

Kontextsensitive Beleuchtung: Entwicklung einer neuartigen Versuchseinrichtung und Bewertung der Nutzerakzeptanz

Dr.-Ing. Carolin Hubschneider, Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dr.-Ing. Jan de Boer, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart

Problemstellung und Forschungsfragen

Die kontextsensitive Anpassung der Beleuchtung an variierende Nutzungsanforderungen in Räumen scheiterte bisher aufgrund des statischen Leuchtenbaus (wie große Lumenpakete von Leuchtstofflampen) und mangelnder Sensorik. Mit der Verfügbarkeit von LED-Systemen und raumauflösender Sensorik ergeben sich heute vielfältige Möglichkeiten, die Beleuchtung besser und effizienter – zeitlich und örtlich variabel - auf jeweilige Raum- und Nutzungssituationen anzupassen. Ziel des vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens ist, zunächst ein kontextsensitives Beleuchtungssystem zu entwickeln und anschließend die Nutzerakzeptanz unterschiedlicher neuer Lichtsteuerungskonzepte zu untersuchen.

Stand der Wissenschaft / Technik

Die vertiefte Betrachtung kontextsensitiver Beleuchtung (z. B. bei verschiedenen Tätigkeiten und Arbeitspositionen im Büro) steht bis dato aus. So wurde die Nutzerakzeptanz hiermit möglicher dynamischer Lichtszenarien und auch das Zusammenspiel mit dem Energiebedarf bisher noch nicht umfassend untersucht.

Forschungshypothesen

Die Haupthypothese der Arbeiten ist: „Durch kontextsensitive Beleuchtung kann die Nutzerakzeptanz, bei gleichbleibendem oder gesenktem Energiebedarf, gehalten oder gesteigert werden“. Sie wird durch Subhypothesen ergänzt.

Versuchsaufbau

Die neue Versuchseinrichtung zur kontextsensitiven Beleuchtung besteht aus einem Laborraum mit 144 einzeln steuerbaren LED-Modulen und ermöglicht eine örtlich differenzierte Beleuchtung der Raumumschließungsflächen (spektrale Variabilität: CCT: 2.000 K bis über 10.000 K, R_a bis 95, Beleuchtungsstärken bis max. 5.000 lx). Die Verbindung mit einem Positionserfassungssystem (IR-Tiefenbildkamerasystem) gestattet die Kopplung von Lichtszenarien an Nutzerposition und -tätigkeit. In insgesamt 6 Studien wurden statische und dynamische Szenarien in Einzel- und Gruppenbürosituationen mit variierenden Leuchtedichteniveaus und Änderungsgeschwindigkeiten betrachtet. Zur Untersuchung der Nutzerakzeptanz wurden Leistungstests und Fragebögen verwendet.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Die Auswertung der insgesamt 6 Studien wird im Frühjahr 2016 abgeschlossen. Vorläufige Auswertungen zeigen, dass die Nutzerakzeptanz bei teils erheblich geringerem Energieverbrauch gehalten, in Teilen sogar gesteigert werden kann.

Context sensitive lighting: Development of an innovative test facility and assessment of the user acceptance

Dr.-Ing. Carolin Hubschneider, Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dr.-Ing. Jan de Boer, Fraunhofer Fraunhofer Institute for Building Physics, Stuttgart

Research issue

So far context sensitive adjustment of the lighting situation was impeded by the rather static construction of luminaires (e.g. big amount of luminous flux in fluorescent tubes) and lacking sensor technology. Today's LED systems (flexible light intensity, distribution and colour) and spatially resolving sensors open different possibilities to adapt light in indoor spaces in a better and more efficient way. The aim of the research project (supported by the German federal ministry of economic affairs and energy, BMWI) was to develop a context sensitive lighting system and to analyse the user acceptance of different innovative concepts of lighting controls.

State of science/technology

A detailed investigation of context sensitive lighting (e.g. different tasks and working positions in offices) has not been yet conducted. The user acceptance of dynamic lighting situations and the resulting energy demand was not analysed in a comprehensive manner yet.

Research hypothesis

The main hypothesis of the work conducted is: "By context sensitive lighting, the user acceptance is, at constant or reduced energy demand, maintained or increased."

Experimental setup

The innovative test facility for context sensitive lighting consists of an office-like laboratory with 144 individual controllable LED-modules. It allows a locally differentiated illumination of the room surfaces (spectral variability: CCT: 2000 K to more than 10000 K, R_a up to 95, illuminance up to 5000 lx). The connection with a system for position determination (IR-depth-sensor) allows the coupling of lighting situations to the position and task of the user. Altogether 6 studies were conducted to analyse static and dynamic lighting scenarios in individual and group offices with varying levels of illuminance and varying rates of change. For the assessment of the user acceptance, performance measurements and questionnaires were used.

Results in comparison with previous findings

The evaluation of the performed studies showed that reduction of illuminance levels outside the task area where only partly accepted. If on the other hand, a given "light budget" is redistributed, for instance more light in the task area – less light in other not used areas, user acceptance can be increased, while at the same time energy consumption decreases.

Kontextsensitive Beleuchtung: Entwicklung einer neuartigen Versuchseinrichtung und Bewertung der Nutzerakzeptanz

*Dr.-Ing. Carolin Hubschneider, Dipl.-Ing. Yuan Fang, Dr.-Ing. Jan de Boer,
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart*

Zusammenfassung

Ein erheblicher Anteil des Energieverbrauchs in Bürogebäuden entfällt auf die Beleuchtung. Durch eine heute mit Hilfe von LED-Systemen und neuen Sensoriken mögliche, erheblich differenziertere, kontextsensitive Bereitstellung von Licht in relevanten Arbeitsbereichen kann versucht werden, diesen Anteil zu reduzieren. Neben dem Bau einer neuen Versuchseinrichtung zur Untersuchung derartiger Beleuchtungslösungen wurde in sechs verschiedenen Teilstudien untersucht, inwieweit diese Flexibilisierung sich auf Nutzerakzeptanz und Energieeffizienz auswirkt. Bei in etwa gleichbleibender in Teilstudien erhöhter Nutzerakzeptanz waren ermittelte Energieeinsparungen teils erheblich.

1 Einleitung und Problemstellung

Eine kontextsensitive Anpassung der Beleuchtung an variierende Nutzungsanforderungen in Räumen scheiterte bisher aufgrund des statischen Leuchtenbaus (wie große Lumenpakete von Leuchtstofflampen) und mangelnder Sensorik. Mit der Verfügbarkeit von LED-Systemen und neuer Sensorsysteme ergeben sich heute vielfältige Möglichkeiten, die Beleuchtung - zeitlich und örtlich variabel - auf jeweilige Raum- und Nutzungssituationen (wie unterschiedliche Tätigkeiten) anzupassen. Ziel eines vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens war es, zunächst ein kontextsensitives Beleuchtungssystem zu entwickeln und anschließend die Nutzerakzeptanz unterschiedlicher neuer Lichtsteuerungskonzepte zu untersuchen. Im Rahmen mehrerer Teilstudien wurde überprüft, inwieweit diese Flexibilisierung sich auf Nutzerakzeptanz und Energieeffizienz auswirkt.

2 Stand der Technik und des Wissens

Kontextsensitive Beleuchtungslösungen wurden in Ansätzen bereits realisiert. So wurde in [1] gezeigt, dass mit stärker nutzerbezogener Beleuchtung mit Hilfe individuell steuerbarer Leuchten im Großraumbüro Energie eingespart werden kann. In [2] wurden Lichtmanagementsysteme basierend auf einer sogenannten „Schwarmintelligenz“ (vernetzte Stehleuchten) vorgestellt – Lösungen, die mittlerweile im Markt erhältlich sind.

Relevante Systemparameter, die sich auf die Nutzerakzeptanz auswirken, wie das Niveau der Umgebungsbeleuchtung und die Änderungsgeschwindigkeit, wurden teilweise bereits untersucht. Ausgehend von einer Arbeitsplatzbeleuchtung von 500 lx ist das Absenken der Umgebungsbeleuchtungsstärke nach [3], [4] auf 350 lx bis 165 lx ohne Einschränkung der Nutzerakzeptanz möglich. Hinsichtlich der Änderungsgeschwindigkeit der Beleuchtungsstärke zeigen [5], [6] dass mit einer Wahrnehmungsgrenze von etwa 5 %/s gerechnet werden muss. Als störend werden Änderungsgeschwindigkeiten ab 15 %/s bis 20 %/s empfunden. Vertiefende Untersuchungen zu kontextsensitiver Beleuchtung (z. B. bei verschie-

denen Tätigkeiten und Arbeitspositionen im Büro) standen bis dato aus. So wurden die Nutzerakzeptanz möglicher dynamischer Lichtszenarien und auch deren Zusammenspiel mit dem Energiebedarf bisher noch nicht umfassend untersucht.

3 Forschungsziel

Es sollte identifiziert werden, welche Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs ohne eine Verschlechterung der Nutzerakzeptanz möglich sind. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob durch eine Umverteilung des Lichtstroms die Nutzerakzeptanz gesteigert werden kann. Ein in Abbildung 1 dargestellter Ordnungsrahmen stellt die Parameter Belegungsdichte, Energieverbrauch und Akzeptanz gegenüber.

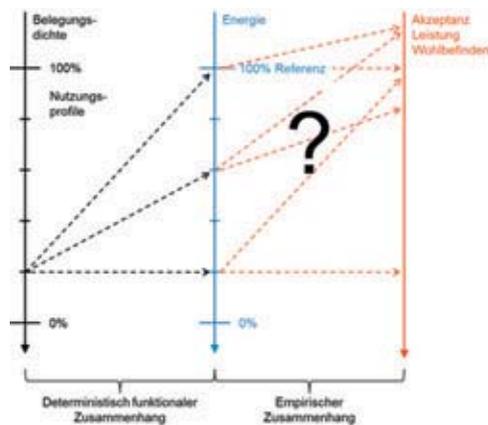


Abb. 1: Darstellung eines Ordnungsrahmens für die durchgeführten Teilstudien.

4 Neuartige Versuchseinrichtung

Es wurde eine in Bild 2 dargestellte Versuchsanlage entwickelt, die es erlaubt, 144 einzelne LED-Module, verteilt auf 8 Leuchten in Intensität, Verteilung und Farbe zu steuern (Beleuchtungsstärken bis 5000 lx, CCT: 2000 K - 10000 K, Ra bis zu 95). Das Beleuchtungssystem wurde in einem als Einzelbüro genutzten Laborraum (6,0 m x 3,5 m x 3,0 m) installiert. Mit einem IR-Tiefenbildkamerasystem und einer für die Anlage entwickelten Software können Nutzerpositionen einstellbare Lichtszenen zugeordnet werden. Wird eine bestimmte Position besetzt, wird die entsprechende Lichtszene aktiviert. Zusätzlich wurde ein System auf Basis eines konventionellen Beleuchtungssystems in einem als Gruppenbüro genutzten Laborraum (6,6 m x 6,6 m x 2,8 m) installiert. Hier wurden neun Leuchtengruppen mit jeweils einem Präsenzsensoren ausgestattet. Eine Software weist auch hier den jeweils genutzten Positionen vordefiniert Lichtszenen zu. Dynamische Übergänge zwischen den Lichtszenen können parametrisiert werden.

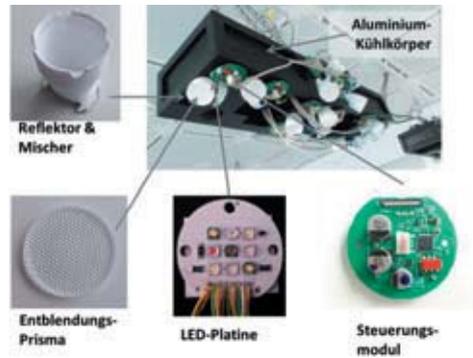


Abb. 2: Laborleuchten zur kontextsensitiven Beleuchtung in dem als Einzelbüro genutzten Laborraum.

5 Methode und Studiendesign

5.1 Übersicht durchgeführte Teilstudien

Die durchgeführten sechs Teilstudien [7] sind in Tabelle 1 einander gegenübergestellt.

Tab. 1: Fragestellung und Kurzbeschreibung Teilstudien.

Titel	Fragestellung	Kurzbeschreibung der Durchführung
Beleuchtungsstärkereduktion benachbarter Arbeitsplatz	Beeinflusst die Beleuchtungsstärkereduktion an einem benachbarten Arbeitsplatz andere Nutzer?	Test von drei verschiedenen Lichtszenarien hinsichtlich der Beleuchtungsstärkereduktion ausgelöst durch Abwesenheit des Aktors.
Insellösung Einzelbüro	Welche Mindestumgebungsbeleuchtungsstärke wird akzeptiert?	Test unterschiedlicher Umgebungsbeleuchtungsstärken, bei konstanter Arbeitsplatzbeleuchtung.
Insellösung Gruppenbüro	Welche Mindestumgebungsbeleuchtungsstärke wird von Einzelperson akzeptiert?	Test unterschiedlicher Umgebungsbeleuchtungsstärken, bei konstanter Arbeitsplatzbeleuchtung.
Positionswechsel Einzelbüro	Welche Beleuchtungsstärkereduktion und Änderungsgeschwindigkeit wird am verlassenen Arbeitsplatz akzeptiert?	Proband ändert Position im Einzelbüro. Die Lichtsituation an nicht genutzten Arbeitsplätzen variiert in Beleuchtungsstärke und Änderungsgeschwindigkeit.
Positionswechsel Gruppenbüro	Welche Beleuchtungsstärkereduktion und Änderungsgeschwindigkeit wird am verlassenen Arbeitsplatz akzeptiert?	Proband ändert Position im Gruppenbüro. Die Lichtsituation an nicht genutzten Arbeitsplätzen variiert in Beleuchtungsstärke und Änderungsgeschwindigkeit.
Lichtbudget	Kann durch Umverteilung des Lichtstroms eine der Referenz gegenüber erhöhte Nutzerakzeptanz erreicht werden?	Test von sechs verschiedenen Bedingungen, die sich hinsichtlich Lichtverteilung unterscheiden.

5.2 Ausgewählte Teilstudien

Nachfolgend werden zwei der sechs durchgeführten Teilstudien kurz vorgestellt.

„Positionswechsel Einzelbüro“

Im Einzel- / Gruppenlabor wurden verschiedene Arbeitsplätze (AP) eingerichtet, hier am Beispiel des Einzelbüros (mit Angabe der jeweiligen Aufgabe): Detail (Zahlenverbinden), Regal (Suchen von Büchern) und PC (Büroarbeit und Fragebögen). Der Proband bewegte sich nach einem festgelegten Muster durch den Raum (AP Detail → AP Regal → AP PC). Betrat der Proband einen Arbeitsplatz, wurde die Zielbeleuchtungsstärke in etwa 5 Sekunden erreicht. Die Beleuchtungsstärke der verlassenen Arbeitsplätze wurde auf 0 lx (bzw. Restlicht), „Dyn1/Dyn2“, und 200 lx, „Dyn3/Dyn4“ dynamisch angepasst oder als „Referenz“ statisch bei 500 lx belassen, siehe Abbildung 3. Die Änderungsgeschwindigkeit am verlassenen Arbeitsplatz wurde zwischen einer schnelleren (11,5 lx/s (Schrittweite 2 s) bzw. 10 %/s) und einer langsameren Änderung (5,5 lx/s (Schrittweite 2 s) bzw. 5 %/s) variiert, siehe dazu Tabelle 1).



Abb. 3: Teilstudie „Positionswechsel Einzelbüro“: Photographische Darstellung der Lichtszenen für den Arbeitsplatz „Detail“.

Tab. 2: Beschreibung der Lichtszenarien Studie „Positionswechsel Einzelbüro“.

LichtszENARIO		Dyn 1	Dyn 2	Dyn 3	Dyn 4	Referenz
Änderungsgeschw. bei Verlassen [%/s]		5	10	5	10	-
Position Proband: Detail	E am AP „Detail“ [lx]	750	750	750	750	500
	E an APs nicht genutzt [lx]	0	0	200	200	500
Position Proband: Regal	E am AP „Regal“ [lx]	300	300	300	300	500
	E an APs nicht genutzt [lx]	0	0	200	200	500
Position Proband: PC	E am AP „PC“ [lx]	500	500	500	500	500
	E an APs nicht genutzt [lx]	0	0	200	200	500

„Lichtbudget“

Es wurden sechs verschiedene Lichtszenarien gegenübergestellt, welche sich bei gleichem verwendetem Lichtstrom hinsichtlich der Verteilung des Lichts im Raum unterscheiden. Untersucht wurde, wie bei gleichbleibendem energetischen Aufwand bessere Bedingungen für den Nutzer erreicht werden können. In Abbildung 4 sind die Szenarien „Referenz“ (Arbeitsplatz 500 lx, Umgebung 300 lx), „Deckenaufhellung“ (starke Aufhellung der Decke, Arbeitsplatz 500 lx) und „Arbeitsplatzaufhellung“ (Arbeitsplatz über 500 lx) dargestellt.



Abb. 4: Teilstudie „Lichtbudget“: Photographische Darstellung untersuchter Szenarien.

In den vorgestellten Studien wurden bürorelevante Maße zur Erfassung der Leistung (visuell und kognitiv) und des Empfindens (wie „Wohlbefinden“, „Akzeptanz“, „Ermüdung“, „wahrgenommene Leistungsatmosphäre“) erhoben.

6 Ergebnisse

Ausgewählte Ergebnisse der zwei o. g. Teilstudien werden wie folgt zusammengefasst:

- Eine Reduktion der Umgebungsbeleuchtungsstärke bis auf 200 lx wird vom Nutzer weitestgehend akzeptiert. Gegenüber der Referenzbedingung ergaben sich keine Veränderungen hinsichtlich der Maße „Wohlbefinden“ (vgl. Abbildung 5), „Akzeptanz“, „Ermüdung“ und „wahrgenommene Leistungsatmosphäre“. „Ablenkung“ und „Störpotential“ wurden jedoch als schlechter bewertet.

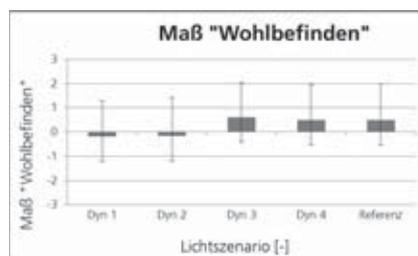


Abb. 5: Teilstudie „Positionswechsel Einzelbüro“: Einfluss der Lichtszenarien auf das Wohlbefinden (+3: sehr gut; -3: sehr schlecht).

- Die Änderungsgeschwindigkeit nahm nur im Gruppenlabor Einfluss auf den Nutzer. Bei mittlerer Umgebungsbeleuchtungsstärke wirkte sich eine geringe Änderungsgeschwindigkeit positiv auf die „Akzeptanz“ und die „Ablenkung“ aus. Es wurden Änderungsgeschwindigkeiten von 5 %/s bzw. 10 %/s akzeptiert.
- Die Umverteilung eines gegebenen „Lichtbudgets“ führte zu unterschiedlicher empfundener Eignung für verschiedene Tätigkeiten. Die Deckenaufhellung wurde für Bildschirmarbeit bevorzugt. Eine stärker auf den Arbeitsplatz bezogene Beleuchtung mit deutlich gesteigerter Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche wurde für Tätigkeiten als passend empfunden, welche höhere Sehleistungen fordern.
- Bei weitest gehender Nutzerakzeptanz konnte eine Energieeinsparung von ca. 30 % im Gruppenlabor und ca. 60 % im Einzellabor ermittelt werden (siehe Abbildung 6).

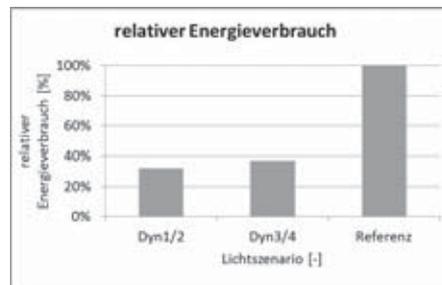


Abb. 6: Teilstudie „Positionswechsel Einzelbüro“: Vergleich relativer Energieverbräuche der Lichtszenarien.

7 Diskussion und Ausblick

Aus den Studien lässt sich ableiten, dass Beleuchtungsstärkereduktionen außerhalb des Bereichs der Sehaufgabe nur teilweise akzeptiert werden. Wird dagegen ein vorgegebenes „Lichtbudget“ umverteilt, z. B. im Bereich der Sehaufgabe mehr Licht bereitgestellt, in nicht genutzten Bereichen weniger Licht, kann die Nutzerakzeptanz erhöht werden bei gleichzeitig verringertem Energieverbrauch.

Im Vergleich zu einem ganzen Arbeitstag waren die Studiendauern kurz. Eventuelle Langzeitwirkungen der Umgebungsbeleuchtung konnten somit nicht betrachtet werden. Zusätzlich handelte es sich bei den Probanden um Studenten, deren Alter nicht dem des typischen Nutzers entspricht. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten zukünftig im Rahmen einer Feldstudie mit tatsächlichen Büronutzern weiter verifiziert werden. In einem weiteren Schritt sollte das Zusammenspiel der hier untersuchten kontextsensitiven elektrischen Beleuchtung mit Tageslicht betrachtet werden. Mittelfristig sollten die gewonnenen Erkenntnisse in Lichtlösungen für die praktische Anwendung übertragen werden.

8 Referenzen

- [1] Wen, Y.-J.; Agogino, A. M.: Control of Wireless-Networked Lighting in Open-Plan Offices. *Lighting Research and Technology* 43 (2011) H. 2, S. 235-248.
- [2] Woodward, S. (2014): Distributed Intelligence for Energy Saving Smart-Lighting. Proceedings IEECB 2014, Frankfurt.
- [3] Slater, A. I.; Perry M. J.; Carter, D. J.(1993): Illuminance Differences Between Desks: Limits of Acceptability. *Lighting Research and Technology* 25.2 : S. 91-103.
- [4] Tabuchi, Y.; Matsushima, K.; Nakamura, H.: Preferred Illuminances on Surrounding Surfaces in Relation to Task Illuminance in Office Room Using Task-Ambient Lighting. *Journal of Light & Visual Environment* 19.1 (1995): S. 28-39.
- [5] Bieske, K.; Dommaschk, A. (2014): Steuerkonzepte für dynamische Beleuchtungssysteme: Variation des Beleuchtungsniveaus. In: *Tagung LICHT 2014*, Den Haag, Niederlande.
- [6] Shikakura, T.; Morikawa, H.; Nakamura, Y. (2003): Perception of Lighting Fluctuation in Office Lighting Environment. *Journal of Light & Visual Environment* 27(2), S. 75-82.
- [7] Hubschneider, C.; Fang, Y; de Boer, J.: „Kontextsensitive Beleuchtungssysteme für Neubau und Bestand“, Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart (voraussichtlich verfügbar 9/2016).