktiv, haben größere Schwierigkeiten wach zu bleiben und beurteilen ihren Elan bei der Bewältigung der Tagesaufgaben als geringer. Sie gehen früher schlafen als Männer und stehen früher auf. Frauen klagen häufiger über Schlafprobleme, sie schlafen schlechter ein und wachen nachts häufiger auf.

Versuchsreihenfolge

Zwischen den Versuchsreihenfolgen S1-S4-S2-S3-S5 und S1-S2-S3-S4-S5 lassen sich bei den Probanden Unterschiede in Befinden und Schlafqualität nachweisen. In der ersten Versuchsreihenfolge wird von den Probanden signifikant besseres Befinden bezüglich Aktiviertheit und Schwung angegeben, jedoch schlafen einige Probanden schlechterer und wachen häufiger in der Nacht auf. In der Versuchsreihenfolge ist indirekt auch die Zugehörigkeit zu Arbeitsgruppen und Firmen enthalten. Eine Beeinflussung kann nicht ausgeschlossen werden.

Tageslichtmenge

Für die Auswertung des Einflusses der Tageslichtmenge wurden sowohl die Angaben zur Aufenthaltsdauer bei Tageslicht im Freien als auch die Wetterverhältnisse einbezogen. Danach ist zu vermuten, dass ein langer Aufenthalt im Freien wirksamer ist als einer von kurzer Dauer und der Aufenthalt im Freien bei schönem Wetter wirksamer ist als bei bedecktem Himmel oder Regen. Entsprechend wurde zwischen großer und kleiner Tageslichtmenge unterschieden.

Bei geringen Tageslichtmengen ist im Vergleich zu großen Tageslichtmengen die Aktiviertheit geringer und die Probleme mit Elan die Tagesaufgaben anzugehen nehmen zu. Insgesamt zeigt sich bei den Probanden mit geringer Tageslichtmenge eine

schlechtere Schlafqualität mit häufigerem Aufwachen während der Nacht und einer längeren Zeit am Morgen, die benötigt wird, um sich frisch zu fühlen.

Chronotyp

Tabelle 27 fasst die Ergebnisse der Auswertung der Befragung nach Chronotypen zusammen. Früh- und Normaltypen fühlen sich aktiver als Spättypen und haben mehr Elan für die Tagesaufgaben. Sie bewerten ihren Schlaf qualitativ besser und fühlen sich am Morgen erholter. Frühtypen gehen früher schlafen und stehen früher auf als Normal- und Spättypen. Spättypen geben an nachts häufiger aufzuwachen.

Tabelle 27: Ergebnisse der Befragung nach Chronotyp

Variable	Normal- zu Spättyp	Früh- zu Spättyp	Früh- zu Normaltyp
aktiv fühlen	+	+	o
Schwierigkeiten wach zu bleiben	+	+	+
fehlender Schwung	+	+	o
Bettgezeit	o	früher	früher
Einschlafdauer	o	länger	o
Aufstehzeit	früher	früher	früher
Schlafdauer	o	o	weniger
Einschlafprobleme	o	o	o
Durchschlafprobleme	+	+	o
Erholungseffekt	+	+	+
Schlafqualität	+	+	o
Schlafmittel	+	o	-

Schicht

Der Vergleich zwischen Spätschicht und Früh- bzw. Normalschicht ergab, dass wie erwartet nach der Spätschicht signifikant später schlafen gegangen und aufgestanden wurde. Nach der Spätschicht wurde im Allgemeinen länger geschlafen. Es zeigten sich keine Unterschiede im Befinden zwischen beiden Schichttypen. Nach der Spätschicht traten im Vergleich zur Frühschicht häufiger Einschlafprobleme auf.

Lichtmenge am Arbeitsplatz

Verglichen wurden diejenigen Arbeitsplätze, die in der Ausgangssituation Beleuchtungsstärken E_{45° (aus Augenhöhe mit einem Blick unter 45° auf die Arbeitsfläche gemessen) Werte von $E_{45^\circ} \geq 100$ lx aufwiesen, mit denjenigen Arbeitsplätzen, die geringere Beleuchtungsniveaus (wenig Licht) besaßen. Hier finden sich widersprüchliche Aussagen zu den Erwartungen.

An Arbeitsplätzen mit hohen Lichtmengen wurde über Schwierigkeiten wach zu bleiben und fehlenden Schwung geklagt. Auch werden signifikant häufiger Durchschlafprobleme und geringe Schlafqualität genannt. Es ist zu vermuten, dass eine hohe Beleuchtung am Arbeitsplatz am Tag kein Garant für eine ausreichende Wirkung für Wohlbefinden und Stabilisierung des circadianen Rhythmus ist oder das Beleuchtungsniveau auch an diesen Arbeitsplätzen nicht ausreichend für eine Wirkung ist.

6 Diskussion

Der Vergleich der Ausgangssituation S1 zur Wiederholung am Ende des Feldexperiments S5 zeigt positivere Bewertung zum Wiederholungszeitpunkt derselben Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz (Tabelle 20 bis Tabelle 22). Am Ende des Feldexperiments wird die Beleuchtungssituation bezüglich des Gefallens besser bewertet, als anregender und heller wahrgenommen. Zum Ende der Feldstudie fühlten sich die Probanden signifikant aktiver, hatten weniger Schwierigkeiten wach zu bleiben und klagten seltener über fehlenden Schwung. Bei der Wiederholung der Ausgangssituation traten weniger Schlafprobleme auf und wurde die Schlafqualität besser bewertet. Damit müssen die im Kapitel 5 dargelegten Versuchsergebnisse vorsichtig interpretiert werden. Wären die Beleuchtungsverhältnisse während des Arbeitstages ein maßgeblicher Einflussparameter für das Wohlbefinden und die Schlafqualität und wäre die Wirkung der Beleuchtungssituationen S2 bis S4 im Vergleich zur Ausgangssituation bezüglich ihres Effekts auf Wohlbefinden und Schlafqualität deutlich positiv, dann sollten sich positive Wirkungen bei Wiederholung der Ausgangssituation nicht mehr zeigen. Aus den Untersuchungsergebnissen kann daher der maßgebliche Einfluss der Optimierungsversuche der Beleuchtung nicht sicher geschlossen werden. Es zeigt sich eine mögliche Beeinflussung der Bewertung der Probanden durch den Versuch selbst. Das Erleben der verschiedenen Beleuchtungssituationen kann zu einer Schärfung der Urteilsfähigkeit führen und die Bewertung beeinflussen. Es ist aber auch denkbar, dass die Bewertungen jahreszeitlichen Einflüssen unterliegen und im Frühjahr die Beleuchtungsverhältnisse anders bewertet werden als im Herbst.

Werden die Daten bezüglich signifikanter Unterschiede zur Versuchssituation S5 analysiert, zeigen sich die in Tabelle 28 zusammengefassten Ergebnisse. Signifikante Unterschiede treten außer zur Ausgangssituation S1 kaum noch auf und deut-

liche Unterschiede können nicht ausgemacht werden. Zur Beleuchtungssituation S3 gibt es keine signifikanten Unterschiede, zur Situation S4 unterscheidet sich nur die Schlafdauer. Nur die Beleuchtungssituation S2 wird im Vergleich zu S5 als weniger aktivieren aber als die Schlafqualität fördernd wahrgenommen.

Tabelle 28: Ergebnisse der Befragung im Vergleich zur Situation S5

Variable	S1	S2	S3	S4
aktiv fühlen	-	-	0	0
Schwierigkeiten wach zu bleiben	-	0	0	0
fehlender Schwung	(-)	0	0	0
Bettgezeit	später	0	0	0
Einschlafdauer	0	0	0	0
Aufstehzeit	0	0	0	0
Schlafdauer	0	0	0	weniger
Einschlafprobleme	-	0	0	0
Durchschlafprobleme	0	0	0	0
Erholungseffekt	0	0	0	0
Schlafqualität	-	+	0	0
Schlafmittel	(-)	0	0	0

Die fehlende Signifikanz im Feldexperiment könnte unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen könnten bereits in der Ausgangssituation das Reizniveau ausreichend sein oder auch während der getesteten Beleuchtungssituationen zu niedrig für eine Wirkung am Tage ausfallen. Denkbar wäre auch, dass das Freizeitverhalten wie der Aufenthalt bei Tageslicht im Freien einen viel stärkeren Reiz auf das Befinden und das Schlafverhalten ausübt als bisher im Vergleich zu den Beleuchtungsverhältnissen während des Arbeitstages angenommen. Die Frühschicht ist in der Industrie in der Regel am frühen Nachmittag beendet, sodass selbst in den Herbst- und Wintermonaten ausreichend Gelegenheit für den Aufenthalt bei Tageslicht besteht.

Möglicherweise ist auch die Versuchsmethode nicht valide und die Variablen Befinden und Schlafqualität lassen sich anhand der gewählten Kategorien nicht sicher über eine Befragung erfassen.

Es ist auch zu vermuten, dass Versuche unter realen Bedingungen zu unterschiedliche Voraussetzungen haben und damit die Bewertungen sehr unterschiedlich beeinflusst werden. Denkbar wäre auch, dass längere Untersuchungszeiträume und ein größeres Probandenkollektiv notwendig sind, damit eine größere Datenbasis zugrunde gelegt werden kann.

Schwierig war das Feldexperiment auch dadurch, dass an fünf Standorten Probanden untersucht wurden und dass es nicht möglich war, alle Probanden persönlich regelmäßig zu betreuen, was unter Umständen die Qualität der Befragung beeinflusst.

Die Ergebnisse der Untersuchung sprechen jedoch nicht gegen den Einsatz von Lampen höherer ähnlichster Farbtemperatur an Arbeitsplätzen. Sie können positive Auswirkungen auf Befinden und Schlafqualität haben. Diese Beleuchtungsvariante wurde von den Probanden sehr positiv bewertet und eindeutig präferiert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines Feldexperiments wurden unterschiedliche Beleuchtungssituationen am Tage bezüglich ihrer Wirkung auf Wohlbefinden und Schlafqualität an realen Industriearbeitsplätzen untersucht.

Die untersuchten Beleuchtungsszenarien wurden mehrheitlich von den Probanden akzeptiert. Probleme gab es dort, wo Blendung oder Reflexe die Sehaufgabe stören, zu unterschiedliche Lichtfarben in einem Arbeitsbereich kombiniert werden oder die Integration der Flächenleuchte am Arbeitsplatz schwierig ist.

Es zeigen sich signifikante Einflüsse von Alter, Chronotyp und Tageslichteinfluss, jedoch unabhängig von den einzelnen Beleuchtungsszenarien.

Im Vergleich zur Ausgangssituation wurden während der unterschiedlichen Beleuchtungssituationen teilweise eine höhere Aktivierung und positive Einflüsse auf den Schlaf beobachtet. Aufgrund der fehlenden Reproduzierbarkeit bei gleichen Beleuchtungsverhältnissen zu Beginn und Ende des Feldexperiments ist eine generelle Ableitung von Empfehlungen unsicher und sollten weitere Untersuchungen erfolgen.

Die Untersuchungsergebnisse sprechen nicht gegen einen Einsatz von Lampen mit hoher ähnlichster Farbtemperatur an Arbeitsplätzen. Sie können positive Auswirkungen auf Befinden und Schlafqualität haben. Zusätzliche hell leuchtende Flächen im Vorfeld sind nur bedingt zu empfehlen. Zu große Unterschiede in der Helligkeit und in der Lichtfarbe sollten vermieden werden. Zur Angabe von Leuchtdichtegrenzwerten in Abhängigkeit der Umfeldleuchtdichte sind weitere gezielte Untersuchungen erforderlich.

8 Literaturverzeichnis

- ARENDT J: *Melatonin and human rhythms*. Chronobiology International 2006; 23 (1/2): 21-37.
- BAEHR EK, FOGG LF, EASTMAN CI: *Intermittent bright light and exercise to entrain human circadian rhythms to night work*. American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 1999; **277** (6): R1598-R1604.
- BAER R (Hrsg.): *Beleuchtungstechnik*. Berlin: Verlag Technik, 2. Auflage 1996, 47.
- BRAINARD GC, HANIFIN JP, GREESON JM, BYRNE B, GLICKMAN G, GERNER E, ROLLAG MD: *Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor*. Journal of Neuroscience 2001; 21 (16): 6405-6412.
- BERSON DM, DUNN FA, TAKAO M: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. Science 2002; 295 (5557): 1070-1073.
- CAJOCHEN C: *Alerting effects of light*. Sleep Medicine Reviews 2007; 11 (6): 453-464
- DACEY DM ET ALL: Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. Letters to nature 2005; **433** (2): 749-754.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik -Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik. DIN V5031 Teil 3, Berlin: Beuth Verlag, März 1982.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Werte*. DIN 33402 Teil 2, Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2005.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. DIN V5031 Teil 100, Berlin: Beuth Verlag, Juni 2009.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. DIN EN 12464 Teil 1, Berlin: Beuth Verlag, August 2011
- DIJK DJ, CAJOCHEN C: Melatonin and the circadian regulation of sleep initiation, consolidation, structure, and the sleep EEG. Journal Biological Rhythms 1997; 12 (6): 627-635.
- FÖRDERGEMEINSCHAFT GUTES LICHT: Licht.wissen 19 - Wirkung des Lichtes auf den Menschen., 2010: 12
- FRÖHLING I, JACOBY B: *Vitalität und Gesundheit durch Licht*. Niederhausen: Falken Verlag, 1998.
- GALL D: Circadiane Lichtgrößen und deren meßtechnische Ermittlung. Licht 2002; 54 (11/12): 1292-1297
- GRONFIER C, WRIGHT KP, KRONAUER RE, JEWETT ME, CZEISLER CA: *Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans*. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism 2004; **287** (1): E174-E181.
- LERMAN S: *Radiant Energy and the eye*. Macmillan Publishing Co. Inc. New York: 1980, Fig. 3.1
- NEUHÄUSER S: Zeitabhängige Messung und Bewertung personenbezogener Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz. Diplomarbeit. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2010
- OSTERBERG G: *Topography of the layer of rods and cones in the human retina*. Acta Ophthal Suppl. 1935 , **6** P1–103.

- RIMMER DW, BOIVIN DB, SHANAHAN TL, KRONAUER RE, DUFFY JF, CZEISLER CA: *Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light*. American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology 2000; **279** (5): R1574-R1579.
- Rosenthal NE, Kasper SF: *Licht-Therapie*. München: Heyne Verlag, 1997.
- SCHIERZ C: *Leben wir in „biologischer Dunkelheit“?* In: Tagungsband-Licht 2002. Bern: 2002, 381-389
- SCHIERZ C: *Lighting for the elderly: physiological basics and their consequences* In: Tagungsband-LUX EUROPA 2009. Istanbul: 2009, 147-154
- SCHMIDT R, THEWS G: *Physiologie des Menschen*. Berlin: Springer Verlag, 27. Auflage 1997, 405f.
- SCHMITS PW: *Arbeitsstättenbeleuchtung - auf der Suche nach neuen Lichtqualitäten*: In: Tagungsband - Zweites Symposium Licht und Gesundheit. Berlin: 2001, 39-49.
- THAPAN K, ARENDT J, SKENE DJ: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. Journal of Physiology 2001; **535** (1): 261-267.
- THOR-WIEDEMANN S: *Licht gibt Leben*. München: Knaur Verlag, 1996.
- WEHR TA, AESCHBACH D, DUNCAN WC: *Evidence for a biological dawn and dusk in the human circadian timing system*. Journal of Physiology 2001; **535** (3): 937-951.
- WOLF S: LuxBlick – Mobile Langzeitaufzeichnung von Beleuchtungsstärke und circadianer Bestrahlungsstärke am Auge. Lux junior 2009, Dörfeld
- WYATT JK, RITZ-DE CECCO A, CZEISLER CA, DIJK DJ: Circadian temperature and melatonin rhythms, sleep and neurobehavioral function in humans living on a 20-h day. American Journal of Physiology 1999; **46** (4): R1152-R1163.
- ZULLEY J, HAEN E, LUND R, ROSENBERG T: *Licht-Therapie*. Regensburg: Roderer Verlag, 1997.

Internetquellen

<http://www.opteema.com/upload/pubfiles/specbos1201.pdf>, gelesen am 01.03.2011

9 Anhang

- 9.1 Fragebogen zu Bewertung der Beleuchtungsszene - Voruntersuchung**
- 9.2 Daten Einstellungen Flächenleuchte**
- 9.3 Beschreibung der Versuchsarbeitsplätze**
- 9.4 Fragebögen des Feldexperiments**
- 9.5 Messergebnisse der LuxBlick-Messungen**

9.1 Fragebogen zu Bewertung der Beleuchtungsszene - Voruntersuchung

Beleuchtungsszene:

Proband:

Die Beleuchtung

gefällt mir	00000000000000000000	gefällt mir nicht
erhöht meine Leistungsbereitschaft	00000000000000000000	mindert meine Leistungsbereitschaft
Ist zu dunkel	00000000000000000000	ist zu hell
belästigt mich	00000000000000000000	belästigt mich nicht
wirkt natürlich	00000000000000000000	wirkt unnatürlich
hat eine angenehme	00000000000000000000	hat eine unangenehme Lichtfarbe Lichtfarbe
blendet mich	00000000000000000000	blendet mich nicht
schafft eine zu dunkle Arbeitsfläche	00000000000000000000	schafft eine zu helle Arbeitsfläche
Blendung durch Leuchte verursacht	00000000000000000000	Blendung nicht durch Leuchte verursacht

Bemerkung:

.....

.....

.....

9.2 Daten Einstellungen Flächenleuchte

Tabelle 29: Steuerwerte und dazugehörige Messdaten der Flächenleuchten

$L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$

Szene	Steuerwerte		Zeitverlauf im 8 h Zyklus	Specbos Leuchtenmitte		LMK Region L in cd/m^2
	827	880		a_{ms}	CCT in K	
16	8	37	00:00	0,97	8225	1531
15	17	31	00:30	0,90	7190	1514
14	24	27	01:00	0,85	6569	1504
13	30	23	01:30	0,80	6036	1481
12	36	19	02:00	0,75	5498	1480
11	42	16	02:30	0,69	5086	1480
10	49	13	03:00	0,64	4722	1496
9	53	11	03:30	0,61	4497	1497
8	58	9	04:00	0,57	4221	1506
7	65	7	04:30	0,53	3985	1524
6	71	5	05:00	0,48	3748	1467
5	75	4	05:30	0,46	3629	1486
4	79	3	06:00	0,43	3503	1504
3	83	2	06:30	0,40	3421	1481
2	89	1	07:00	0,36	3263	1482
1	100	0	07:30	0,33	3187	1482

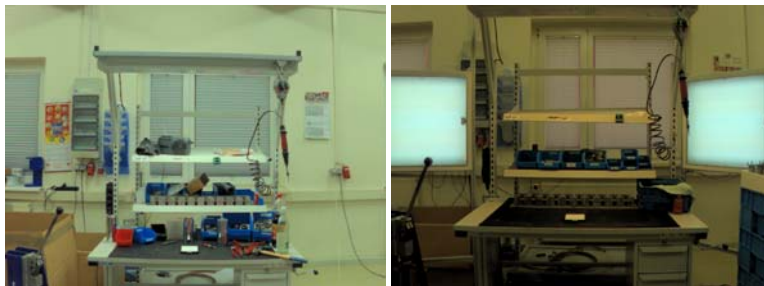
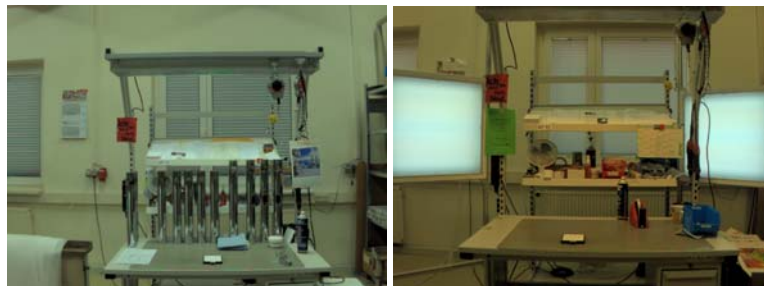
$L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$

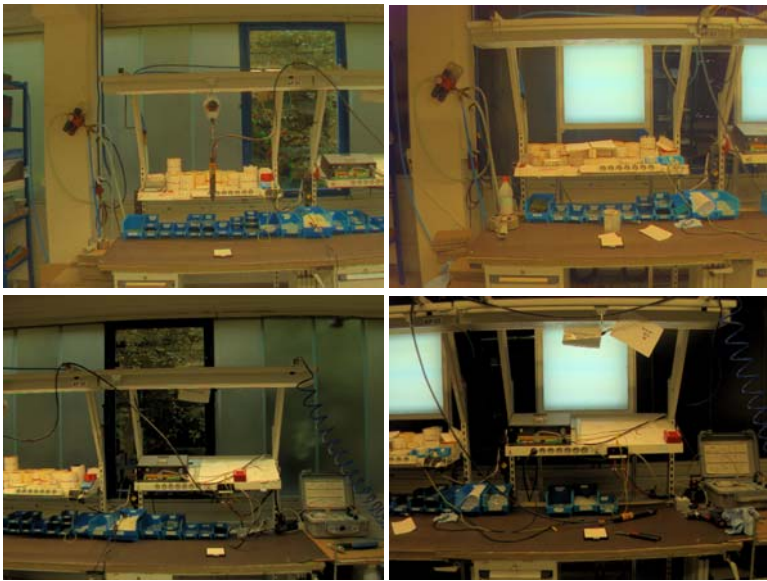
Szene	Steuerwerte		Zeitverlauf im 8 h Zyklus	Specbos Leuchtenmitte		LMK Region L in cd/m^2
	827	880		a_{ms}	CCT in K	
16	7	25	00:00	0,98	8199	1008
15	13	20	00:30	0,91	7194	989
14	17	17	01:00	0,86	6591	980
13	21	15	01:30	0,82	6108	978
12	25	12	02:00	0,77	5603	971
11	29	10	02:30	0,72	5175	968
10	32	8	03:00	0,67	4774	968
9	34	7	03:30	0,64	4564	969
8	37	6	04:00	0,60	4313	982
7	39	5	04:30	0,56	4110	980
6	42	4	05:00	0,52	3879	996
5	46	3	05:30	0,47	3666	1008
4	48	2	06:00	0,44	3529	1016
3	53	1	06:30	0,38	3294	1012
2	53	1	07:00	0,38	3293	1012
1	54	0	07:30	0,38	3293	994

$L_{FL} = 750 \text{ cd/m}^2$

Szene	Steuerwerte		Zeitverlauf im 8 h Zyklus	Specbos Leuchtenmitte		LMK Region L in cd/m^2
	827	880		a_{ms}	CCT in K	
16	4	17	00:00	0,99	8293	715,3
15	7	15	00:30	0,94	7516	715,2
14	9	14	01:00	0,91	7094	718,2
13	11	12	01:30	0,87	6626	714,8
12	13	11	02:00	0,84	6270	719,7
11	15	10	02:30	0,80	5906	719,1
10	17	9	03:00	0,76	5546	726,5
9	19	8	03:30	0,73	5274	729,7
8	21	7	04:00	0,70	5013	722,8
7	23	6	04:30	0,65	4690	720,6
6	25	5	05:00	0,61	4411	716,5
5	27	4	05:30	0,57	4122	709,9
4	30	3	06:00	0,51	3827	703,4
3	32	2	06:30	0,47	3631	719,4
2	35	1	07:00	0,39	3308	705,4
1	37	0	07:30	0,35	3146	704,9

9.3 Beschreibung der Versuchsarbeitsplätze

Bezeichnung	AP01	AP02
Firma/ Bereich	MEG I/ Fertigung	MEG I/ Fertigung
Tätigkeit	Montage, Sitz- und Steharbeitsplatz, leichte/ mittlere Sehanforderungen	Inspektion/ Montage, Sitz- und Steharbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitstisch: B: 1,27 m, T: 0,7 m, H: 0,76 m (variabel), dunkler Untergrund,	Arbeitstisch: B: 1,27 m, T: 0,7 m, H: 0,73 m (variabel), mittlerer Untergrund
Allgemeinbeleuchtung	Decke: 58W/840/865 LL T8 KVG	Decke: 58W/840/865 LL T8 KVG
Arbeitsplatzbeleuchtung	am Tisch über Arbeitsfläche montiert: 2x36W/840 LL T8 KVG	am Tisch über Arbeitsfläche montiert: 2x36W/840 LL T8 KVG
Tageslicht	Fenster im Vorfeld, typisch mit Jalousie verschlossen	Fenster im Vorfeld, typisch mit Jalousie verschlossen
Flächenleuchte	2 Leuchten seitlich, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$	2 Leuchten seitlich, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

Bezeichnung	AP03	AP04
Firma	MEG I/ Endmontage	MEG I/ Endmontage
Tätigkeit	Montage, Steharbeitsplatz, leichte/ mittlere Sehanforderungen	Gehäusevorbereitung, Steharbeitsplatz leichte/ mittlere Sehanforderungen
Arbeitsplatz	2 Arbeitstische in Linie: B: 2,0 m, T: 0,7 m, H: 0,84 m, dunkler Untergrund,	2 Arbeitstische: B: 1,27 m, T: 0,7 m, H: 0,82 m, heller und mittlerer Untergrund
Allgemein- beleuchtung	Decke: 58W/840/830 LL T8 KVG	Decke: 58W/840/830 LL T8 KVG
Arbeitsplatz- beleuchtung	am Tisch über Arbeitsfläche montiert: 2x36W/840 LL T8 KVG	am Tisch über Arbeitsfläche montiert: 2x36W/840 LL T8 KVG
Tageslicht	Fenster und diffuse Glaswand in Vorfeld	Fenster und diffuse Glaswand in Vorfeld
Flächenleuchte	1 Leuchte pro Tisch im Vorfeld, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$	1 Leuchte pro Tisch im Vorfeld, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

Bezeichnung	AP05	AP06
Firma/ Bereich	HMW/ Sensorfertigung	HMW/ Sensorfertigung
Tätigkeit	Widerstandwicklung, Sitzarbeitsplatz hohe Sehanforderungen	Widerstandwicklung, Sitzarbeitsplatz hohe Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitstisch: B: 1,50 m, T: 0,9 m, H: 0,83 m, mittlerer Untergrund,	Arbeitstisch: B: 1,20 m, T: 0,8 m, H: 0,70 m, mittlerer Untergrund
Allgemein- beleuchtung	Decke: 58W/840 LL T8 KVG (typisch aus)	Decke: 58W/840 LL T8 KVG (typisch aus)
Arbeitsplatz- beleuchtung	Variable Tischleuchte unmittelbar über Wickelmaschine: 1x18W/840 LL T8 KVG	Variable Tischleuchte unmittelbar über Wickelmaschine: 1x18W/840 LL T8 KVG
Tageslicht	Fenster im Vorfeld, typisch mit Jalousie verschlossen	Fenster im Vorfeld, typisch mit Jalousie verschlossen
Flächenleuchte	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		
		

Bezeichnung	AP07	AP08
Firma	HMW/ Sensorfertigung	HMW/ Sensorfertigung
Tätigkeit	Widerstandwicklung, Sitzarbeitsplatz hohe Sehanforderungen	Widerstandwicklung, Sitzarbeitsplatz hohe Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitstisch: B: 1,12 m, T: 0,7 m, H: 0,84 m, dunkler Untergrund,	Arbeitstisch: B: 1,15 m, T: 0,65 m, H: 0,75 m, mittlerer Untergrund
Allgemein- beleuchtung	Decke: 58W/840 LL T8 KVG (typisch aus)	Decke: 58W/840 LL T8 KVG (typisch aus)
Arbeitsplatz- beleuchtung	Variable Tischleuchte unmittelbar über Wickelmaschine: 1x18W/840 LL T8 KVG	Variable Tischleuchte unmittelbar über Wickelmaschine: 1x18W/840 LL T8 KVG
Tageslicht	Fenster im Vorfeld, typisch mit Jalousie verschlossen	Fenster im Vorfeld, typisch mit Jalousie verschlossen
Flächenleuchte	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		
		

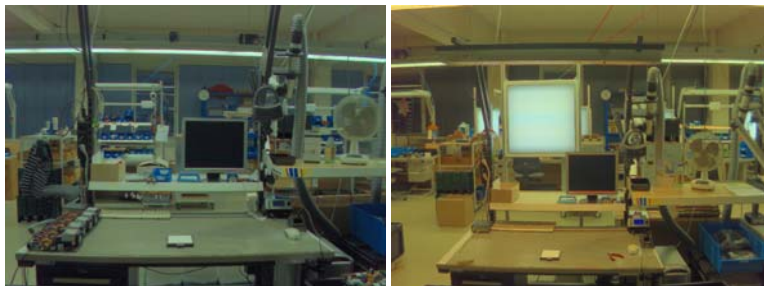
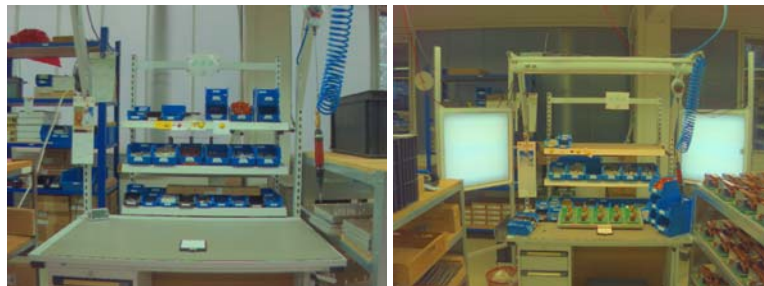
Bezeichnung	AP09	AP10
Firma/ Bereich	HMW/ Sensorfertigung	HMW/ Sensorfertigung
Tätigkeit	Widerstandswicklung, Sitzarbeitsplatz hohe Sehanforderungen	Messung und Kontaktierung, Sitzarbeitsplatz hohe Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitstisch: B: 1,00 m, T: 0,71 m, H: 0,8 m, mittlerer Untergrund,	Arbeitstisch: B: 1,140 m, T: 0,6 m, H: 0,86 m, mittlerer Untergrund
Allgemein- beleuchtung	Decke: 58W/840 LL T8 KVG (typisch aus)	Decke: 58W/840 LL T8 KVG (typisch aus)
Arbeitsplatz- beleuchtung	Variable Tischleuchte unmittelbar über Wickelmaschine: 1x18W/840 LL T8 KVG	Variable Tischleuchte unmittelbar über Arbeitsfläche: 1x18W/840 LL T8 KVG
Tageslicht	Fenster im Vorfeld, typisch mit Jalousie verschlossen	Fenster im Vorfeld, typisch mit Jalousie verschlossen
Flächenleuchte	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

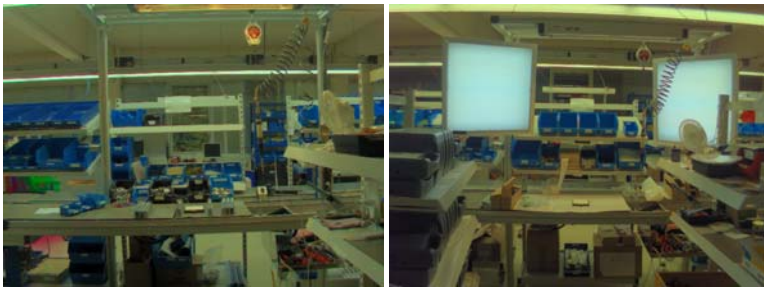
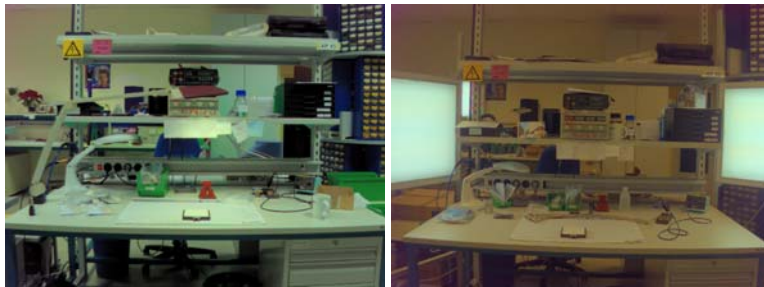
Bezeichnung	AP11	AP13
Firma	TK/ Ruhrort/ Mechanische Werkstatt	TK/ Ruhrort/ Mechanische Werkstatt
Tätigkeit	Wartung und Kontrolle Fettverteiler, Steharbeitsplatz, leichte Sehanforderungen	Reparaturarbeiten, Steharbeitsplatz, leichte Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Werkbank: B: 1,50 m, T: 0,65 m, H: 0,85 m, Prüfarbeitsplatz: B: 1,50 m, T: 0,65 m, H: 0,85 m, dunkler und mittlerer Untergrund	Werkbank: B: 1,50 m, T: 1,0 m, H: 0,90 m, dunkler Untergrund,
Allgemeinbeleuchtung	Decke abgehangen: 58W/840 LL T8 KVG	Decke abgehangen: 58W/840 LL T8 KVG (typisch aus)
Arbeitsplatzbeleuchtung	an Werkbank montiert: 2x36W/840 LL T8 KVG	keine
Tageslicht	Oberlichter im Vorfeld	Oberlichter über Arbeitsplatz und seitlich
Flächenleuchte	Je 1 Leuchte im Vorfeld und seitlich, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

Bezeichnung	AP14	AP15 - AP22
Firma	TK/ Ruhrort/ Mechanische Werkstatt	TK/ Hamborn/ Mechanische Werkstatt
Tätigkeit	Reparaturarbeiten, Steharbeitsplatz, leichte Sehanforderungen	Reparaturarbeiten, Steharbeitsplatz, leichte Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Werkbank: B: 1,50 m, T: 0,65 m, H: 0,85 m, dunkler Untergrund,	Werkbank: B: 1,80 m, T: 0,8 m, H: 0,86 m, dunkler Untergrund,
Allgemeinbeleuchtung	Decke abgehangen: 58W/840 LL T8 KVG (typisch aus)	Hallenbeleuchtung HRI-T 400W
Arbeitsplatzbeleuchtung	keine	an Werkbank montiert: 2x36W/840/830 LL T8 KVG
Tageslicht	Oberlichter über Arbeitsplatz und seitlich	Oberlicht im Rücken
Flächenleuchte	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$
Ansicht	 	 

Bezeichnung	Tisch1 bis Tisch5 (AP23 – AP32)	AP33
Firma	FORD-Halle Y	FORD-Halle A
Tätigkeit	Hydraulikmontage, Steharbeitsplatz, leichte bis mittlere Sehanforderungen	Getriebemontage, Sitz- und Steharbeitsplatz, leichte bis mittlere Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitstisch: B: 1,50 m, T: 0,6 m, H: 0,86 m, mittlerer Untergrund	Arbeitstisch: B: 1,50 m, T: 1,0 m, H: 0,9 m, Beölungsplatz B: 1,50 m, T: 0,6 m, H: 0,9 m, mittlerer Untergrund
Allgemeinbeleuchtung	Decke abgehangen: 58W/840 LL T8 KVG	Decke abgehangen: 58W/840 LL T8 KVG
Arbeitsplatzbeleuchtung	keine	keine
Tageslicht	keins	keins
Flächenleuchte	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 750 \text{ cd/m}^2$	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

Bezeichnung	AP34	AP35/ AP36
Firma	FORD-Halle A	MEGII-Fertigung
Tätigkeit	Getriebemontage, Steharbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen	Bestückung Leiterplatten, Sitzarbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitsablage: B: 0,95 m, T: 0,45 m, H: 0,95 m, dunkler Untergrund	Arbeitstisch: B: 1,28 m, T: 0,70 m, H: 0,72 m, mittlerer Untergrund
Allgemeinbeleuchtung	Decke abgehangen: 58W/840 LL T8 KVG	Decke: 58W/840/865 LL T8 KVG
Arbeitsplatzbeleuchtung	keine	am Tisch über Arbeitsfläche montiert: 2x36W/840 LL T8 KVG
Tageslicht	keins	Fenster und diffuse Glaswand in Vorfeld
Flächenleuchte	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 750 \text{ cd/m}^2$	Je 1 Leuchte im Vorfeld und seitlich, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

Bezeichnung	AP37	AP38/ AP39
Firma	MEGII-Fertigung	MEGII-Fertigung
Tätigkeit	Bestückung und Test von Leiterplatten, Sitzarbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen	Bestückung Leiterplatten, Sitzarbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitstisch: B: 1,28 m, T: 0,70 m, H: 0,72 m, mittlerer Untergrund	Arbeitstisch: B: 1,28 m, T: 0,70 m, H: 0,72 m, mittlerer Untergrund
Allgemeinbeleuchtung	Decke: 58W/840/865 LL T8 KVG	Decke: 58W/840/865 LL T8 KVG
Arbeitsplatzbeleuchtung	am Tisch über Arbeitsfläche montiert: 2x36W/840 LL T8 KVG	am Tisch über Arbeitsfläche montiert: 2x36W/840 LL T8 KVG
Tageslicht	keins	Fenster und diffuse Glaswand in Vorfeld
Flächenleuchte	1 Leuchte im Vorfeld, $L_{FL} = 1000 \text{ cd/m}^2$	2 Leuchten seitlich, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

Bezeichnung	AP40	AP43
Firma	MEGII-Fertigung	ILM-Sensorfertigung
Tätigkeit	Montage, Sitzarbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen	Bestückung Leiterplatten und Sensormontage, Sitzarbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitsablage: B: 1,00 m, T: 0,5 m, H: 0,83 m, mittlerer Untergrund	Arbeitstisch: B: 1,60 m, T: 0,80 m, H: 0,78 m, heller Untergrund
Allgemein- beleuchtung	Decke abgehangen: 58W/840 LL T8 KVG	Decke: 18W/840 LL T8 KVG
Arbeitsplatz- beleuchtung	keine	Tischleuchte: Dulux 9W/830
Tageslicht	keins	keins
Flächenleuchte	2 Leuchten seitlich, $L_{FL} = 750 \text{ cd/m}^2$	2 Leuchten seitlich, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

Bezeichnung	AP44/ AP47	AP45
Firma	ILM-Sensorfertigung	ILM-Sensorfertigung
Tätigkeit	Bestückung und Montage, Sitzarbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen	Bestückung und Montage, Sitzarbeitsplatz, mittlere Sehanforderungen
Arbeitsplatz	Arbeitsablage: B: 1,00 m, T: 0,5 m, H: 0,83 m, heller Untergrund	Arbeitstisch: B: 1,60 m, T: 0,80 m, H: 0,78 m, heller Untergrund
Allgemeinbeleuchtung	Decke abgehangen: 18W/840 LL T8 KVG	Decke: 18W/840 LL T8 KVG
Arbeitsplatzbeleuchtung	Tischleuchte: Halogenglühlampe	Tischleuchte: Dulux 9W/830
Tageslicht	keins	Fenster links
Flächenleuchte	2 Leuchten seitlich, $L_{FL} = 750 \text{ cd/m}^2$	2 Leuchten seitlich, $L_{FL} = 1500 \text{ cd/m}^2$
Ansicht		

9.4 Fragebögen des Feldexperiments

Probanden-Nummer:

Befragung an Arbeitsplätzen

In den nächsten Wochen führen wir vom Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau Befragungen an Ihrem Arbeitsplatz durch.

Wir möchten dabei wissen, wie Sie sich Zeit an Ihrem Arbeitsplatz gefühlt haben. Weiterhin interessiert uns, ob Sie sich aktiv fühlten und wie gut Sie nachts schlafen konnten.

Wenn Sie auch Nachtschichten arbeiten, füllen Sie bitte die Fragebögen nicht aus!

Fragebogen zur Person

Bitte machen Sie zunächst einige allgemeine Angaben zu ihrer Person:

Geschlecht: ☐ männlich
☐ weiblich

Alter: Jahre

Tragen Sie bei Ihrer Tätigkeit eine Brille?: ☐ ja
☐ nein

Tragen Sie bei Ihrer Tätigkeit Kontaktlinsen? ☐ ja
☐ nein

Hatten Sie bereits Augenerkrankungen/
Augenoperationen? Welche? ☐ ja
☐ nein

Wann gehen Sie an freien Tagen
gewöhnlich schlafen? Uhrzeit:

Wenn Sie zur Früh- oder Normalschicht aufstehen
müssen, wie empfinden Sie das? ☐ zu früh, ich würde gerne länger schlafen
☐ nicht zu früh, da ich um diese Zeit sowieso
wach bin

Bis wann würden Sie an freien Tagen am liebsten
schlafen? Uhrzeit:

Nach ihrem Schlaf-Wach-Rhythmus unterteilt man in
Früh- und Spättypen.
Welcher Typ sind Sie? ☐ extremer Frühtyp (extrem frühes Aufwachen)
☐ Frühtyp
☐ Normaltyp
☐ Spättyp
☐ extremer Spättyp (spätes zu Bett gehen,
„Langschläfer“)

Datum:

Probanden-Nummer:

Befragung an Arbeitsplätzen

Allgemeine Angaben

Bitte beachten Sie:

Diese Fragen beziehen sich nur auf die letzte Woche!

In welcher Schicht haben Sie in der letzten Woche gearbeitet?

- ☐ Frühschicht oder Normalschicht
- ☐ Spätschicht

An wie vielen Tagen der letzten Woche waren Sie an ihrem Arbeitsplatz tätig?

..... Tage

Wie lange hielten Sie sich in der letzten Woche werktags bei Tageslicht im Freien auf?

morgens und vormittags etwa Stunden
mittags etwa Stunden
nachmittags und abends Stunden

Wie lange hielten Sie sich am letzten Wochenende bei Tageslicht im Freien auf?

morgens und vormittags etwa Stunden
mittags etwa Stunden
nachmittags und abends..... Stunden

Wie aktiv fühlten Sie sich in der letzten Woche?

- ☐ sehr aktiv
- ☐ weniger aktiv
- ☐ müde
- ☐ sehr müde

Wie oft hatten Sie während der letzten Woche Schwierigkeiten wach zu bleiben z. B. beim Autofahren, beim Fernsehen oder bei gesellschaftlichen Anlässen?

- ☐ gar nicht
- ☐ einmal oder zweimal
- ☐ dreimal oder häufiger

Hatten Sie während der letzten Woche Probleme, mit genügend Schwung die üblichen Alltagsaufgaben zu erledigen?

- ☐ keine Probleme
- ☐ kaum Probleme
- ☐ etwas Probleme
- ☐ große Probleme

Fragebogen zum Schlafverhalten

Wie gut konnten Sie in der letzten Wochen schlafen?

Bitte beachten Sie: Diese Fragen beziehen sich nur auf Arbeitstage!

Wann sind Sie während der letzten Woche gewöhnlich abends ins Bett gegangen?	übliche Uhrzeit:
Wie lange hat es während der letzten Woche gewöhnlich gedauert, bis Sie nachts eingeschlafen sind?	 Minuten
Wann sind Sie während der letzten Woche gewöhnlich morgens aufgestanden?	übliche Uhrzeit:
Wie viele Stunden haben Sie während der letzten Woche pro Nacht tatsächlich geschlafen? (Das muss nicht mit der Anzahl der Stunden, die Sie im Bett verbracht haben, übereinstimmen.)	 Stunden pro Nacht
Wie oft konnten Sie nicht innerhalb von 30 Minuten einschlafen?	☐ gar nicht ☐ einmal oder zweimal ☐ dreimal oder häufiger
Wie oft sind Sie mitten in der Nacht oder sehr früh morgens aufgewacht?	☐ gar nicht ☐ einmal oder zweimal ☐ dreimal oder häufiger
Wie lange brauchten Sie morgens nach dem Aufstehen gewöhnlich, bis Sie sich richtig frisch fühlten?	 Minuten
Wie würden Sie insgesamt die Qualität Ihres Schlafes während der letzten Woche beurteilen?	☐ sehr gut ☐ ziemlich gut ☐ ziemlich schlecht ☐ sehr schlecht
Wie oft haben Sie während der letzten Woche Schlafmittel eingenommen (vom Arzt verschriebene oder frei verkäufliche)?	☐ gar nicht ☐ einmal oder zweimal ☐ dreimal oder häufiger
Welche außergewöhnlichen Ereignisse könnten Ihren Schlaf in der letzten Woche beeinflusst haben (Feierlichkeiten, Krankheit, Prüfung)?	

Fragebogen zur Beleuchtung

Wir bitten Sie nun, das Licht an Ihrem Arbeitsplatz zu bewerten. Die Aussagen sind in Form der folgenden Skala gegeben, innerhalb der sie bitte ankreuzen:

Beispiel

Gestern war das Wetter ...

sehr gut	ooooooooooooooooooooXoo	sehr schlecht
----------	-------------------------	---------------

Die dargebotene Lichtsituation ...

gefällt mir	ooooooooooooooooooooooo	gefällt mir nicht
-------------	-------------------------	-------------------

fördert meine Aufmerksamkeit	ooooooooooooooooooooooo	lenkt mich eher ab
---------------------------------	-------------------------	--------------------

belebt mich	ooooooooooooooooooooooo	ermüdet mich
-------------	-------------------------	--------------

belästigt mich	ooooooooooooooooooooooo	stört mich nicht
----------------	-------------------------	------------------

ermüdet mich	ooooooooooooooooooooooo	ermuntert mich
--------------	-------------------------	----------------

ist unauffällig	ooooooooooooooooooooooo	ist zu grell
-----------------	-------------------------	--------------

ist zum Arbeiten ausreichend hell	ooooooooooooooooooooooo	ist zum Arbeiten zu dunkel
--------------------------------------	-------------------------	-------------------------------

ist aufdringlich	ooooooooooooooooooooooo	fällt mir kaum auf
------------------	-------------------------	--------------------

bewirkt einen dunklen Raumeindruck	ooooooooooooooooooooooo	bewirkt einen hellen Raumeindruck
---------------------------------------	-------------------------	--------------------------------------

blendet mich stark	ooooooooooooooooooooooo	blendet mich nicht
--------------------	-------------------------	--------------------

hat eine angenehme Lichtfarbe	ooooooooooooooooooooooo	hat eine unangenehme Lichtfarbe
----------------------------------	-------------------------	------------------------------------

verursacht störende Farbunterschiede	ooooooooooooooooooooooo	verursacht keine merkbaren Farbunterschiede
---	-------------------------	--

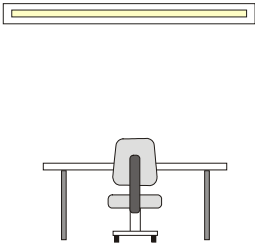
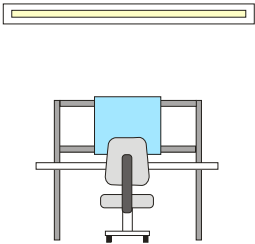
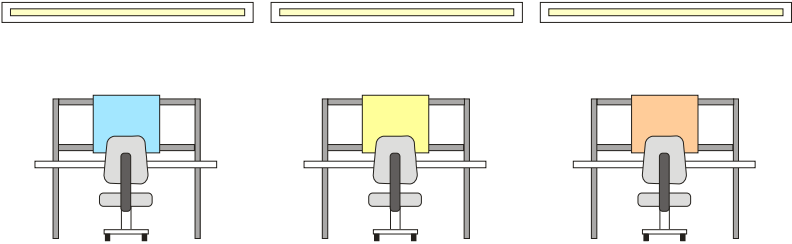
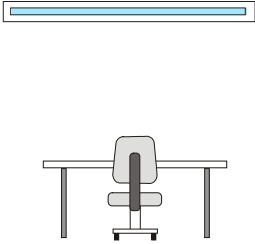
Probanden-Nummer:

Abschlussfragebogen

Wie haben Ihnen die einzelnen Lichtsituationen gefallen? Bewerten Sie bitte mit den Schulnoten:

1 ... sehr gut

5 ... sehr schlecht

	Lichtsituation	Note
A	bestehende Situation 	
B	Lichtsituation mit zusätzlicher Flächenleuchte mit statischer Lichtfarbe 	
C	Lichtsituation mit zusätzlicher Flächenleuchte mit sich verändernder Lichtfarbe 	
D	bestehende Situation mit gewechselten Lampen 	

Haben Sie Unterschiede zwischen den einzelnen Lichtsituationen hinsichtlich Ihres Wohlbefindens, Ihrer Aktiviertheit und Schlafqualität wahrgenommen?

- ☐ ja
- ☐ nein

Unter welche der erlebten Lichtsituationen haben Sie sich am wohlsten gefühlt? (Zuordnung siehe 1. Seite)

- ☐ A
- ☐ B
- ☐ C
- ☐ D
- ☐ keine von diesen

Wenn Sie die Wahl hätten, welche der erlebten Lichtsituationen würden Sie für Ihre Arbeit bevorzugen? (Zuordnung siehe 1. Seite)

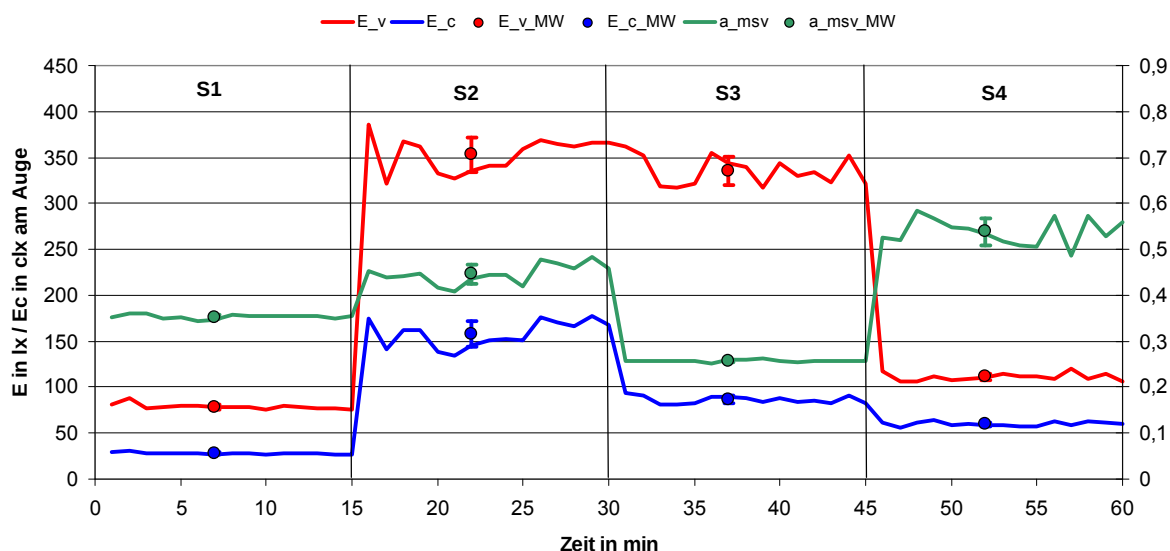
- ☐ A
- ☐ B
- ☐ C
- ☐ D
- ☐ keine von diesen

Haben Sie sonst noch Anmerkungen zum Versuch?

9.5 Messergebnisse der LuxBlick-Messungen

9.5.1 Labormessungen

LAP Luxblickmessung 1500 cd/m²



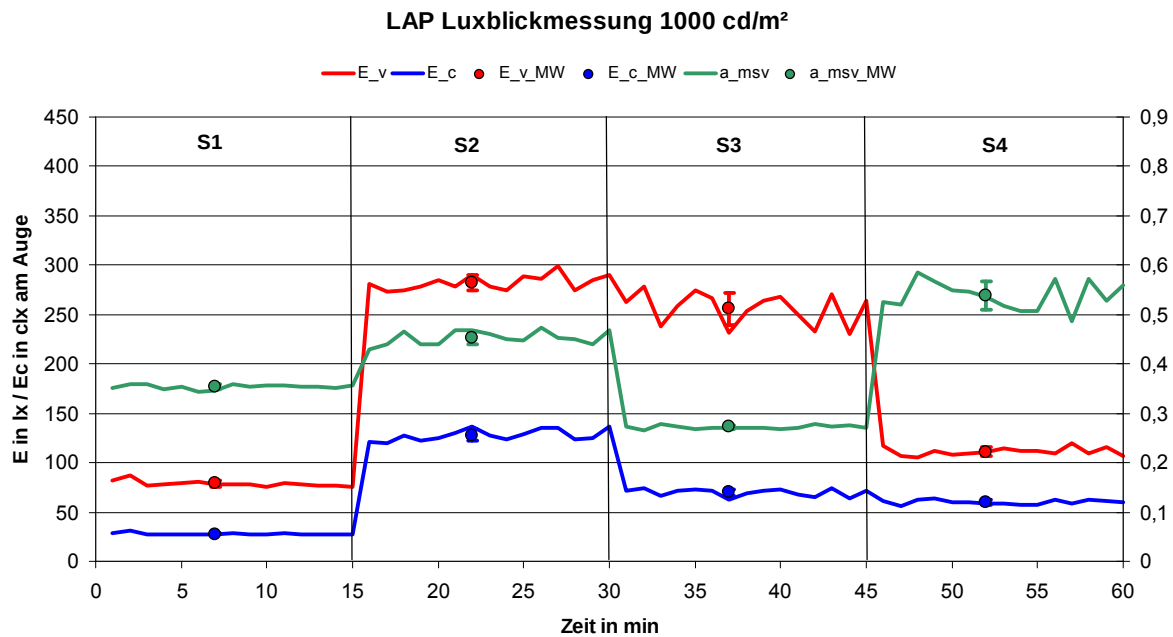
LAP 100%	S1	S2	S3	S4
E_{Auge} in lx (MW)	78,8	353,4	335,6	111,2
E_{Auge} in lx (STABW)	2,9	18,7	15,4	4,1
Messdauer in min	15	15	15	15
E_{ms_Auge} in W/m ² (MW)	0,04	0,23	0,13	0,09
E_{ms_Auge} in W/m ² (STABW)	0,00	0,02	0,01	0,00
Messdauer in min	15	15	15	15
a_{ms_Auge} (MW)	0,35	0,45	0,26	0,54
a_{ms_Auge} (STABW)	0,00	0,02	0,00	0,03
Messdauer in min	15	15	15	15

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_{45° in lx	122	293	293	297	118	122
$E_{ms\ 45^\circ}$ in W/m ²	0,09	0,33	0,33	0,17	0,15	0,09
$a_{ms\ 45^\circ}$	0,48	0,76	0,76	0,39	0,84	0,48
E_{Auge} in lx	79	353	353	336	111	79
$E_{ms\ Auge}$ in W/m ²	0,04	0,23	0,23	0,13	0,09	0,04
$a_{ms\ Auge}$	0,35	0,45	0,45	0,26	0,54	0,35
E_{Auge}/E_{45°	0,65	1,20	1,20	1,13	0,94	0,65
$E_{ms\ Auge}/E_{ms\ 45^\circ}$	0,46	0,71	0,71	0,77	0,62	0,46

Specbos
LuxBlick



Abbildung 40: LuxBlick-Messung über jeweils 15 Minuten am Laborarbeitsplatz mit einer Leuchtdichte von $L = 1500 \text{ cd/m}^2$ der Flächenleuchte während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen



LAP 67%	S1	S2	S3	S4
E _{Auge} in lx (MW)	78,8	282,6	256,2	111,2
E _{Auge} in lx (STABW)	2,9	7,6	16,3	4,1
Messdauer in min	15	15	15	15
E _{ms_Auge} in W/m ² (MW)	0,04	0,19	0,10	0,09
E _{ms_Auge} in W/m ² (STABW)	0,00	0,01	0,01	0,00
Messdauer in min	15	15	15	15
a _{ms_Auge} (MW)	0,35	0,45	0,27	0,54
a _{ms_Auge} (STABW)	0,00	0,01	0,00	0,03
Messdauer in min	15	15	15	15

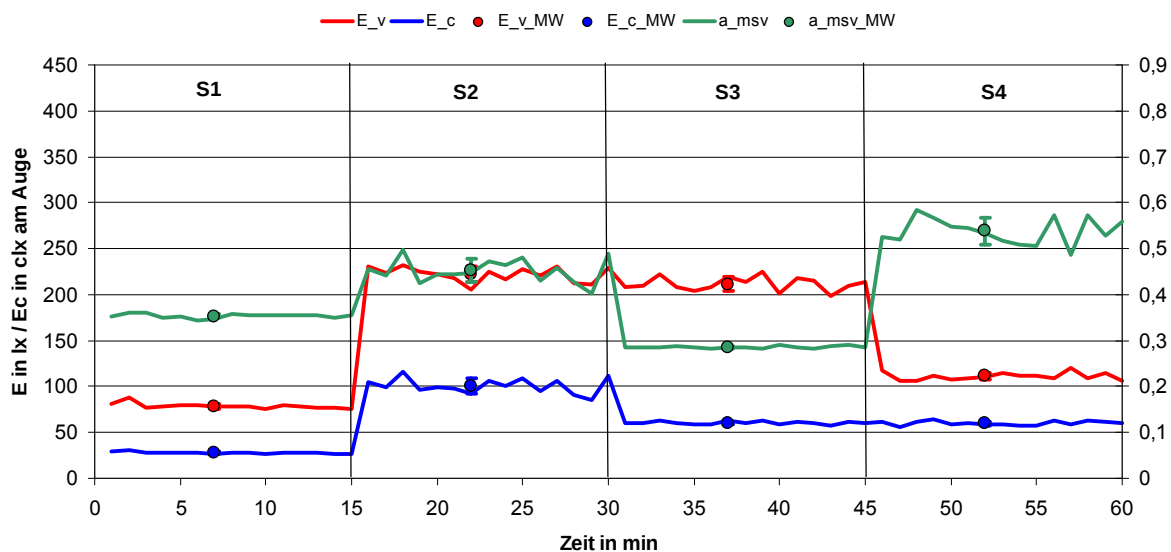
Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E _{45°} in lx	122	250	250	241	118	122
E _{ms 45°} in W/m ²	0,09	0,26	0,26	0,14	0,15	0,09
a _{ms 45°}	0,48	0,71	0,71	0,41	0,84	0,48
E _{Auge} in lx	79	283	283	256	111	79
E _{ms Auge} in W/m ²	0,04	0,19	0,19	0,10	0,09	0,04
a _{ms Auge}	0,35	0,45	0,45	0,26	0,54	0,35
E _{Auge} /E _{45°}	0,65	1,13	1,13	1,06	0,94	0,65
E _{ms Auge} /E _{ms 45°}	0,46	0,73	0,73	0,70	0,62	0,46

Specbos

LuxBlick



Abbildung 41: LuxBlick-Messung über jeweils 15 Minuten am Laborarbeitsplatz mit einer Leuchtdichte von $L = 1000 \text{ cd/m}^2$ der Flächenleuchte während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen

LAP Luxblickmessung 750 cd/m²

LAP 50%	S1	S2	S3	S4
E_{Auge} in lx (MW)	78,8	222,1	211,5	111,2
E_{Auge} in lx (STABW)	2,9	7,8	7,3	4,1
Messdauer in min	15	15	15	15
E_{ms_Auge} in W/m ² (MW)	0,04	0,15	0,09	0,00
E_{ms_Auge} in W/m ² (STABW)	0,00	0,01	0,00	0,00
Messdauer in min	15	15	15	15
a_{ms_Auge} (MW)	0,35	0,45	0,29	0,54
a_{ms_Auge} (STABW)	0,00	0,03	0,00	0,03
Messdauer in min	15	15	15	15

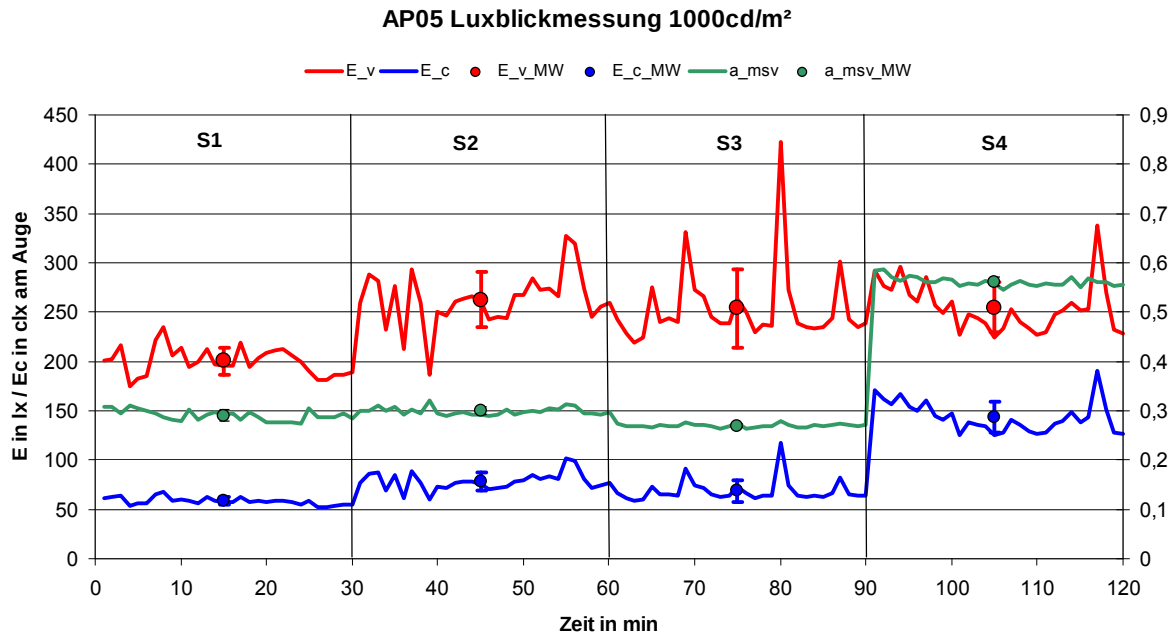
Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_{45° in lx	122	215	215	202	118	122
$E_{ms\ 45^\circ}$ in W/m ²	0,09	0,22	0,22	0,13	0,15	0,09
$a_{ms\ 45^\circ}$	0,48	0,69	0,69	0,43	0,84	0,48
E_{Auge} in lx	79	222	222	211	111	79
$E_{ms\ Auge}$ in W/m ²	0,04	0,15	0,15	0,09	0,09	0,04
$a_{ms\ Auge}$	0,35	0,45	0,45	0,26	0,54	0,35
E_{Auge}/E_{45°	0,65	1,03	1,03	1,04	0,94	0,65
$E_{ms\ Auge}/E_{ms\ 45^\circ}$	0,46	0,69	0,69	0,70	0,62	0,46

Specbos
LuxBlick



Abbildung 42: LuxBlick-Messung über jeweils 15 Minuten am Laborarbeitsplatz mit einer Leuchtdichte von $L = 750 \text{ cd/m}^2$ der Flächenleuchte während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen

9.5.2 Feldexperiment



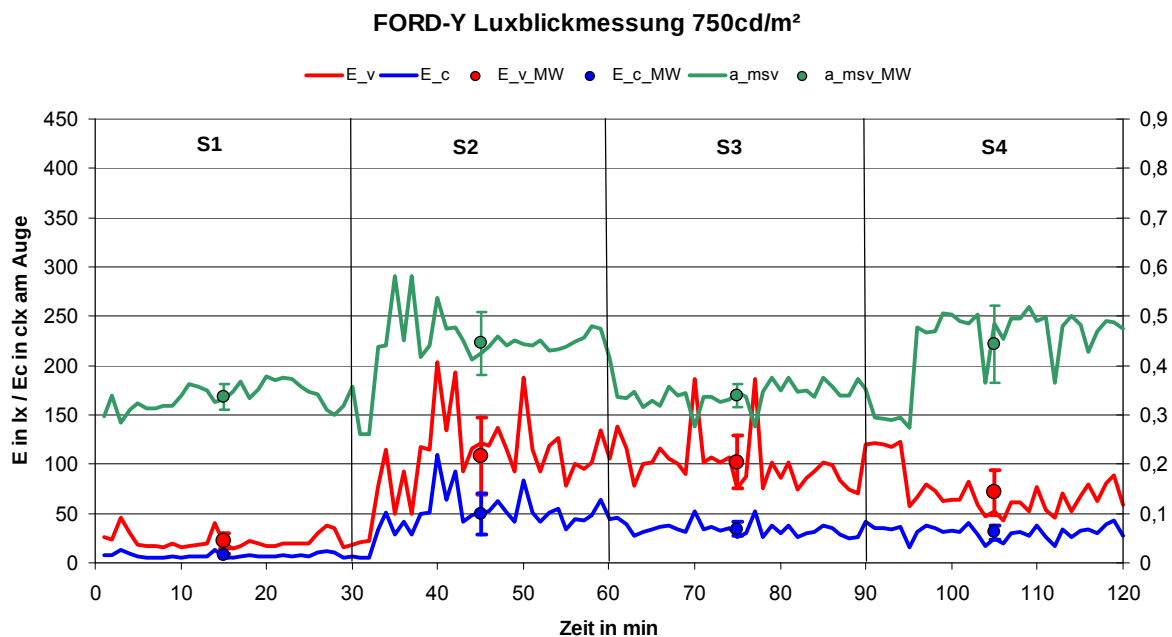
AP05 (HMW)	S1	S2	S3	S4
E _{Auge} in lx (MW)	200,2	262,7	254,0	255,0
E _{Auge} in lx (STABW)	14,2	27,5	40,1	25,2
Messdauer in min	30	30	30	30
E _{ms_Auge} in W/m ² (MW)	0,09	0,12	0,10	0,21
E _{ms_Auge} in W/m ² (STABW)	0,01	0,01	0,02	0,02
Messdauer in min	30	30	30	30
a _{ms_Auge} (MW)	0,29	0,30	0,27	0,56
a _{ms_Auge} (STABW)	0,01	0,01	0,00	0,01
Messdauer in min	30	30	30	30

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E _{45°} in lx	95,9	200,0	200,0	194,0	117,4	95,9
E _{ms 45°} in W/m ²	0,05	0,17	0,17	0,09	0,13	0,05
a _{ms 45°}	0,39	0,59	0,59	0,33	0,75	0,39
E _{Auge} in lx	200	263	263	254	255	200
E _{ms Auge} in W/m ²	0,09	0,12	0,12	0,10	0,21	0,08
a _{ms Auge}	0,29	0,30	0,30	0,27	0,56	0,29
E _{Auge} /E _{45°}	2,09	1,32	1,32	1,31	2,17	2,09
E _{ms Auge} /E _{ms 45°}	1,65	0,67	0,67	1,06	1,63	1,55

Specbos
LuxBlick



Abbildung 43: LuxBlick-Messung über jeweils 30 Minuten am Arbeitsplatz AP05 (HMW) mit einer Leuchtdichte von $L = 1000 \text{ cd/m}^2$ der Flächenleuchte während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen



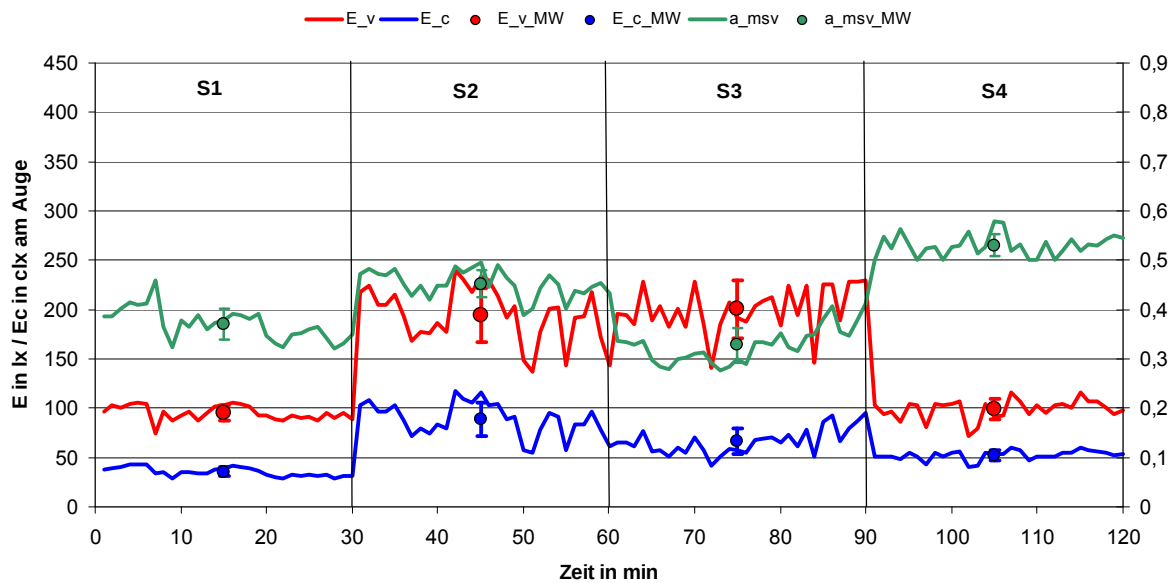
FORD-Y	S1	S2	S3	S4
E_{Auge} in lx (MW)	22,2	108,0	102,4	71,4
E_{Auge} in lx (STABW)	8,1	38,7	27,0	22,5
Messdauer in min	30	30	30	30
$E_{\text{ms_Auge}}$ in W/m ² (MW)	0,01	0,07	0,05	0,04
$E_{\text{ms_Auge}}$ in W/m ² (STABW)	0,00	0,03	0,01	0,01
Messdauer in min	30	30	30	30
$a_{\text{ms_Auge}}$ (MW)	0,34	0,44	0,34	0,44
$a_{\text{ms_Auge}}$ (STABW)	0,03	0,06	0,02	0,08
Messdauer in min	30	30	30	30

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_{45° in lx	15	107	107	109	65	84
$E_{\text{ms } 45^\circ}$ in W/m ²	0,01	0,09	0,09	0,06	0,07	0,05
$a_{\text{ms } 45^\circ}$	0,40	0,56	0,56	0,38	0,68	0,38
E_{Auge} in lx	22	108	108	102	71	-
$E_{\text{ms Auge}}$ in W/m ²	0,01	0,07	0,07	0,05	0,04	-
$a_{\text{ms Auge}}$	0,34	0,44	0,44	0,34	0,44	-
$E_{\text{Auge}}/E_{45^\circ}$	1,47	1,01	1,01	0,94	1,10	
$E_{\text{ms Auge}}/E_{\text{ms } 45^\circ}$	1,00	0,78	0,78	0,83	0,57	

Spechos
LuxBlick



Abbildung 44: LuxBlick-Messung über jeweils 30 Minuten an den Arbeitsplätzen AP23 bis AP29 (FORD-Y) mit einer Leuchtdichte von $L = 750 \text{ cd/m}^2$ der Flächenleuchte während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen

FORD-AP33 Luxblickmessung 1500cd/m²

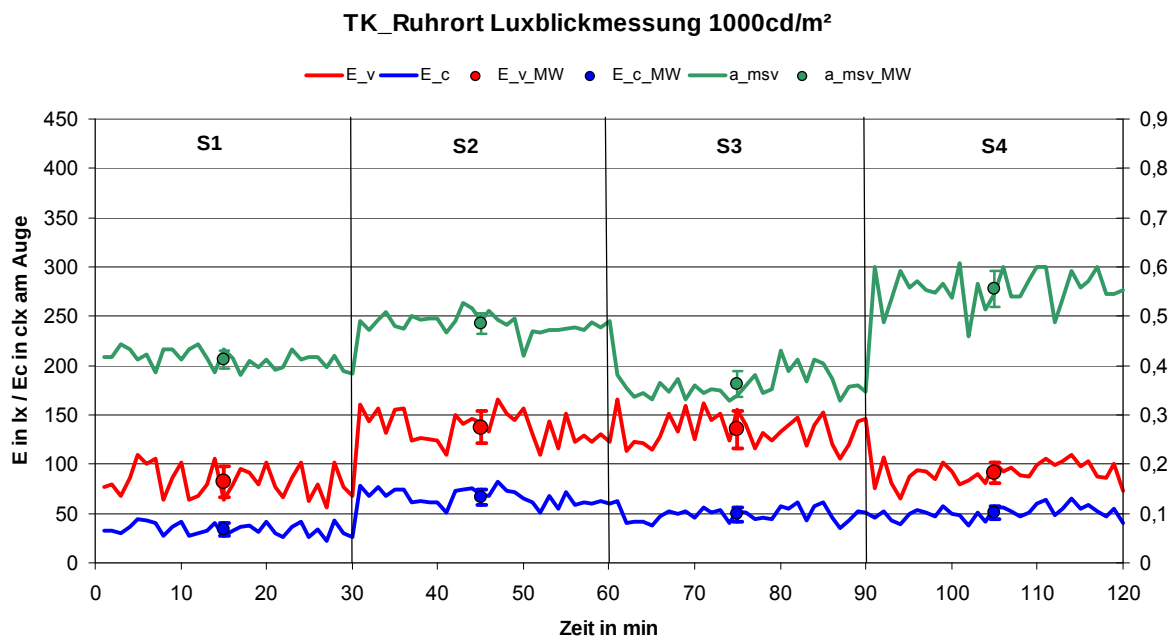
AP33 (FORD-A)	S1	S2	S3	S4
E _{Auge} in lx (MW)	95,2	194,3	200,6	99,1
E _{Auge} in lx (STABW)	7,4	27,9	29,0	9,9
Messdauer in min	30	30	30	30
E _{ms_Auge} in W/m ² (MW)	0,05	0,13	0,10	0,08
E _{ms_Auge} in W/m ² (STABW)	0,01	0,03	0,02	0,01
Messdauer in min	30	30	30	30
a _{ms_Auge} (MW)	0,37	0,45	0,33	0,53
a _{ms_Auge} (STABW)	0,03	0,03	0,04	0,02
Messdauer in min	30	30	30	30

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E _{45°} in lx	106	291	291	192	90	106
E _{ms 45°} in W/m ²	0,07	0,29	0,29	0,11	0,09	0,07
a _{ms 45°}	0,45	0,68	0,68	0,38	0,69	0,45
E _{Auge} in lx	95	194	194	201	99	95
E _{ms Auge} in W/m ²	0,05	0,13	0,13	0,10	0,08	0,05
a _{ms Auge}	0,37	0,45	0,45	0,33	0,53	0,37
E _{Auge} /E _{45°}	0,90	0,67	0,67	1,05	1,10	0,90
E _{ms Auge} /E _{ms 45°}	0,71	0,45	0,45	0,91	0,89	0,71

Spechos
LuxBlick



Abbildung 45: LuxBlick-Messung über jeweils 30 Minuten am Arbeitsplatz AP33 (FORD-A) mit einer Leuchtdichte von $L = 1500 \text{ cd/m}^2$ der Flächenleuchte während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen



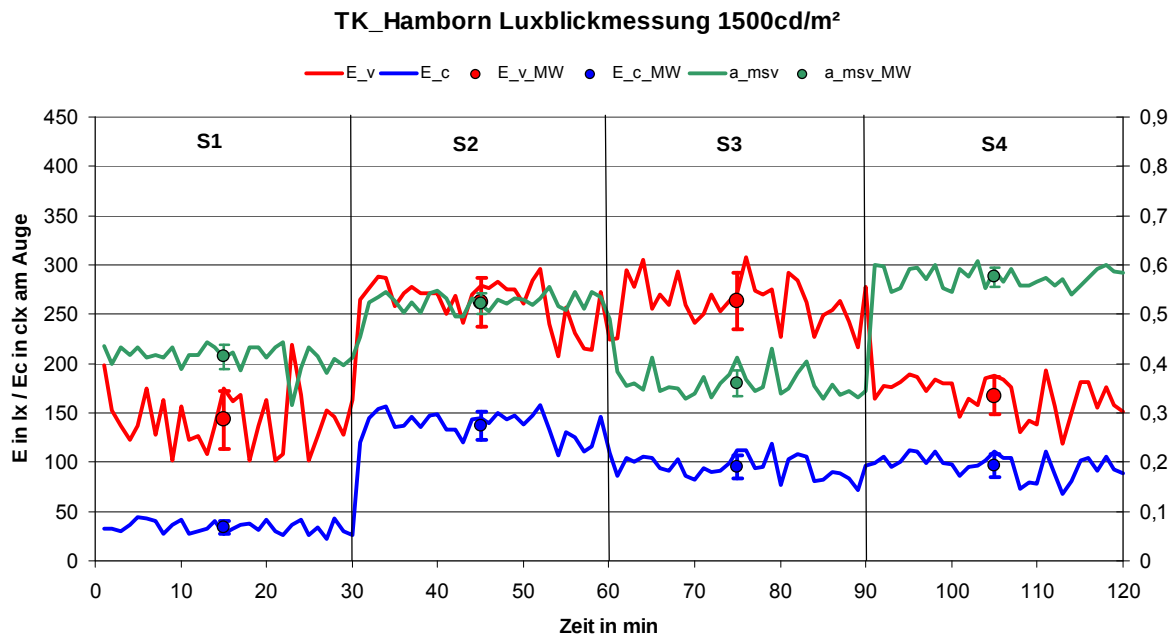
TK_Ruhrort	S1	S2	S3	S4
E_{Auge} in lx (MW)	82,6	137,4	135,1	91,5
E_{Auge} in lx (STABW)	15,7	15,9	18,4	10,7
Messdauer in min	30	30	30	30
$E_{\text{ms_Auge}}$ in W/m ² (MW)	0,05	0,10	0,07	0,07
$E_{\text{ms_Auge}}$ in W/m ² (STABW)	0,01	0,01	0,01	0,01
Messdauer in min	30	30	30	30
$a_{\text{ms_Auge}}$ (MW)	0,41	0,49	0,36	0,56
$a_{\text{ms_Auge}}$ (STABW)	0,02	0,02	0,03	0,04
Messdauer in min	30	30	30	30

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E_{45° in lx	108	167	167	162	96	108
$E_{\text{ms } 45^\circ}$ in W/m ²	0,09	0,20	0,20	0,10	0,07	0,07
$a_{\text{ms } 45^\circ}$	0,56	0,83	0,83	0,83	0,40	0,72
E_{Auge} in lx	83	137	137	135	92	83
$E_{\text{ms Auge}}$ in W/m ²	0,05	0,10	0,10	0,07	0,07	0,05
$a_{\text{ms Auge}}$	0,41	0,49	0,49	0,36	0,56	0,41
$E_{\text{Auge}}/E_{45^\circ}$	0,77	0,82	0,82	0,83	0,96	0,77
$E_{\text{ms Auge}}/E_{\text{ms } 45^\circ}$	0,56	0,50	0,50	0,70	1,00	0,71

Spechos
LuxBlick



Abbildung 46: LuxBlick-Messung über jeweils 30 Minuten an den Arbeitsplätzen AP11 bis AP14 (TK-RO) mit einer Leuchtdichte von $L = 1000 \text{ cd/m}^2$ der Flächenleuchte während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen



TK_Hamborn	S1	S2	S3	S4
E _{Auge} in lx (MW)	143,0	262,0	263,8	167,3
E _{Auge} in lx (STABW)	29,5	24,6	28,8	19,3
Messdauer in min	30	30	30	30
E _{ms_Auge} in W/m ² (MW)	0,05	0,20	0,14	0,14
E _{ms_Auge} in W/m ² (STABW)	0,01	0,02	0,02	0,02
Messdauer in min	30	30	30	30
a _{ms_Auge} (MW)	0,41	0,52	0,36	0,58
a _{ms_Auge} (STABW)	0,03	0,02	0,03	0,02
Messdauer in min	30	30	30	30

Situation	S1	S2	S3_1	S3_2	S4	S5
E _{45°} in lx	197	297	297	267	209	197
E _{ms 45°} in W/m ²	0,12	0,31	0,31	0,13	0,23	0,12
a _{ms 45°}	0,40	0,71	0,71	0,32	0,76	0,40
E _{Auge} in lx	143	262	262	263	167	143
E _{ms Auge} in W/m ²	0,05	0,20	0,20	0,14	0,14	0,05
a _{ms Auge}	0,41	0,52	0,52	0,36	0,58	0,41
E _{Auge} /E _{45°}	0,73	0,88	0,88	0,99	0,80	0,73
E _{ms Auge} /E _{ms 45°}	0,42	0,65	0,65	1,08	0,61	0,42

Spechos
LuxBlick



Abbildung 47: LuxBlick-Messung über jeweils 30 Minuten an den Arbeitsplätzen AP15 bis AP22 (TK-HB) mit einer Leuchtdichte von $L = 1500 \text{ cd/m}^2$ der Flächenleuchte während unterschiedlicher Beleuchtungssituationen