

A Holistic Approach to Energy Efficiency and Lighting Quality in Office Spaces

Dipl.-Ing. Raphael Kirsch, MSc

TU Berlin, FG Lichttechnik

raphael.kirsch@tu-berlin.de

1 Einleitung

Beleuchtungsanlagen in Bürogebäuden können bis zu 50% des gesamten Stromverbrauchs des Gebäudes ausmachen (Schmidt, 2010). Daher ist eine Verbesserung der Energieeffizienz der Beleuchtung in Bürogebäuden eine effektive Maßnahme zur Energieeinsparung (McKinsey, 2010). Die Europäische Richtlinie für die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) und die nationalen und europäischen Umsetzungen EN 15193 und DIN V 18599 (EN 15193, 2005), (DIN V 18599, 2011) definieren Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Nutzenergiebedarfs von Beleuchtungsanlagen. Um zu jeder Zeit qualitativ hochwertige Beleuchtung zu gewährleisten, beziehen sich beide Standards auf die europäische Norm EN 12464-1 "Beleuchtung von Arbeitsplätzen" (EN 12464-1, 2011) als Mindestanforderung für die Qualität der Beleuchtung. Die EN 12464-1 definiert Mindestwerte für horizontale, vertikale und zylindrische Beleuchtungsstärken auf verschiedenen Raumboberflächen und in verschiedenen Bereichen im Raum sowie Mindestanforderungen für Blendungsbegrenzung, Modelling und Farbwiedergabe. In der Praxis wird aufgrund eines steigenden Bewusstseins für Energieeffizienz oft versucht, diese Vorgaben so genau wie möglich einzuhalten. Bis vor einigen Jahren waren Leuchtstofflampen Stand der Technik in der Innenbeleuchtung. Die relativ große Ausdehnung dieser Lichtquellen schränkt die Entwicklung hocheffizienter optischer Systeme ein. Auch mit der aktuellsten Reflektor-Technologie wird ein gewisses Maß an Streulicht immer in den gesamten Raum abgegeben. In der Regel optimiert ein Lichtplaner die Beleuchtungsanlage auf horizontale Beleuchtungsstärken im Bereich der Sehaufgabe und übererfüllt damit fast sicher die Mindestanforderungen für Beleuchtungsstärken auf anderen Raumboberflächen. Da die Helligkeit der Raumbegrenzungsflächen laut aktueller Forschung (Veitch, 2010), (Tralau, 2010) u. a. ein Qualitätskriterium für Beleuchtung ist, kann Streulicht in diesem Fall helfen, die Lichtsituation zu verbessern. In den letzten Jahren werden immer mehr Büroräume mit LED-Beleuchtungsanlagen eingerichtet. Als fast punktförmige Lichtquelle ermöglichen LEDs neue optische Systeme mit höherer Genauigkeit, effizienterer Lichtlenkung und damit weniger Streulicht im Vergleich zu herkömmlichen Reflektor-Technologie. Lichtstärkeverteilungskurven können mit einer höheren Auflösung und Vielfalt gestaltet werden und könnten Licht ausschließlich auf die gewünschten Oberflächen lenken. Theoretisch könnte ein stark angepasstes LED-Beleuchtungssystem für einen bestimmten Büroraum alle Mindestanforderungen der EN 12464-1 genau einhalten, was zu einer völlig Norm-konformen Installation mit minimalem Energieverbrauch führt.

Obwohl sich hier ein großes Energieeinsparpotential ergibt, muss die Frage gestellt werden, ob eine genaue Einhaltung der Vorgaben der EN 12464-1 ausreichende Beleuchtungsqualität gewährleistet und ob eine solche Anlage als energieeffizient betrachtet werden kann.

2 Literaturstudie

2.1 Energieeffizienz

In der aktuellen Forschung werden verschiedene Definitionen und Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz gegeben.

Veitch (Veitch, 2010) definiert drei sich überschneidende Bereiche einer Beleuchtungsanlage: Wirtschaft, Architektur und das individuelle Wohlbefinden. Die Schnittmenge aller Bereiche ist die Beleuchtungsqualität. So ist Energieeffizienz eine Teilmenge der Qualität der Beleuchtung und umgekehrt.

Loe (Loe, 2009) beschreibt wichtige Faktoren, die für eine energieeffiziente Beleuchtungsanlage berücksichtigt werden sollten. Neben vielen typischen für den Energieverbrauch relevanten Funktionen wie Lichtausbeute der Lampen und Leuchteneffizienz beschreibt er weitere Aspekte, wie Wohlbefinden und biologische Wirksamkeit, die ebenfalls Auswirkungen auf die Energieeffizienz haben. Bei diesem Ansatz wird ein visueller Wirkungsgrad definiert, also die Menge an Energie, die benötigt wird um ein gewisses Maß an Beleuchtungsqualität zu erreichen. Energieeffiziente Beleuchtungssysteme dürfen nicht auf Kosten der Lichtqualität den Energieverbrauch verringern, sondern müssen alle Qualitätsaspekte mit dem Einsatz von effizienten Lampen, Vorschaltgeräten und Steuerungssystemen erfüllen. Die Berücksichtigung der visuellen Effizienz einer Beleuchtungssituation wird auch von Goodman (Goodman, 2009) für die Bestimmung der Energieeffizienz von Lampen und Leuchten gefordert.

EN 12464-1 verbindet Lichtqualität und Energieeffizienz: " Eine Beleuchtungsanlage sollte die Beleuchtungsanforderungen einer bestimmten Aufgabe oder eines Raumes auf energieeffiziente Art erfüllen. Es ist wichtig, die visuellen Gesichtspunkte einer Beleuchtungsanlage nicht zu gefährden, nur um auf einfache Art den Energieverbrauch zu senken. Beleuchtungsniveaus wie sie in dieser Europäischen Norm festgelegt sind, sind Mindestwerte der mittleren Beleuchtungsstärke und müssen beibehalten werden. "(EN 12464-1, 2011).

Zusammenfassend sind sich die meisten Autoren und Standards einig über die Tatsache, dass Energieeffizienz nur erreicht werden kann, wenn die gesamte Beleuchtungsqualität unter Einbeziehung von „human factors“ betrachtet wird. Per Definition bedeutet Energieeffizienz nicht nur die einfache Verringerung des Energieverbrauchs. Um zu entscheiden, ob eine Bürobeleuchtungsanlage gemäß EN 12464-1 als energieeffizient eingeordnet werden kann, wenn alle Mindestanforderungen genau eingehalten werden, ist es notwendig, zu untersuchen, ob allgemeine Gütemerkmale der Beleuchtungsqualität durch eine solche Installation berücksichtigt werden.

2.2 Beleuchtungsqualität in Büroräumen

Voraussetzungen für die horizontale und vertikale Beleuchtungsstärken an einem typischen Bildschirmarbeitsplatz nach EN 12464-1 sind:

Tabelle 1: Anforderungen an die Beleuchtung nach EN 12464-1

	Task area	Umgebungsbereich	Wände	Decke
Beleuchtungsstärke	500 lux	300 lux	75 lux	50 lux
Gleichmäßigkeit U0/g1	0,6	0,4	0,1	0,1

2.2.1 Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe

Eine Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe von 500 Lux wird von den meisten aktuellen Standards wie IESNA RP-1 (IESNA, 2004) und EN 12464-1 empfohlen. Osterhaus (Osterhaus, 1993) beschreibt eine Verringerung der Beleuchtungsstärke-Empfehlungen in diesem Bereich von 25 bis 50% seit 1973. Die Beleuchtungsniveaus werden vor allem für Bildschirmarbeitsplätze, "wahrscheinlich für eine effizientere Gestaltung weiter reduziert werden [...]".

Eine Beleuchtungsstärke von 500 Lux im Aufgabenbereich ist allgemein anerkannt, und in einigen Fällen mehr als ausreichend.

2.2.2 Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich

Nach EN 12464-1 muss die Beleuchtungsstärke in Umgebungsbereichen der Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe angepasst werden, um eine "ausgewogene Adaptationsleuchtdichte" und "eine ausgewogene Helligkeitsverteilung im Gesichtsfeld" zu schaffen (12464-1, 2011). Eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke in der Umgebung führt zu höheren Leuchtdichten im Gesichtsfeld. Eine erhöhte Leuchtdichte des Bodens und vom Boden reflektiertes Licht auf anderen Oberflächen tragen zu einer Änderung in Adaptationsleuchtdichte bei. Jedoch ist die optische Wirksamkeit der Beleuchtungsstärke auf Nutzenebene und Boden gering. Durch den geringen Reflexionsgrad von etwa 20% werden nur kleine Änderungen im Helligkeitsniveau erreicht, da das meiste Licht absorbiert und so nur einmal verwendet wird.

Forschung von Houser et al (Houser, 2002), Loe (Loe, 1991) und Flynn (Flynn, 1977) zeigt auch, dass die Helligkeit des Bodens mit der Wahrnehmung der allgemeinen Raumhelligkeit deutlich schwächer korreliert, als für andere Raumboflächen. Dies legt nahe, dass eine verminderte Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene, insbesondere in der Umgebung bei gleichzeitiger Erhöhung der Wand- und Deckenleuchtdichte eine höhere optische Effizienz aufweist.

2.2.3 Helligkeit der Wände / Hintergrund

Typische Reflexionsvermögen von Raumbegrenzungsflächen sind 70/50/20% für Decke / Wände / Boden einschließlich Möbel und anderer Gegenstände im Raum. Das Reflexionsverhalten konventioneller Wand- und Deckenanstriche kann annähernd durch Lambert'sche Reflexion beschrieben werden, in der sich die Leuchtdichte aus der Beleuchtungsstärke gemäß (1) ergibt.

$$L = \rho \cdot \frac{E}{\pi} \quad (1)$$

wobei

L die Leuchtdichte einer Oberfläche, E die Beleuchtungsstärke auf dieser Oberfläche und ρ der Reflexionsgrad dieser Oberfläche sind.

Dies resultiert in Wand- und Deckenleuchtdichten von 11 bis 12 cd/m² für Beleuchtungsstärken von 75 Lux und 50 lux.

Loe (Loe, 1994) beschreibt, dass der Übergang von einem dunklen zu einem hellen Raumeindruck bei einer Leuchtdichte von ca. 30 cd/m² in einem horizontalen, um 40° geöffneten Band auf Augenhöhe des Beobachters liegt. Newsham et al. (Newsham, 2005) beziehen sich auf die gleiche Forschung. Zum Erreichen einer „visual lightness“ sollte die bevorzugte mittlere Leuchtdichte in einem horizontalen 40° Band größer als 30 cd/m² sein. Die Leuchtdichten des 40°-Bandes beinhalten gewichtete Leuchtdichten der Wände, des Schreibtisches und gegebenenfalls des Computer-Bildschirms. Veitch und Newsham (Veitch, 2000a) untersuchten eine bevorzugte

mittlere Leuchtdichte von $39,2 \text{ cd/m}^2$ in dem gleichen Band. Houser et al. (Houser, 2002) deuten darauf hin, dass die Helligkeit der Wände und der Decke erheblich die Helligkeitswahrnehmung des ganzen Raumes beeinflusst.

Eine andere Herangehensweise ist die subjektive Messung von Düsternis oder Düsterteit („gloom“). „Gloom“ ist ein Phänomen, bei dem Nutzer einen Innenraum als unterbeleuchtet bewerten, obwohl die Beleuchtungsstärken im Bereich der Sehaufgabe ausreichend sind. Shepherd (Shepherd, 1992) kommt zu dem Schluss, dass „gloom“ in Beleuchtungssituationen mit niedrigen peripheren Leuchtdichten auftritt. Die Wahrnehmung von „gloom“ kann durch eine Kombination von hohen Leuchtdichten im Bereich der Sehaufgabe in Kombination mit niedrigen Leuchtdichten in angrenzenden, nicht für die Bearbeitung der Sehaufgabe relevanten Bereichen verstärkt werden. Dieser Effekt ergibt sich aus einem relativ hohen Adaptationsniveau in einer relativ dunklen Umgebung.

„Um eine ausgewogene Leuchtdichteverteilung zu erzeugen, müssen die Leuchtdichten auf allen Oberflächen berücksichtigt werden. Sie werden vom Reflexionsgrad der Oberflächen und der Beleuchtungsstärke auf den Oberflächen bestimmt. Um den Eindruck von Düsternis zu vermeiden und sowohl das Adaptationsniveau als auch den Sehkomfort anzuheben, sind – insbesondere an Wänden und Decken – helle Raumbooberflächen anzustreben.“

Neben der Beleuchtung der Sehaufgabe sollte das gesamte genutzte Raumvolumen beleuchtet werden.

Die Forschung zeigt, dass sich eine Hintergrundleuchtdichte im Bereich von 11 cd/m^2 negativ auf die Qualität der Beleuchtung auswirken kann. Es wird deutlich, dass die Mindestanforderungen der EN 12464-1 nicht gewährleisten können, dass ein ausreichendes Maß an Lichtqualität erreicht wird. Daher kann eine Beleuchtungsanlage, die die Anforderungen genau erfüllt, nicht automatisch als energieeffizient bezeichnet werden kann.

3 Hypothesen:

Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung der Lichtqualität und Energieeffizienz durch Beschreiben optimaler Lichtverteilungen in Büroräumen. Beleuchtungsqualität wird über den "appraisal path" (Boyce, 2003) evaluiert, der nicht notwendigerweise Einfluss auf die Sehleistung hat. Die Beleuchtungssituation beeinflusst die Stimmung und damit Wohlbefinden und Sehkomfort des Nutzers. Büroangestellte, die ihren Arbeitsplatz als visuell attraktiv einstufen, sind zufriedener mit ihrem Arbeitsumfeld. In der Studie behandelt werden Aspekte der Beleuchtungsqualität im Zusammenhang mit Helligkeitsverteilung und wahrgenommener Helligkeit. Alle Lichtverteilungen werden auf verschiedene Raumbooberflächen bezogen. Es gibt weit mehr Gütekriterien, die die Qualität der Beleuchtung und den Raumeindruck direkt beeinflussen, wie Flimmern, Modelling und spektrale Qualität des Lichts. Diese Studie betrachtet jedoch ausschließlich die Leuchtdichteverteilungen.

Abhängige Variablen sind Integration in die Architektur, Nutzerakzeptanz und wahrgenommene Beleuchtungsqualität, die als subjektive Beurteilung der Raumatmosphäre („room appearance“) zusammengefasst werden können. Die Evaluierung dieser Variablen ist integraler Bestandteil der Hypothesen dieses Experiments:

- Eine Reduzierung der Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich führt zu einer schlechteren Raumbewertung, die Effektgröße ist jedoch gering ($r < 0,2$)
- Eine Erhöhung der Leuchtdichte im Umgebungsbereich führt zu einer verbesserten Raumbewertung, die Effektgröße ist hoch ($r > 0,5$)
- Eine Verringerung der Umgebungsbeleuchtungsstärke und eine Erhöhung der Leuchtdichte auf Wänden und Decke kann zu einem verbesserten Raumeindruck führen, ohne mehr Energie zu verbrauchen

4 Methodik

4.1 Versuchsaufbau

Der Einfluss von Beleuchtung auf den Raumeindruck lässt sich im Probandenversuch untersuchen. Um Ergebnisse eines Versuches einer definierten Größe zuordnen zu können ist eine strikte Trennung unabhängiger, veränderlicher Parameter notwendig. Diese Studie findet im Lichtsimulator der TU Berlin in Form eines Büroaufbaus statt. Ziel des Aufbaus ist eine exakte Trennung der unabhängigen Variablen. Diffuses Plexiglas, hinterleuchtet mit über 1300 steuerbare LED-Panels bilden drei Wände und die Decke um pixelgenau die Leuchtdichteverteilungen im Gesichtsfeld zu steuern. Die vierte Wand enthält ein künstliches Fenster, welches für die folgenden Versuche dunkel gehalten wird. Sechs hochauflösende Projektoren in der Decke sorgen für definierte Beleuchtungsstärkeverteilungen auf der Arbeitsebene. Da die Projektoren kaum Streulicht abgeben, ist die bereitgestellte Beleuchtungsstärke auf die Nutzebene beschränkt. Alle Komponenten können gegeneinander abgeglichen werden, so dass Parameter wie Leuchtdichte auf Raumbegrenzungsflächen und Beleuchtungsstärkeverteilungen unabhängig voneinander exakt eingestellt werden können.

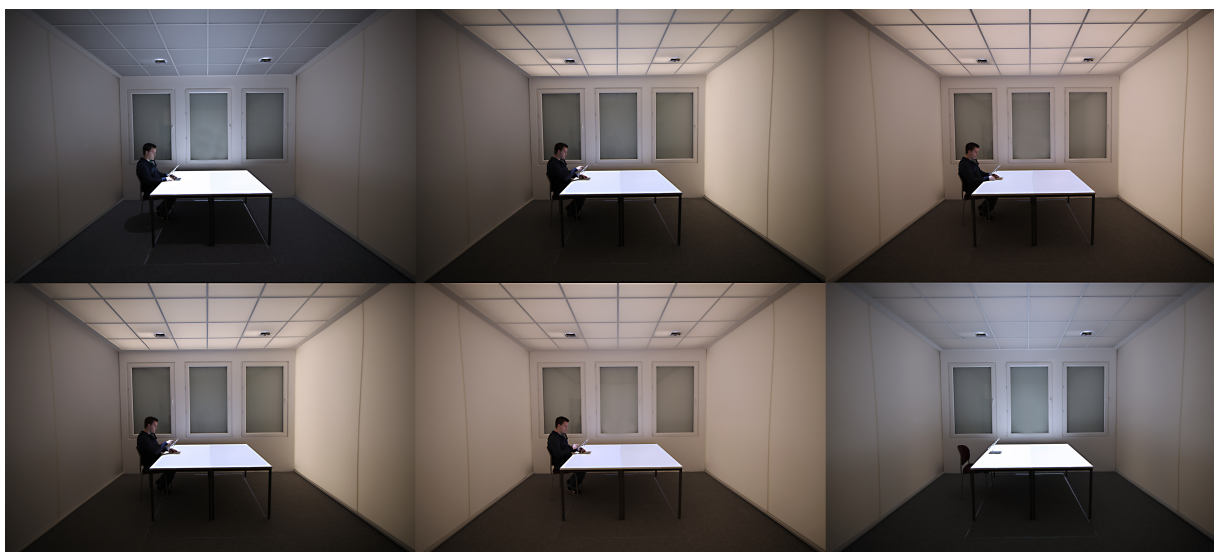


Abbildung 1: Der Beleuchtungssimulator an der TU Berlin

4.2 Versuchsablauf

Im Versuch ist die abhängige Variable die subjektive Beurteilung des Raumeindrucks („room appearance“). Unabhängige Variablen sind die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld einschließlich des Schreibtisches sowie die Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich.

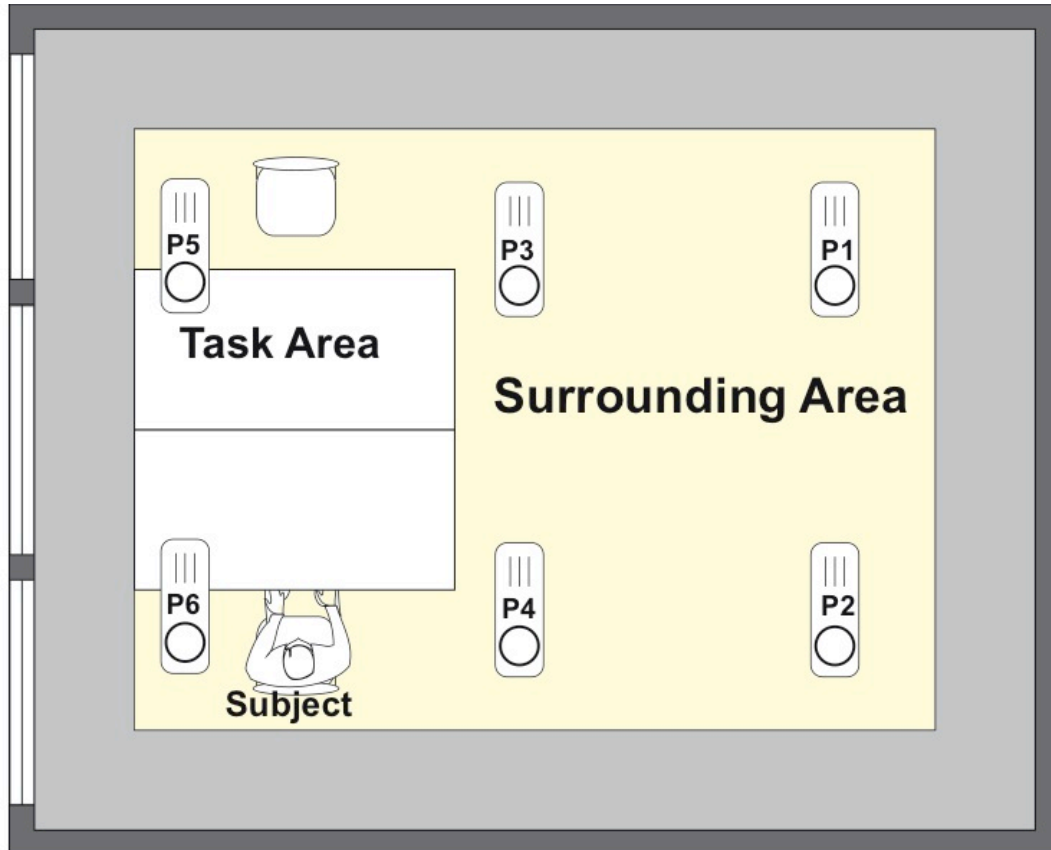


Abbildung 2: Versuchsaufbau mit Projektoren P1-P6

Die abhängige Variable wird mit Hilfe von Fragebögen untersucht, die für unterschiedliche Lichtszenen von Probanden ausgefüllt werden. Als Grundlage für den Fragebogen dient eine Kurzversion des „Room appearance judgment“-Fragebogens von Veitch und Newsham ((Veitch&Newsham, 1998). Dieser Fragebogen wurde mehrfach in Laborexperimenten und unter Feldbedingungen ausgewertet und optimiert. Mithilfe einer Faktorenanalyse wurden einzelne unabhängige Faktoren extrahiert, die den Raumeindruck beschreiben. Die Ergebnisse des Fragebogens sind daher geeignet, die abhängige Variable „room appearance“ in vereinfachter Weise zu evaluieren. Die Ergebnisse können mit aktueller Forschung verglichen werden.

Tabelle 2: Fragebogen zum Raumeindruck

Faktor	Negativ	Positiv
Attraktivität des Raumes	unattraktiv hässlich angenehm mögen bedrückend	attraktiv schön unangenehm nicht mögen fröhlich
Sichtbarkeit/Beleuchtung	definiert dunkel düster	diffus hell leuchtend

Zur Durchführung des Versuches wurde eigens ein Programm für einen Tablet-Computer beschrieben, das die Probanden nach einem bestimmten Zeitablauf durch den Versuch führt und die Versuchseinweisung enthält, um einen „experimenter bias“ auszuschließen. Alle Lichtszenen werden in randomisierter Reihenfolge präsentiert, um Reihenfolgenfehler zu vermeiden. Darüber hinaus wird die Orientierung der Skalen randomisiert. Bei jeder Szene hat der Proband zunächst fünf Minuten Zeit, sich in der Raumsituation zu orientieren und sich an die Beleuchtung zu gewöhnen. Während dieser Zeit muss eine bürotypische Aufgabe bearbeitet werden. Anschließend wird der Fragbogen mit kontinuierlichen Skalen auf dem Tablet-Computer präsentiert.

4.3 Operationalisierung

Der Versuch ist als 3x4 Experiment ausgelegt, bei dem drei verschiedene Beleuchtungsstärken im Umgebungsbereich und vier verschiedene Wandleuchtdichten in jeder möglichen Permutation präsentiert werden. Der Bereich der Sehaufgabe, in diesem Fall der Schreibtisch, bleibt in allen Szenen bei konstanten 500 lux mit einer Gleichmäßigkeit von $U_0 > 0,6$ in Anlehnung an EN 12464-1.

Die zwölf verschiedenen Lichtszenen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 3: Operationalisierung des Versuchsablaufs

Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich				
Leuchtdichte im Gesichtsfeld		300 lux	200 lux	100 lux
	11 cd/m ²	Szene 1	Szene 2	Szene 3
	30 cd/m ²	Szene 4	Szene 5	Szene 6
	50 cd/m ²	Szene 7	Szene 8	Szene 9
	75 cd/m ²	Szene 10	Szene 11	Szene 12

Die Beleuchtungsstärkewerte entsprechen den empfohlenen Schritten aus EN 12464-1. EN 12464-1 erfordert für Büroarbeitsplätze eine Mindestbeleuchtungsstärke im Umgebungsbereich von 300 lux, 100 lux entsprechen den Mindestempfehlungen für Verkehrswege.

5 Erwartete Ergebnisse

Die Versuche sind abgeschlossen, eine statistische Auswertung wird zurzeit durchgeführt.

Unter der Annahme, dass sich die Hypothesen bestätigen können die Ergebnisse können helfen, visuell effizientere Beleuchtungsparameter festzulegen, die die Qualität der Beleuchtung verbessern und gleichzeitig Energie einsparen können. Dieses Experiment soll zeigen, dass eine neue Technologie aktualisierte Normung und Standardisierungen benötigt um Qualitätsparameter zu erhalten und Vorteile optimal zu nutzen.

Quellen

BOYCE, PR. VEITCH, JA. NEWSHAM, GR. MYER, M. HUNTER, C. 2003. Lighting Quality and Office Work: A Field Simulation Study. *Report for the U.S. Department of Energy*

DIN 2011. DIN V 18599 - energy performance of buildings

DIN 2005. DIN EN 15193 - energy performance of buildings

DIN 2011. DIN EN 12464-1 - lighting of interior workplaces

EKLUND, NH. BOYCE, PR. The development of a reliable, valid, and simple office lighting survey. *J. Illum. Eng. Soc.* 1996 25: 25-40

ESCUYER, S. FONTOYNONT M. 2001. Lighting controls: a field study of office workers' reactions. *Lighting Research and Technology* 2001 33, 77-94 IESNA. 2004. American National Standard Practice for Office Lighting

FLYNN, JE. 1977. A study of the subjective responses to low energy and non-uniform lighting systems. *Lighting Design Application* 1977; 7: 167-79

GOODMAN, TM. 2009. Measurement and specification of lighting: A look at the future. *Lighting Research and Technology* 2009 41: 229-243

HOUSER, KW. TILLER, DK. BERNECKER, CA. MISTRICK, RG. 2002. The subjective response to linear fluorescent direct/indirect lighting systems. *Lighting Research and Technology* 2002 34: 243-260

LOE, DL, MANSFIELD, KP. ROWLANDS, E. 1991. Light patterns and their relevance to spatial appearance and the quality of the lit environment. *Proceedings CIE 22nd session (Melbourne)*. 1991; 2: 41-44.

LOE, DL. MANSFIELD; KP. ROWLANDS, E. 1994. Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study. *Lighting Research and Technology* 1994 26: 119-133

LOE, DL. 2009. Energy efficiency in lighting - considerations and possibilities. *Lighting Research and Technology*, 2009 41, 209-218

BAUMGARTNER, T. WUNDERLICH, F. JAUNICH, A. SATO, T. BUNDY, G. GRIESSMANN, N. KOWALSKI, J. BURGHARDT, S. HANEBRINK, J. 2012. Lighting the way: Perspectives on the global lighting market. Study by McKinsey&Company, 2nd Edition

NEWSHAM, GR. RICHARDSON, C. BLANCHET, C. VEITCH, JA. 2005. Lighting quality research using rendered images of offices. *Lighting Research and Technology* 2005 37: 93-115

OSTERHAUS, W. 1993. Office Lighting: A Review of 80 Years of Standards and Recommendations. *Proceedings of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting 1993*

SCHMIDT, M. 2010. Energieeffizienz und Beleuchtungsqualität-ein Widerspruch?. *VDI Bautechnik*, 2010/2011, 121-126

SHEPHERD, AJ. JULIAN WG. PURCELL AT. 1992. Measuring appearance: Parameters indicated from gloom studies. *Lighting Research and Technology* 1992 24: 203-214

TRALAU, B. WELLMANN, TU. DEHOFF, P. SCHIERZ, C. 2010. Objective Measurable Criteria of Lighting Quality - Transformation of the Ergonomic Lighting Indicator into a measurable system. *Proceedings of CIE x035:2010*: 78-81

VEITCH, JA. 2010. High-quality Lighting: Energy Efficiency that Enhances Employee Well-Being. *Proceedings of CIE x035:2010*: 197-204

VEITCH, JA. NEWSHAM, GR. 2000. Preferred luminous conditions in open-plan offices: research and practice recommendations. *Lighting Research and Technology* 2000 32: 199-212

VEITCH, JA NEWSHAM, GR. Exercised control, lighting choices, and energy use: An office simulation experiment. *J. Env. Psychol.* 2000 20: 219-237.