

Ermittlung relevanter Einflussgrößen auf die subjektive Bewertung von Tageslicht zur Bewertung des visuellen Komforts in Büroräumen

Abschlussbericht

Cornelia Moosmann, Jan Wienold, Andreas Wagner, Volker Wittwer

24. April 2012

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1 Allgemeine Angaben

1.1 DFG Geschäftszeichen

WA 1155/5-1, WA 1155/5-2 und WI 1304/7-1, WI 1304/7-2.

1.2 Antragsteller

Name: **Andreas Wagner, Diplom-Ingenieur**
Dienststellung: Professor für Bauphysik und Technischen Ausbau
Institut/Fachbereich: Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta),
Fakultät Architektur, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dienstadresse: Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
Telefon: 0721 / 608-42178 oder -46511
Telefax: 0721 / 608-46092
e-mail-Adresse: wagner@kit.edu

Name: **Prof. Dr. Volker Wittwer**
Dienststellung: ehem. stellv. Institutsleiter am Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme, Freiburg
Institut/Fachbereich: Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik, Fraunhofer ISE
Dienstadresse: Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg
Telefon: 0761 / 4588-0
Telefax: 0761 / 4588-9000
e-mail-Adresse: volker.wittwer@ise.fraunhofer.de

1.3 Thema des Projekts

Ermittlung relevanter Einflussgrößen auf die subjektive Bewertung von Tageslicht zur Bewertung des visuellen Komforts in Büroräumen

1.4 Berichtszeitraum, Förderzeitraum insgesamt

Berichtszeitraum und Förderzeitraum sind 01.01.2007 bis 30.06.2011.

1.5 Fachgebiet, Arbeitsrichtung

Architektur (nutzerorientierte Planung), Arbeitswissenschaft (Arbeitsmedizin, Ergonomie) und Bauphysik / Gebäudetechnik (Nutzerkomfort, (Tages-) Lichttechnik)

1.6 Verwertungsfelder

Architektur (nutzerorientierte Planung), Gebäudetechnik (Nutzerkomfort, (Tages-) Lichttechnik), Displaytechnik

2 Zusammenfassung

2.1 Allgemeinverständliche Darstellung der wesentlichen Ergebnisse und der erzielten Fortschritte gegenüber dem Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Antragstellung.

Fraunhofer ISE

Im Rahmen der Testraumversuche konnten zahlreiche wissenschaftliche Fortschritte erzielt werden. Die durchgeführten Versuche bestätigen nicht nur die Blendungsbewertungskenngröße Daylight Glare Probability DGP, sondern ermöglichten auch, den DGP zu erweitern.

Die Versuchsreihe mit streuenden Blendschutzsystemen zeigt, dass der DGP auch für diese Systeme ohne Modifikation anwendbar ist. Somit ist der DGP für alle marktrelevanten Blendschutzsysteme experimentell validiert.

Der Einfluss des Alters auf die Blendungsbewertung konnte anhand der gewonnenen Versuchsdaten quantifiziert werden. Die Modifikation der DGP-Formel erfolgt durch einen Alterskorrekturfaktor. Für eine 60 jährige Person beträgt dieser Korrekturfaktor 1.25, für eine 20 jährige Person ist dieser 1.00.

Ebenso konnte der Gültigkeitsbereich des DGP für Situationen mit geringer Blendungswahrscheinlichkeit erweitert werden. Der DGP war bislang für Werte < 0.2 nicht definiert. Auch hier erfolgt die Korrektur durch einen Faktor, der den DGP im Bereich zwischen 0.0 und 0.2 modifiziert.

Im Rahmen der Versuche konnte nachgewiesen werden, dass die Quantität des Sichtkontaktes durch die Verschattungssysteme einen Einfluss auf die Blendungsbewertung hat. Je besser der Sichtkontakt, desto weniger störend bezüglich Blendung wird eine Situation bewertet. Auch hier erfolgte eine Quantifizierung des Einflusses über einen Korrekturfaktor, mit dem der DGP multipliziert wird.

Die bisherigen Defizite bezüglich der Kontrastbewertung an Bildschirmen werden durch die Entwicklung eines neuen Kontrastmodells behoben. Das neue Modell ermöglicht, die Lesbarkeit von Bildschirmoberflächen zuverlässig zu bewerten. Perspektivisch kann dieses Modell nicht nur im Bürobereich angewandt werden, sondern auf jegliche Art von Displaytechnik erweitert werden, auch auf nicht-stationäre Anwendungen (z.B. Mobiltelefone, Netbooks, Displays im public-viewing Bereich usw.). Das neue Modell weist in Abhängigkeit der Umgebungsleuchtdichte, der „Low-State“ Leuchtdichte und des Alters den minimal notwendigen Kontrast zum Lesen aus. Die Versuche zeigten, dass der Alterseinfluss für die Kontrastbewertung deutlich schwächer ist als beim bislang gültigen Kontrastmodell.

Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta), KIT

Die gewählte Methode der Felduntersuchung sowie die gewählte bzw. eigens entwickelte Messtechnik haben sich für die vorliegenden Fragestellungen als geeignet erwiesen. Die Ergebnisse bestätigen die Entscheidung für eine orts aufgelöste Messung der Fensterleuchtdichte, da die Berechnung von Blendungsindizes als wichtiger Aspekt des visuellen Komforts nur auf Basis von Leuchtdichtebildern mit ausreichender Auflösung möglich ist. Der Ablauf als Längsschnittstudie mit Messungen und Befragungen in jeder Jahreszeit hat sich ebenfalls bewährt: Der jahreszeitliche Einfluss auf Temperatur- und Helligkeitsbewertung ist signifikant. Die Methode ist insgesamt jedoch sehr arbeits- und zeitaufwändig.

Die Nutzer sind mit dem visuellen Komfort insgesamt zufrieden, die Beleuchtung des Arbeitsplatzes mit Tages- und Kunstlicht wird überwiegend positiv bewertet. Beide Bewertungen korrelieren miteinander. Eine aus Nutzersicht gute Tageslichtlösung kann also das positive Erleben des Kunstlichtes unterstützen und umgekehrt.

Ein Aspekt des visuellen Komforts ist die Blendung durch Tageslicht. Die Ergebnisse der Felduntersuchung bestätigen die Daylight Glare Probability als Blendungsindex und die in den Testräumen ermittelten Einflüsse von Alter und Sichtkontakt. Darüber hinaus zeigt die Auswertung der Nutzereingriffe und ihrer jahreszeitlichen Unterschiede einen Zusammenhang zwischen thermischem und visuellem Komfort: Im Sommer werden Sonnenschutzsysteme bei

geringeren Blendungswerten weiter geschlossen als in den übrigen Jahreszeiten, Blendung wird bei tendenziell niedrigeren DGP-Werten wahrgenommen oder als störend empfunden.

Neben der Vermeidung von Blendung beeinflussen die Faktoren Einschränkung des Ausblicks durch die Fenstergröße, Bewertung des Ausblicks, Bedienbarkeit des Sonnenschutzes, Zufriedenheit mit der Temperatur und Zufriedenheit mit der Arbeitstätigkeit die Bewertung der Tageslichtversorgung. Die befragten Nutzer präferieren moderate Fensterflächenanteile. Dabei werden außen liegende Räume unabhängig vom Tageslichtquotienten als besser tageslichtversorgt empfunden als Räume an Atrien.

Ein weiterer Aspekt des visuellen Komforts ist die Nutzerbewertung der Helligkeit am Arbeitsplatz. An tageslichtorientierten Bildschirmarbeitsplätzen wird die vom Nutzer bevorzugte Beleuchtungsstärke signifikant von seinem Alter, der Jahreszeit, dem Fensterflächenanteil der Fassade seines Büroraums und seiner Bewertung des Ausblicks aus dem Fenster beeinflusst. Unter Tageslichtbedingungen werden überwiegend Helligkeitsniveaus als angenehm bewertet, in denen die horizontale und die zylindrische Beleuchtungsstärke deutlich über den normativen Mindestanforderungen der DIN EN 12464-1 liegen.

Auch die Nutzereingriffe in die Steuerung des Kunstlichts zeigen den Wunsch der Nutzer nach Beleuchtungsstärken über den Mindestanforderungen der Norm und den engen Zusammenhang zwischen Steuerung, Nutzerfreundlichkeit und energetischem Einsparpotential.

Automatisch gesteuerte Sonnenschutzsysteme werden von den Nutzern – zumindest in der hier vorliegenden Stichprobe – überwiegend nicht geschätzt: 69% der Bewertungen sind negativ.

2.2 Ausblick auf künftige Arbeiten und Beschreibung möglicher Anwendungen.

Der DGP wird weltweit inzwischen mehr und mehr als Blendungsbewertungsmethode akzeptiert und angewandt. Die hier entwickelten Erweiterungen fließen direkt in diverse Bewertungstools (Diva, Daysim, evalglare) ein, die weltweit mehrere tausend Anwender haben. Des Weiteren ist geplant, den DGP in die neue europäische Tageslichtnorm aufzunehmen.

Das neu entwickelte Kontrastmodell hat ebenfalls ein großes Potential. Neben dem Ersatz des alten Modells ist geplant, dieses Modell in Tageslichtbewertungstools (Daysim) aufzunehmen, ein erster Prototyp der Software existiert bereits. Darüber hinaus besteht Potential im Bereich der Displaytechnik.

Die Versuche haben aufgezeigt, wie wichtig das Thema Sichtkontakt bei der Bewertung von Tageslicht ist. Da dieser Bereich extrem vielschichtig ist, konnten im Rahmen dieses Projektes lediglich Teilbereiche untersucht werden. Die Themenfelder Fassadenmuster, Skalierung von Verschattungsstrukturen, Objekterkennung, Mindest-Sichtkontakt und Regelung von Verschattungssystemen sollten in zukünftigen Forschungsprojekten aufgenommen werden.

Die Auswertung der Felduntersuchung wird im Rahmen einer Dissertation fortgeführt. Dabei wird der Schwerpunkt neben der Analyse der jahreszeitlichen Unterschiede auf dem Einfluss der architektonischen Parameter auf den visuellen Komfort liegen und auf dem Zusammenhang zwischen visuellem und thermischem Komfort.

Die Ergebnisse der Felduntersuchung zeigen, dass insbesondere bei der aus energetischen Gründen sinnvollen tageslichtabhängigen Regelung von Kunstlicht und bei der automatischen Steuerung von Sonnenschutzsystemen Nutzerwünsche bisher unberücksichtigt bleiben. Die Nutzerbewertungen deuten darauf hin, dass eine Kunstlichtregelung, die die Jahreszeit, den thermischen Komfort, das Alter und das individuell bevorzugte Helligkeitsniveau der Nutzer berücksichtigt, eine höhere Nutzerakzeptanz finden könnte.

Eine weitere Untersuchung dieser Zusammenhänge ist beabsichtigt.

3 Arbeits- und Ergebnisbericht

3.1 Ausgangslage

Dieses Forschungsprojekt befasst sich mit grundlegenden Einflussparametern des visuellen Komforts an Arbeitsplätzen. Zwar wurden für Tageslicht orientierte Arbeitsplätze bereits eine ganze Reihe verschiedener Einflussgrößen auf die subjektive Lichtwahrnehmung untersucht; eine integrale Betrachtung, insbesondere der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Parametern, fehlt bislang.

Im Rahmen dieses Grundlagenprojektes sollte deshalb unter kontrollierbaren Versuchsbedingungen sowie an realen Arbeitsplätzen das subjektive Empfinden und der Einfluss unterschiedlicher Lichtsituationen abgefragt werden. Dabei galt es, die wichtigsten Parameter für die Bewertung der visuellen Qualität von Arbeitsplätzen zu ermitteln sowie deren Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu identifizieren. Untersucht werden sollten die Leuchtdichte-Toleranz in Abhängigkeit von Alter und Jahreszeit, die vom circadianen System beeinflusste Gesundheit und Aktiviertheit der Nutzer, Qualität des Außenkontakts, Umgang der Nutzer mit Sonnen- und Blendschutzsystemen, Raumklimabedingungen und Einflussfaktoren der Architektur. Bei den Testraumuntersuchungen sollte darüber hinaus der Einfluss der Lichtsituation auf den Bildschirmkontrast und die Erkennbarkeit von Bildschirmhalten untersucht werden und ein neues Bewertungsmodell entwickelt werden.

Im Rahmen der Felduntersuchungen sollten Nutzereingriffe analysiert werden, die eine indirekte Bewertung der Situation darstellen und daher wichtige Hinweise auf den visuellen Komfort geben können. Um energieeffiziente Gebäude mit stromsparenden Kunstlichtanlagen und großer Nutzerakzeptanz planen zu können, müssen der Umgang der Nutzer mit Kunstlicht und Sonnenschutz und die Ansprüche an das Beleuchtungsstärkeniveau bekannt sein – die Identifikation und Auswertung von Nutzereingriffen in der Felduntersuchung kann dazu einen wichtigen Beitrag leisten.

Neben der Erarbeitung der grundlegenden Zusammenhänge der Einflussparameter war das übergeordnete Ziel des Vorhabens die Entwicklung eines möglichst einfach handhabbaren Verfahrens zur Evaluierung des visuellen Komforts an Arbeitsplätzen mit hohem Tageslichtanteil.

Die Ermittlung systematischer Wechselwirkungen zwischen relevanten Parametern und deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Probanden sollte zunächst in Testräumen erfolgen. Anschließende Felduntersuchungen in unterschiedlichen Gebäuden mit statistisch repräsentativen Nutzerzahlen waren zur Überprüfung und Erweiterung der Bewertungskenngrößen und ihrer Zusammenhänge unter Berücksichtigung psychosozialer Faktoren des realen Arbeitsplatzumfeldes vorgesehen. Die gleichzeitige messtechnische Untersuchung mehrerer Arbeitsplätze im Feld erforderte die Entwicklung und Verwendung von preisgünstiger Messtechnik mit hinreichender Genauigkeit.

3.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

Für den Arbeitsbericht wird die Gliederung der Arbeitspakete aus dem Antrag übernommen.

Arbeitspaket 1: Testmethoden entwickeln und Versuchsablauf definieren

Zu Beginn des Projektes wurde festgelegt, welche Messgrößen in den Felduntersuchungen erhoben werden sollen (ortsaufgelöste Leuchtdichteverteilung in der Fassade, horizontale und vertikale Beleuchtungsstärke, RGB-Sensor, Raumtemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Schallpegel, Zustand des Kunstlichtes). Ebenso wurde festgelegt, welche Gebäudeparameter berücksichtigt werden (Fensterflächenanteil der Fassade, Alter des Gebäudes, Sonnen- und Blendschutzsystem, Steuerung des Sonnenschutzes). In dieser Phase wurde auch der Fragebogen für die Felduntersuchungen weiterentwickelt. Dabei wurden Herr Prof. Dr. Schierz, Herr Prof. Dr. Schäfers und Frau Kunz, M.A., Frau Dipl.-Psych. Vogt sowie Herr Prof. Dr. Hoffmeyer-Zlotnik und Frau Dr. Menold als externe Berater hinzugezogen.

Arbeitspaket 2: Versuchsaufbau für Testraumversuche

Die Testräume und die Messtechnik des Fraunhofer ISE wurden so umgebaut, dass jeweils zwei Testpersonen gleichzeitig die Versuche durchführen konnten. Wichtigste Messgeräte

dabei waren zwei kommerzielle Leuchtdichtekameras, die mit Objektiven bestückt sind, die jeweils 180° erfassen können. Diese Kameras lieferten fehlerfreie Bilder im gesamten Verlauf des Projektes.

Es wurden drei verschiedene Rollosysteme angeschafft und installiert, die unterschiedliches Streuverhalten und unterschiedliche Durchsichtseigenschaften aufweisen. Darüber hinaus wurde temporär eine bereits vorhandene Jalousie so modifiziert, dass die Durchsichtsfunktion eingeschränkt war (für die Versuchsreihe „Sichtkontakt“). Es wurden verschiedene adhesive Folien angeschafft, die die Transmission (für die Versuchsreihe „Helligkeit“ und „Alter“) oder Farben (für die Versuchsreihe „Lichtfarbe und circadianes Wirkspektrum“) modifizieren.

Arbeitspaket 3: Vortests für Testraumversuche

Die Vortests wurden zwischen November 2007 und Februar 2008 durchgeführt.

Arbeitspaket 4: Testmethoden für Testraumversuche festlegen

Die Erfahrungen der Vortests wurden dazu genutzt, den Versuchsablauf und den Fragebogen zu optimieren. Ein Testdurchlauf für eine Fassadenkonfiguration dauert ca. 30 Minuten. Dabei muss der Proband zwei Kontrastidentifikationstests, zwei Abschreibetests und einen Aufmerksamkeitstest durchlaufen. Darüber hinaus muss der Proband zwischen sämtlichen Tests Fragebögen ausfüllen. Das Verschattungssystem ist zu Beginn des Versuches voreingestellt, nach den ersten Tests darf das Verschattungssystem verstellt werden.

Arbeitspaket 5: Testraumversuche durchführen

Es wurden Versuchsreihen zu den Themengebieten streuender Blendschutzsysteme, Sichtverbindung, Helligkeitsniveau, Alter der Testpersonen und Lichtfarbe durchgeführt. Darüber hinaus wurde eine separate Versuchsreihe zur Entwicklung eines neuen Kontrastmodells durchgeführt. Insgesamt wurden mit mehr als 150 Testpersonen Versuche durchgeführt.

Um den Einfluss von Lichtfarbe und circadianem Wirkspektrum auf die Blendungsbewertung zu untersuchen, wurden im ersten Schritt zahlreiche verfügbare Folien spektral vermessen. Aus diesen wurden für diese Versuchsreihe vier verschiedene Folientypen ausgewählt und auf der Verglasung der Testräume angebracht. Alle ausgewählten Folien wiesen ähnliche Lichttransmissionsgrade auf (ca 8% im $v(\lambda)$ bewerteten Spektrum). Die Folien unterscheiden sich im Farbwiedergabeindex als auch im circadianen Wirkspektrum.

Im Rahmen der Versuchsplanung wurde entschieden, die Versuchsreihe zum Thema Aussicht auszuweiten, um die Dimension „view content“ mit zu erfassen, da hier aufgrund anderer kürzlich veröffentlichter Studien ein Effekt zu erwarten war. Da der Umbauaufwand für die ursprünglich vorgesehene Versuchsreihe „Temperatureinfluss“ sehr groß gewesen wäre, wurde auf diese Versuchsreihe zu Gunsten der erweiterten Versuche zur Aussicht verzichtet.

Arbeitspaket 6: Gebäudeobjekte akquirieren

Die Felduntersuchung erforderte von den beteiligten Unternehmen einen erheblichen Aufwand an Arbeitszeit der Probanden und die Zustimmung von Unternehmen und Betriebsrat zur kontinuierlichen Aufzeichnung von Messwerten in einem bildgebenden Verfahren. Es ist dennoch gelungen, bei der Auswahl der neun Gebäude eine hinreichend ausgewogene Verteilung auf Alt- und Neubau sowie auf unterschiedliche Verglasungsanteile der Fassade (Lochfassade, Bandfassade, Ganzglasfassade) zu erreichen.

Arbeitspaket 7 und 8: Messtechnik entwickeln und zusammenbauen

Im Projekt wurde eine neue, am Markt nicht verfügbare Leuchtdichtekamera hinreichender Messgenauigkeit entwickelt, die an die Anforderungen von Felduntersuchungen angepasst ist: Die Messtechnik muss aufgrund der benötigten Stückzahl kostengünstig und dabei unauffällig sein, um den Arbeitsalltag der Probanden so wenig wie möglich zu stören¹.

Neben der Leuchtdichtekamera wurden weitere Messgeräte benötigt zur Aufzeichnung von horizontaler und zylindrischer Beleuchtungsstärke, Lichtfarbe („RGB-Beleuchtungsstärke“),

¹ Abromeit, A.; Wagner, A.: Kostengünstige Leuchtdichtekameras mit CMOS-Sensoren. Tagungsband Licht 2008. Ilmenau, 2008

Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Schallpegel sowie Betriebszustand der künstlichen Beleuchtung (an/aus). Hierfür wurde auf dem Markt erhältliche Messtechnik verwendet, die mit zusätzlichen externen Sensoren ausgestattet wurde, wenn keine zufriedenstellende Lösung standardmäßig zur Verfügung stand.

Bei hohen Leuchtdichten kam es in einigen Fällen zu Messfehlern bei der Leuchtdichtemessung. Diese traten ausschließlich bei Pixeln mit Leuchtdichten über 12.000 cd/m² auf, traten bei diesen Leuchtdichten aber nicht grundsätzlich auf. Der Fehler schränkt die Auswertung der betroffenen Leuchtdichtebilder ein, da Blendungsindizes und Leuchtdichteverteilung nicht exakt ermittelt werden können. Die fehlerhaften Bildpunkte konnten jedoch identifiziert werden.

Die Korrektur dieses Messfehlers erfolgte, indem die Leuchtdichtewerte aller fehlerhaften Bildpunkte so verändert wurden, dass sich für das korrigierte Bild eine vertikale Beleuchtungsstärke ergab, die der gemessenen vertikalen Beleuchtungsstärke in Fensterrichtung entsprach. Allen Fehlerpixeln eines Bildes wurde dieselbe Leuchtdichte zugewiesen. Die Gewichtung einer Blendquelle aufgrund ihrer Position im Gesichtsfeld kann dabei über- und unterbewertet werden. Deshalb und wegen der Messungenauigkeit der Beleuchtungsstärkesensoren ist die Messgenauigkeit der korrigierten Leuchtdichtebilder weiterhin eingeschränkt. Die Interpretation der korrigierten Leuchtdichtemessungen ist trotz dieser Ungenauigkeit möglich, da die Messfehler überwiegend in Situationen auftreten, für die wegen der hohen vertikalen Beleuchtungsstärke hohe Blendungsindizes berechnet werden.

Arbeitspaket 9 und 10: Testlauf Feldversuche, Testmethoden für Feldversuche festlegen

Vor der eigentlichen Felduntersuchung wurden zwei Testläufe durchgeführt, um technische Schwierigkeiten bei der Messung und Verständnisschwierigkeiten bei der Befragung während der eigentlichen Felduntersuchung ausräumen zu können.

Der Testlauf des Fragebogens wurde in einem der untersuchten Gebäude durchgeführt, in einem Bereich, in dem die eigentliche Untersuchung nicht stattfand.

Die am fbta entwickelten bzw. erweiterten Messgeräte konnten erst zum Zeitpunkt der ersten regulären Messphase fertig gestellt werden. Der Testlauf wurde mit Prototypen durchgeführt.

Arbeitspaket 11: Durchführung der Felduntersuchungen

Die Felduntersuchungen wurden wie geplant als Längsschnittstudie durchgeführt, bei der vier Mal im Abstand von 3 Monaten möglichst dieselben Personen an ihrem Arbeitsplatz befragt wurden. Die Messung erfolgte jeweils in 15 Räumen parallel und dauerte 9 bzw. 10 Arbeitstage. Am letzten Tag der Messung fand die Befragung statt.

Trotz der Abstimmung im Vorfeld fanden während des Messjahres in sechs der neun Gebäude Umstrukturierungen statt, die auch in einigen der gewählten Räume zu Veränderungen führten. In fünf Gebäuden mussten beim Aufbau kurzfristig ein oder mehrere passende Ersatzräume gefunden werden. Diese (unangekündigten) Änderungen erfordern die Anwesenheit eines kompetenten Versuchsleiters.

Die Datenerhebung verlief dem Zeitplan entsprechend. Messausfälle beschränken sich auf einzelne Sensoren, die (beispielsweise durch Unterbrechung der Stromversorgung während des Messzeitraums) an einzelnen Tagen keine Daten aufzeichnen konnten. Die Rücklaufquote der Fragebögen ist mit über 90% außerordentlich hoch (977 Fragebögen).

Die vorgesehene Messung des Lichtspektrums bei möglichst gleichmäßig bedecktem Himmel zur Bestimmung eines „circadianen Quotienten“ konnte in allen neun Gebäuden durchgeführt werden. Einige Räume wurden zwischen dem Abschluss der Felduntersuchung und der Messung des Lichtspektrums neu eingerichtet, hier wurde die Messung des Lichtspektrums nicht durchgeführt. Einige Räume waren am Tag der Messung nicht zugänglich. Insgesamt konnte die Messung des Lichtspektrums an 370 der 444 Arbeitsplätze durchgeführt werden, die bei der Felduntersuchung berücksichtigt wurden.

Trotz großer Anstrengungen entsprachen die Randbedingungen der Messung nicht immer den Vorgaben der DIN 5034-5. Eine Messung der Himmelsleuchtdichte zur Überprüfung, ob die Bedeckung dem „bedeckten Himmel“ nach DIN 5034-2 entspricht, wurde nicht durchgeführt. Die Messungen können daher nur als orientierende Messungen betrachtet werden.

Arbeitspaket 2.03 (Fortsetzungsantrag): Identifizieren des Nutzereingriffs

Zur Identifikation von Änderungen der Sonnen- oder Blendschutzeinstellungen durch die Nutzer wurde eine Software zur automatisierten Auswertung der Leuchtdichtebilder entwickelt. Es wurden Methoden der freien Programmiersbibliothek OpenCV genutzt, die Algorithmen für Bildverarbeitung und maschinelles Sehen (Computer Vision) bereitstellt. Die Asymmetrien und Verzerrung der Kameraoptik (Fischaugobjektiv) wurden bestimmt und – soweit möglich – aus den Bildern herausgerechnet. Die beabsichtigte Detektion des Sonnenschutzes in den Leuchtdichtebildern mittels Kantendetektion wurde erschwert durch in den Fensterflächen der Leuchtdichtebilder enthaltene Linien, die nicht im Zusammenhang mit dem Sonnenschutz stehen (z.B. Mobiliar, Gebäude- und Fensterkanten der umgebenden Bebauung). Vollständig geschlossene Jalousien und Blendschutz-Textilien werden aufgrund fehlender Linien häufig nicht detektiert. Diese Fehler bei der Kantendetektion machten eine visuelle Überprüfung der Auswertungsergebnisse erforderlich. Die beabsichtigte Zeitersparnis und die größere Genauigkeit bei der Auswertung der Bilder wurden nicht erreicht. Die Ergebnisse der automatisierten Auswertung konnten lediglich als Hinweis für die visuelle Überprüfung verwendet werden. Wegen der großen Bedeutung der Nutzereingriffe als indirektes Nutzerurteil wurde die visuelle Überprüfung über den vorgesehenen Arbeitsaufwand hinaus durchgeführt.

In den neun Gebäuden konnten insgesamt 4081 Nutzereingriffe identifiziert werden. Der Vergleich der identifizierten Nutzereingriffe zeigt die Notwendigkeit der visuellen Überprüfung: Die automatisierte Bildauswertung hat 2481 (61%) Nutzereingriffe korrekt identifiziert, 1598 (39%) nicht identifiziert und über 274500 falsch identifiziert.

Das Auffinden von Nutzereingriffen bei der künstlichen Beleuchtung erfolgte in einem ersten Schritt automatisiert. Auch diese Ergebnisse mussten überprüft und manuell korrigiert werden. 3616 Einschaltvorgänge und 3602 Ausschaltvorgänge konnten identifiziert werden.

Arbeitspaket 2.04 (Fortsetzungsantrag): Analyse und Bearbeitung der Leuchtdichtebilder

Aus Gründen des Datenschutzes mussten die Leuchtdichtemessungen im Feld grundsätzlich in Fensternähe und orthogonal zur Fassade erfolgen. Daher bestehen Unterschiede zwischen der von den Probanden erlebten und bewerteten Situation am jeweiligen Arbeitsplatz und der Messung. Aus den Leuchtdichtebildern, der gemessenen vertikalen Beleuchtungsstärke in allen vier Raumrichtungen sowie aus Abstand zwischen Proband und Messgerät und Aufstellwinkel des Monitors sollte ein „Arbeitsplatz-Leuchtdichtebild“ berechnet werden, das an die Position und die (vermutete) Blickrichtung des jeweiligen Probanden angepasst ist. Diese Berechnung hat sich als unverhältnismäßig aufwändig erwiesen.

Da der DGP von der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge bestimmt wird, wurden vereinfachend Blendungsindizes auf Basis der „vertikalen Beleuchtungsstärke in Blickrichtung“ beim Blick des Probanden zum Monitor und der unveränderten Leuchtdichtebilder berechnet.

Arbeitspaket 2.05: Kontrast – Definition der Versuchsrandbedingungen und Programmieren der Tests

Die entwickelte Testmethode besteht aus 3 Versuchsphasen:

- Sehkraft-Überprüfung: Ermittlung der Sehschärfe und der Kontrastsensitivität der Testpersonen unter gedimmten Lichtverhältnissen.
- Test bei künstlichem Licht: insgesamt 5 Versuchsphasen. Diese umfassen die Messung der individuellen Lese-Sehschärfe, die Kontrastwahrnehmung eines Lesetests mit positiver und negativer Polaritätsdarstellung, sowie die individuellen Komfortlevels für beide Polaritätsdarstellungen.
- Test bei Tageslicht: Vier Versuchsphasen wie unter künstlicher Beleuchtung ohne Lese-Sehschärfe Ermittlung.

Arbeitspaket 2.06 und 2.07- Durchführung von Vortests und Tests

Um den Versuchsablauf zu optimieren wurden zahlreiche Vortests durchgeführt.

Die eigentlichen Tests wurden mit insgesamt 45 Probanden aus drei Altersklassen (20-30, 40-50 und 60-70, je 15 Personen) durchgeführt, um den Alterseinfluss bewerten zu können.

Arbeitspaket 2.08 - Entwicklung neuer Kontrastmodelle

Der Prozess der Entwicklung des neuen Kontrastmodells kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Aufstellen einer Hypothese der Modellstruktur
- Ableiten eines Altersfaktors
- Ableiten der Konstanten und Exponenten der Modellformel

Arbeitspaket 12 und 13: Versuchsauswertung, Entwicklung eines Bewertungsverfahrens

Der Aufwand für die Aufbereitung der Daten war erheblich größer als veranschlagt. Dies betrifft sowohl die Felduntersuchung als auch die Testraumversuche.

Für die Testraumversuche wurde eine Access-Datenbank entwickelt, die alle Ergebnisse der Nutzerbefragung beinhaltet. Für die Extrahierung der Daten der einzelnen Versuchsphasen (z.B. vor und nach Nutzereingriff, jeweils Abschreibeaufgabe) wurden spezielle Datenbankabfragen implementiert. Parallel dazu wurden Programme geschrieben, die aus den log-Files der Probanden-Rechner Datum und Uhrzeit der jeweiligen Testphasen extrahieren und die entsprechenden Bilder der Leuchtdichtekameras den Versuchsphasen zuordnet. Viel Zeit erforderte die Korrektur der Log-files, da die Probanden teilweise falsche Tasten zu Beginn der Versuche gedrückt hatten und deswegen mehrfache Log-Einträge vorhanden waren, die nicht mehr automatisch sondern manuell extrahiert werden mussten.

Bei der Auswertung des Einflusses von Lichtfarbe und circadianem Lichtspektrum wurde festgestellt, dass die erzielten Versuchsdaten nicht aussagekräftig genug sind, um Rückschlüsse auf einen Einfluss bei der Blendungsbewertung geben zu können. Bei den Testraumversuchen ist das darin begründet, dass die verfügbaren Folien allesamt die Transmission so stark reduzieren, dass kaum noch Blendung auftritt. Für die gesamte Versuchsreihe gab es lediglich drei Bewertungen hinsichtlich störender Blendungen. Um zukünftig diese Einflüsse unter Tageslichtbedingungen untersuchen zu können, müssten zunächst ganz neuartige Folien speziell entwickelt werden, die eine deutlich höhere Transmission (Ziel $\tau > 0.6$) aufweisen – momentan sind solche Folien nicht auf dem Markt verfügbar.

Der in DIN 5031-100 definierte biologische Wirkungsfaktor $a_{\text{biol } v}$ ist vorläufig als Wirkungsspektrum der Aktivierung mit Licht $s_{\text{ak}}(\lambda)$ zu verwenden. Das bei den Felduntersuchungen verwendete Spektroradiometer weist einen circadianen Wirkungsfaktor a_{cv} aus, der $a_{\text{biol } v}$ entspricht. Für alle untersuchten Räume wurde das Verhältnis von a_{cv} -Wert innen zu a_{cv} -Wert außen gebildet, der „ $s_{\text{ak}}(\lambda)$ -Quotient“. Dieser Wert zeigt, in welchem Maße ein System (Verglasung, Sonnen- / Blendschutz, Oberflächenmaterialien und Reflexionsgrade) die derzeit als aktivierend betrachteten Wellenlängen in den Raum gelangen lässt.

Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem $s_{\text{ak}}(\lambda)$ -Quotienten des Arbeitsplatzes und dem momentanen Befinden der Nutzer oder den Angaben zu gesundheitlichen Beschwerden besteht für die Felduntersuchung nicht. Die gemessenen Unterschiede zwischen den Gebäuden sind nicht sehr groß, sofern kein Sonnen- oder Blendschutz eingesetzt wird. Es ist nicht bekannt, wie lange sich die Nutzer an ihrem Arbeitsplatz aufgehalten haben und welchen Beleuchtungsstärken und Spektren sie während der übrigen Zeit ausgesetzt waren. Signifikante Zusammenhänge zwischen dem (gesundheitlichen) Befinden der Nutzer und dem $s_{\text{ak}}(\lambda)$ -Quotienten des Arbeitsplatzes sind unter diesen Umständen nicht zu erwarten.

Die Entwicklung eines zusammenfassenden Verfahrens zur Evaluierung des visuellen Komforts an Arbeitsplätzen mit hohem Tageslichtanteil war am Ende des Projektes nicht möglich. Bei der vorhandenen Datenmenge der Testraumversuche wäre die Ableitung der Gewichtungsfaktoren statistisch nicht ausreichend gesichert. Die Wichtigkeit der Einflussfaktoren Blendung, Helligkeit und Sichtkontakt konnte jedoch nachgewiesen werden, diese sind somit wichtiger Bestandteil einer Untersuchung zur visuellen Qualität.

Parameter, die die Leistungsfähigkeit signifikant beeinflussen, konnten aufgrund der kurzen Versuchsdauer und des gewählten D2-Leistungstests nicht gefunden werden. Die individuellen Leistungsunterschiede der Probanden und die Lerneffekte bei mehrmaligem Durchführen des Leistungstests dominierten die Ergebnisse so stark, dass Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen aus den Ergebnissen nicht mehr feststellbar waren.

3.3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Testraumversuche

Einfluss streuende Systeme

Ein Ziel dieser Untersuchung ist, die Anwendbarkeit des Blendungsbewertungsverfahrens DGP für streuende Sonnenschutzsysteme zu überprüfen. Die Entwicklung des DGP erfolgte ursprünglich mit Jalousie- und Folien-Blendschutzsystemen. Daher wurden in dieser Testreihe zwei unterschiedliche Rollosysteme untersucht. Beide weisen eine Lichttransmission von $\tau=0.14$ auf. Eines der Systeme erlaubt in geringem Umfang Durchsicht, das andere System nicht. In nachfolgender Tabelle ist der Pearsonsche Korrelationskoeffizient zwischen den Nutzerbewertungen der Blendung und den verschiedenen Bewertungsgrößen (Daylight Glare Probability DGP, vertikale Beleuchtungsstärke E_v und Daylight Glare Index DGI) dargestellt ($p < 0.001$).

	DGP	E_v	DGI
Rollos	0.369	0.320	0.239
Jalousien	0.464	0.457	0.295

Es wurden alle vorhandenen Versuchsdaten aus dem Projekt verwendet, d.h. Daten vor und nach dem Nutzereingriff. Zwar ist die Korrelation des DGP für die Rolloversuche kleiner als die der Jalousieversuche, allerdings korreliert der DGP deutlich besser als die vertikale Beleuchtungsstärke oder der DGI.

Aussichtseinfluss

Die Untersuchung des Sichtkontakts berücksichtigt zwei unterschiedliche Dimensionen: Zum einen den sichtbaren Anteil dessen, was ein Nutzer durch ein Verschattungssystem (z.B. Jalousie) sehen kann. Diese Kenngröße wird im Weiteren „view-ratio“ genannt. Sie errechnet sich aus dem Verhältnis des sichtbaren Flächenanteils der verschatteten Fensterfläche zur unverschatteten Fensterfläche und wurde mithilfe der aufgezeichneten Versuchsdaten und Lichtsimulationen ermittelt. Die zweite Dimension ist der Einfluss dessen, was man beim Blick nach draußen sehen kann. Dieser wird im Weiteren „view-content“ genannt. Diverse Untersuchungen^{2,3} haben gezeigt, dass dies eine Rolle in der Bewertung von Blendung durch Tageslicht spielen kann. Für diese Auswertung werden nur Daten aus der Aussichtsversuchsreihe herangezogen, damit die Bandbreite der Aussichts-Versuchskonfigurationen (~ view-ratios) möglichst gleichmäßig verteilt sind.

Die Hypothese ist, dass eine Situation weniger blendend bewertet wird, wenn mehr Sichtkontakt nach außen besteht. Folgende Formel wurde dabei entwickelt:

$$DGP_{viewratio} = \frac{DGP}{(1 + 0.5 * viewratio)}$$

Führt man eine Korrelationsanalyse durch, so kann ein geringer Einfluss nachgewiesen werden (der sich durch mehrere statistische Tests bestätigt). Vor allem, wenn der Nutzer das System nach eigenen Wünschen optimiert hat, ergibt sich ein deutlicher Anstieg der Korrelation durch Berücksichtigung des view-ratios. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Pearsonschen Korrelationskoeffizienten zwischen Nutzerbewertung und DGP sowie $DGP_{viewratio}$:

	DGP	$DGP_{viewratio}$
Voreingestellt	0.51	0.531
Nutzereingestellt	0.263	0.338

Zur Untersuchung des Einflusses des view-content wurden sämtliche Versuche der Aussichtsreihe ein zweites Mal durchgeführt. Die Testräume wurden dabei gedreht, so dass eine stark unterschiedliche Aussicht gegeben war. Eine Aussicht ist dabei eher als „urban“ zu bezeichnen

² Hellinga HY, & Bruin-Hordijk, GJ de. Assessment of daylight and view quality: a field study in office buildings, CIE conference 2010: Lighting Quality and Energy Efficiency (pp. 326-331).

³ Tuaycharoen, N. The Reduction of Discomfort Glare from Windows by Interesting Views. PhD thesis, School of Architecture. Sheffield: University of Sheffield, 2006.

(Blick über Dächer hinweg in die städtische Umgebung). Die zweite Aussicht ist eher als „technischer Hinterhof“ zu bezeichnen (Blick auf die Rückseite eines Lagercontainers). Die Reihenfolge der Versuche wurde statistisch variiert, so dass eine Beeinflussung durch die Versuchsreihenfolge ausgeschlossen werden kann. Zur Modifikation des DGP wurde die jeweilige nutzerspezifische Bewertung der Aussicht herangezogen.

Trotz der großen Unterschiede zwischen den beiden Aussichtskonfigurationen konnte kein statistisch signifikanter Einfluss nachgewiesen werden – unabhängig davon, welcher Datensatz und welcher statistische Test angewandt wurde.

Alterseinfluss

Zur Untersuchung des Alterseinflusses wurden Versuche mit Probanden unterschiedlichen Alters durchgeführt. Bislang existierende Bewertungsverfahren für die Blendung durch künstliche Beleuchtung berücksichtigen die höhere Blendungsempfindlichkeit mit steigendem Alter. Aus diesem Grund ist die Hypothese, dass auch unter Tageslichtverhältnissen mit zunehmendem Alter eine zunehmende Blendungsempfindlichkeit auftritt. Die Versuchsdaten bestätigen die Hypothese, es kann ein signifikanter Alterseinfluss nachgewiesen werden. Mit der Formel

$$DGP_{age} = \frac{DGP}{(1.1 - 0.5 * \frac{age}{100})}$$

ergibt sich eine Verbesserung der Korrelation von 0.420 (DGP ohne Modifikation) auf 0.431 (Alle Versuchsdaten, Versuchsphasen vor und nach Verstellung berücksichtigt).

Als Konsequenz ergibt sich, dass die DGP_{age} Formel für eine 60 jährige Altersgruppe den Original-DGP (Basisalter 20 Jahre) um 25% modifiziert.

Helligkeitseinfluss

Der existierende, unmodifizierte DGP hat einen Gültigkeitsbereich von 0.2 bis 0.8. Die Limitierung auf diesen Bereich war aufgrund der Versuchsbedingungen der damaligen Versuche festgelegt worden. Die existierende Formel lässt auch aus diesem Grund keine Werte zu, die kleiner als 0.16 sind (konstanter Term der Formel). Ziel der neuen Versuchsreihe „Helligkeitseinfluss“ ist, einen Korrekturfaktor für Szenen mit geringem Blendrisiko abzuleiten. Dies gestaltet sich generell sehr schwer, da in diesem Bereich so gut wie keine Blendung auftritt. Eine Änderung in den Versuchsbedingungen führt somit nicht unbedingt zu einer Änderung der Blendungsbewertung. Der Ansatz für die Modifikation in diesen sog. „low-light“ Bereich wurde so gewählt, dass der Korrekturfaktor einer S-Funktion entspricht, die bei DGP-Werten von 0.2 (bzw. einer vertikalen Beleuchtungsstärke von ca. 680 lx) den Korrekturfaktor 1 ergibt und bei 0 lx ca. 0 ergibt. Für alle Daten, deren unmodifizierter DGP < 0.2 ist, ergibt sich durch die Korrektur eine Verbesserung der Pearsonschen Korrelation von 0.10 auf 0.23. Erwartungsgemäß führt die Anwendung auf den kompletten Datensatz zu einer sehr geringen Änderung der Korrelation, da von der Modifikation nur die kleinen Werte betroffen sind (0.4197 für DGP unmodifiziert <-> 0.4201 für DGP_{lowlight}). Der modifizierte DGP hat folgende Form:

$$DGP_{lowlight} = DGP \frac{e^{0.024 * E_v - 4}}{1 + e^{0.024 * E_v - 4}}$$

mit E_v : vertikale Beleuchtungsstärke [lux]

Kontrastmodell

Das bisherige Standard-Kontrastmodell (wird von ISO 9241-303:2008 sowie ISO 13406-2 verwendet) ist eine Funktion des Alters und der „Low-State“ Leuchtdichte des Monitors:

$$CR_{min} = K_{age} \cdot (a + \frac{b}{L_L})$$

Wobei K_{age} : Altersfaktor
 L_L : „Low state“ Leuchtdichte
 CR_{min} : Minimalkontrast für eine visuelle Aufgabe an einem Bildschirm

Diese Formel berücksichtigt nicht den Adaptionszustand des Auges – es ist jedoch anzunehmen, dass dieser die Lesbarkeit von Bildschirmhalten beeinflusst. Bei Arbeiten am

Bildschirm wird der Adaptionszustand des Auges nicht nur durch die Sehaufgabe, sondern auch durch die Umgebungsleuchtdichte beeinflusst – insbesondere bei Tageslicht beleuchteten Arbeitsplätzen. Das neue Kontrastmodell sollte aufgrund dieser Hypothese die Umgebungsleuchtdichte berücksichtigen. Berechnet wird die Umgebungsleuchtdichte bei den Experimenten aus den Leuchtdichtebildern. Des Weiteren berücksichtigt das neue Modell die Polarität der Bildschirmdarstellung („Polarity factor“), und ob der berechnete Kontrast der zum Lesen notwendige oder ein vom Nutzer komfortabel bewerteter sein soll („Comfort factor“). Die neue Formel ergibt sich zu:

$$MRC = K_{age} \cdot \left[1.1 + 0.33 \cdot CF + 0.37 \cdot PF + 16.2 \cdot \left(\frac{L_E^{0.41}}{L_L^{1.54}} \right) \right]^4$$

Wobei

CF: Comfort factor
0 für Bewertung der Lesbarkeit
1 für Bewertung des Komforts

PF: Polarity factor
0 für positive Polarität
1 für negative Polarität

Kontrastmodell-Validierung

Der Vergleich zwischen dem beobachteten Kontrast und dem vorhergesagten Kontrast des alten und des neuen Modells zeigt, dass das neu entwickelte Modell eine erhebliche Verbesserung darstellt ($R^2(\text{neues Modell})=0.96$, $R^2(\text{altes Modell})=0.147$). Dieses Ergebnis hat sich bei verschiedenen statistischen Tests bestätigt. Der Ausschluss der vergleichsweise selten auftretenden hohen Werte führt zu keiner Veränderung der Korrelation ($r\text{RSME}(\text{alle Daten})=22.8\%$, $r\text{RSME}(\text{ohne Extremwerte})=23\%$). Auch das Bootstrapping-Verfahren zeigt keinerlei Einfluss auf die Korrelation.

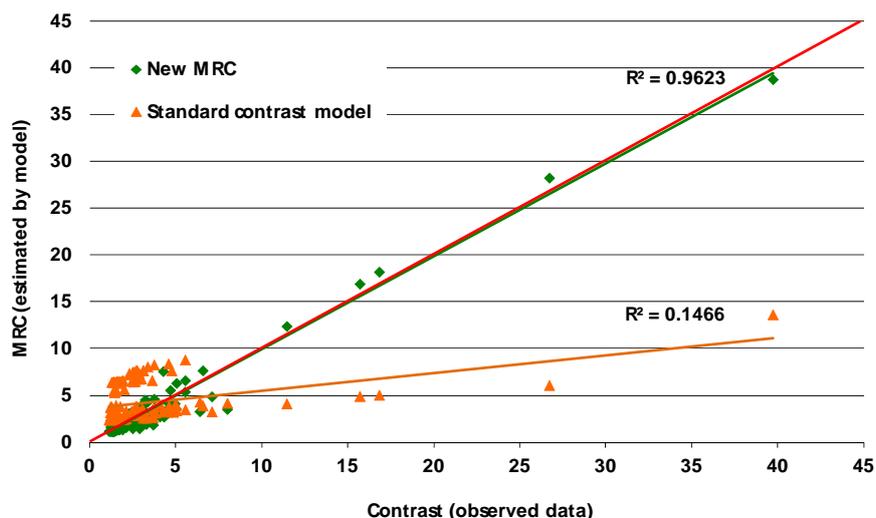


Abb. 1: Vergleich des beobachteten (Versuche) und vorhergesagten (Modelle) Kontrasts

Zur zusätzlichen Validierung des Modells wurden Tests herangezogen, die nicht zur Modellentwicklung verwendet worden waren. Es sind die Tests der anderen Versuchsreihen, die im Laufe des Projektes durchgeführt wurden (Aussichtsreihe, Helligkeitsreihe, Altersreihe). Herangezogen wurde hierbei der aus den Versuchsdaten ermittelte Schwellenkontrast für die Lesbarkeit von sog. Landoltringen, die mit unterschiedlichsten Kontrasten auf dem Bildschirm dargestellt wurden. Das „alte“ Kontrastmodell weist einen Pearsonschen Korrelationskoeffizienten von 0.49 auf, das neue Modell einen von 0.73 (beide $p < 0.001$). Diese Validierung zeigt, dass das neue Modell trotz deutlich anderer Versuchsbedingungen robust ist und eine deutliche Verbesserung im Vergleich zum Standardmodell bedeutet.

Feldversuche

Die Nutzer bewerten die Beleuchtung ihres Arbeitsplatzes überwiegend positiv. Das Urteil „eher gut / sehr gut“ wird für die Beleuchtung mit Tageslicht und vorhandener Verschattung von

⁴ Nach Abschluss des Projektes werden weitere Optimierungen dieser Formel durchgeführt – es zu erwarten, dass diese sich geringfügig ändern wird. Eine Veröffentlichung der optimierten Formel ist für 2013 vorgesehen.

54,2% der Nutzer abgegeben (N=790), für die Beleuchtung mit Kunstlicht von 55,2% (N=933). Beide Bewertungen korrelieren miteinander (Pearson $r=0.353$, $p<0.001$, N=770).

Überprüfung des DGP im Feld

Bei der Anpassung der Leuchtdichtebilder an die Blickrichtung der Probanden ergab sich ein etwas höheres Bestimmtheitsmaß (Regressionsanalyse, RE-Modell: $R^2=0.267$, $F=285.2$, N=797) im Vergleich zum DGP-Wert ohne Berücksichtigung der Blickrichtung ($R^2=0.258$, $F=282.1$, N=824). Aufgrund der Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Blickrichtung der Probanden bei Beantwortung der Blendungsfragen und des relativ geringen Effekts auf das Bestimmtheitsmaß wird die Blickrichtung in den weiteren Analysen nicht berücksichtigt.

Wird der Abstand zwischen dem Arbeitsplatz des Probanden und der Position des Messgeräts berücksichtigt, so zeigt sich kein signifikanter Effekt ($R^2=0.258$, $F=139.8$, N=817). Auch die Distanz zwischen Messgerät und Arbeitsplatz wird daher im Weiteren nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Felduntersuchungen bestätigen die höhere Aussagekraft des DGP im Vergleich zum Daylight Glare Index DGI. Die aus den fensternah aufgenommenen Leuchtdichtebildern berechneten DGP-Werte erklären einen Teil der Varianz der Nutzerbewertung der Blendung durch das Fenster (Regressionsanalyse, RE-Modell: $R^2=0.258$, $F=282.1$, N=824). Die Erweiterung des DGP für niedrige Beleuchtungsstärken (DGP_{lowlight}) wurde bei allen Auswertungen verwendet.

Bei der Berechnung des Daylight Glare Index DGI wurde abweichend von der Definition des DGI die Blendquellenleuchtdichte statt der Fensterleuchtdichte verwendet. Der hier ausgewiesene DGI-Wert korreliert dadurch stärker mit der Blendungsbewertung der Nutzer als der Original-DGI. Das Bestimmtheitsmaß für den hier ermittelten DGI ist trotzdem etwas geringer als für den DGP-Wert (Regressionsanalyse, RE-Modell: $R^2=0.254$, $F=275.2$, N=824).

Neben der Überprüfung der bestehenden DGP-Formel wurde auch im Feld der Einfluss der Aussicht („view-ratio“) und des Alters der Probanden untersucht. Für beide Faktoren bestätigt sich der in den Testräumen ermittelte Einfluss: Der $DGP_{\text{viewratio}}$ weist ein Bestimmtheitsmaß von 26,4% auf, der DGP_{age} ein Bestimmtheitsmaß von 26,3%. Werden beide Faktoren gleichzeitig berücksichtigt, so erhöht sich das Bestimmtheitsmaß auf 26,9% (Regressionsanalyse, RE-Modell: $R^2=0.269$, $F=274.3$, N=751).

Umgang der Nutzer mit Sonnen- und Blendschutz

Die Auswertung der Nutzereingriffe bestätigt die Aussage des $DGP_{\text{viewratio}}$. Das Schließen des Sonnen- oder Blendschutzsystems erfolgt bei einem mittleren $DGP_{\text{viewratio}}$ von 0.49. Dabei bestehen signifikante Unterschiede zwischen den Jahreszeiten: Im Sommer wird das System bei einem mittleren $DGP_{\text{viewratio}}$ von 0.46 geschlossen, in den übrigen Jahreszeiten bei höheren $DGP_{\text{viewratio}}$ -Werten (Frühling und Winter 0.50, Herbst 0.51; ANOVA: $F=7.8$, $p<0.001$, N=1735).

Der $DGP_{\text{viewratio}}$ -Wert, der von den Nutzern beim Schließen des Systems „eingestellt“ wird, liegt im Mittel bei 0.29. Die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten sind noch deutlicher als bei den DGP-Werten, die Anlass für den Eingriff waren: Im Sommer beträgt der $DGP_{\text{viewratio}}$ nach Schließen des Systems durchschnittlich 0.25, im Frühling 0.29, im Herbst 0.31 und im Winter 0.32. Auch diese Unterschiede sind signifikant (ANOVA: $F=33.2$, $p<0.001$, N=1735).

Nach Angaben der Nutzer ist der Schutz vor Blendung in allen Jahreszeiten der häufigste Anlass für das Schließen des Sonnenschutzes (bei 77% der Befragungen genannt), im Sommer ist der Schutz vor unerwünschter Wärme ein ebenfalls häufig genannter Anlass (66%), der den etwas früheren und wirksameren Einsatz des Sonnenschutzes erklärt.

Gleichzeitig wird Blendung im Sommer bei tendenziell niedrigeren DGP-Werten als wahrnehmbar oder störend empfunden als in den übrigen Jahreszeiten. Der mittlere $DGP_{\text{viewratio}}$ -Wert bei mindestens wahrnehmbarer Blendung beträgt im Sommer 0.29, im Frühling und Herbst 0.32, im Winter 0.36 (ANOVA: $F=2.1$, $p=0.105$, N=262). Die Nutzer sind Blendung gegenüber im Sommer also weniger tolerant als in den anderen Jahreszeiten.

Das Öffnen des Sonnen- oder Blendschutzes erfolgt überwiegend in den Morgen- und Abendstunden bei einem mittleren $DGP_{\text{viewratio}}$ von 0.13. Der Sonnen- oder Blendschutz wird überwiegend vollständig oder fast vollständig geöffnet ($\text{viewratio} \geq 0.75$ bei 75,7% der

Nutzereingriffe). Der nach dem Eingriff vorliegende $DGP_{viewratio}$ beträgt im Mittel 0.23, die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten sind nur gering.

Auch der Ausblick aus dem Fenster beeinflusst den Umgang der Nutzer mit dem Sonnenschutzsystem. Die $DGP_{viewratio}$ -Werte vor dem Schließen des Systems sind bei durch Gebäude oder Gebäudeteile eingeschränktem Ausblick niedriger (0.44) als bei durch Bäume eingeschränktem Ausblick (0.48) oder uneingeschränktem Ausblick (0.52), diese Unterschiede sind signifikant (ANOVA: $F=18.3$, $p<0.001$, $N=1577$). Bei uneingeschränktem Ausblick wird im Mittel ein Durchsichtsanteil von 33% eingestellt, wenn Gebäude oder Bäume die Aussicht einschränken wird der Sonnenschutz weniger weit geschlossen ($viewratio$ 42%).

Helligkeit am Arbeitsplatz

Ein Aspekt der visuellen Qualität von Arbeitsplätzen ist die Nutzerzufriedenheit mit der Helligkeit am Arbeitsplatz. Sie hängt von der empfundenen Einschränkung der Aussicht durch Fenstergröße und Verbauung ab. Auch die Zufriedenheit mit der Bedienbarkeit des Sonnenschutzes, das Alter der Nutzer, die Beleuchtungsstärke und die Zufriedenheit mit der Temperatur beeinflussen das Urteil signifikant (Regressionsanalyse, RE-Modell: $R^2=0.221$, $F=23.8$, $N=516$).

Der Mittelwert der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz während der Befragungen liegt bei 911 lx, bei einer sehr großen Streuung der Messwerte. Der Mittelwert der Beleuchtungsstärken, die unter Tageslichtbedingungen als weder hell noch dunkel empfunden wurden, liegt bei 859 lx.

Die vorgefundene Beleuchtungsstärke liegt bei jüngeren Probanden tendenziell höher als bei älteren (ANOVA: $F=1.988$, $p=0.114$, $N=756$). Der Mittelwert bei Probanden unter 30 Jahren ist 1023 lx, bei Probanden über 50 Jahren nur 810 lx. Mit dieser – im Rahmen der Möglichkeiten des jeweiligen Gebäudes – selbst gewählten Helligkeit sind die Nutzer überwiegend zufrieden: 67% wünschen sich keine Veränderung des Helligkeitsniveaus. Nur 9% der Probanden geben an, ein „eher dunkleres“ oder „deutlich dunkleres“ Helligkeitsniveau zu bevorzugen, 24% der Nutzer hätten dagegen gerne „eher mehr“ oder sogar „deutlich mehr“ Helligkeit am Arbeitsplatz. Neben dem Alter hat – wie auch beim thermischen Komfort – die Adaption der Nutzer einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der am Arbeitsplatz vorhandenen Helligkeit: Der Wertebereich, der im Sommer als weder hell noch dunkel empfunden wird, wird im Winter als sehr hell bewertet (signifikanter Einfluss der Jahreszeit auf die Helligkeitsbewertung der vorhandenen Beleuchtungsstärke, GLM: $R^2=0.067$, $F=13.437$, $p=0.000$, $N=758$).

Der Wertebereich der Beleuchtungsstärken, die den Wünschen der Nutzer entsprechen, liegt in Gebäuden mit moderaten Fensterflächenanteilen (Fassaden mit einzelnen Fenstern oder Fensterbändern) im Frühling und Winter niedriger als bei Gebäuden mit Ganzglasfassaden. Im Sommer und Herbst (Kühlperiode) ist der neutrale Wertebereich in den Gebäuden mit Ganzglasfassade nach unten verschoben – möglicherweise spielt der regelmäßige Einsatz des Sonnenschutzes (potentiell hohe thermische Solarlast, Blendung durch Tageslicht) eine Rolle.

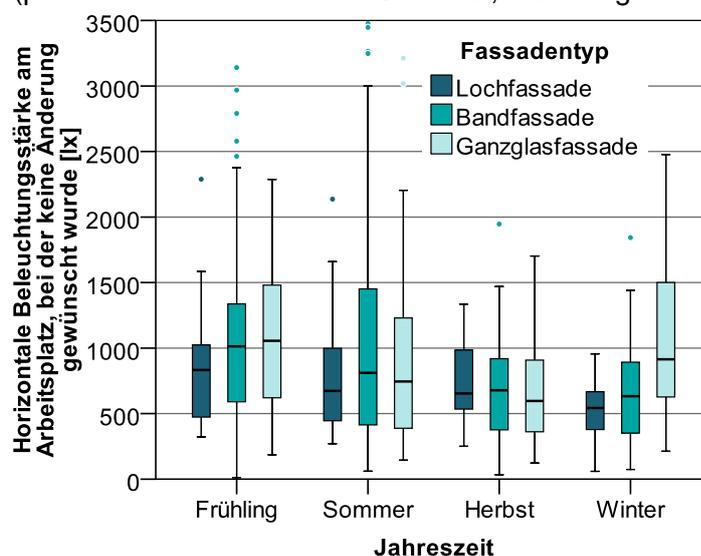


Abb. 2: Boxplot der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz, bei der keine Veränderung gewünscht wurde, in Abhängigkeit von Jahreszeit und Fassadentyp.

Die zylindrische Beleuchtungsstärke wurde in dieser Felduntersuchung in Fensternähe gemessen. Der durchschnittliche Abstand der Sensoren zum Fenster betrug 0,97 m, die Arbeitsplätze befanden sich durchschnittlich 2,26 m von der Fensterebene entfernt. Somit sind die Messwerte nicht direkt mit den Vorgaben der prEN 12464-1:2009 vergleichbar, die sich auf den „Bereich der Tätigkeit“ bezieht. Der Mittelwert der zylindrischen Beleuchtungsstärke während der Befragungen, in denen die Nutzer die Helligkeit am Arbeitsplatz als weder hell noch dunkel bewertet haben, liegt bei 1479 lx.

Umgang der Nutzer mit Kunstlicht

Neben der Nutzerbewertung während der Befragungen liegt mit den Nutzereingriffen ein weiteres indirektes Nutzerurteil vor. Das Einschalten des Kunstlichtes kann als Nutzerbewertung interpretiert werden, dass die Situation vor dem Einschalten als zu dunkel empfunden wurde. Ob das Einschalten aufgrund der als zu gering empfundenen horizontalen Beleuchtungsstärke (Mittelwert vor dem Einschalten 321 lx) oder aufgrund der als zu gering empfundenen zylindrischen Beleuchtungsstärke (Mittelwert E_{zyl} in Fensternähe vor dem Einschalten 459 lx) erfolgt ist, kann nicht festgestellt werden. Die Messwerte legen nahe, dass Nutzer auch bei der zylindrischen Beleuchtungsstärke Werte oberhalb der Mindestanforderung des Normentwurfs von 50 lx bevorzugen.

In vier der untersuchten Gebäude wird das Kunstlicht manuell geschaltet, in fünf Gebäuden ist das Kunstlicht tageslicht- und teilweise zusätzlich präsenzabhängig geregelt. Die Zufriedenheit der Nutzer mit der künstlichen Beleuchtung ist groß. 75% der Nutzerbewertungen bei rein manuell gesteuerten Kunstlichtanlagen und 65% der Bewertungen bei tageslichtabhängig geregelten Kunstlichtanlagen sind „weder zu dunkel noch zu hell“. Der Anteil Nutzer, der die künstliche Beleuchtung des Arbeitsplatzes als „eher zu dunkel“ oder „zu dunkel“ empfindet, ist bei tageslichtabhängig geregelten Anlagen mit 22% größer als bei manuell gesteuerten Anlagen (7%). Die Varianzanalyse zeigt einen signifikanten Unterschied der Nutzerbewertung in Abhängigkeit von der Kunstlichtsteuerung ($F=27.8$, $p<0.001$, $N=826$).

Das Ein- und Ausschalten des Kunstlichtes wurde in sieben der neun untersuchten Gebäude erfasst. Das Einschalten des Kunstlichtes erfolgt überwiegend zwischen 6:00 und 10:00 Uhr (52%, $N=3616$), das Ausschalten überwiegend zwischen 11:00 und 13:00 Uhr (17%, $N=3602$) und zwischen 16:00 und 19:00 Uhr (29%, $N=3602$).

Die mittlere Brenndauer einer Leuchte hängt von der Jahreszeit und Steuerung der Leuchten ab: In den Gebäuden mit rein manueller Schaltung der Beleuchtung liegt der Mittelwert bei 3,9 h pro Arbeitstag, in den Gebäuden mit automatischer Steuerung liegt der Mittelwert bei nur 2,5 h pro Arbeitstag. In einem Gebäude, in dem die Lichtschalter sich nicht im Raum befinden, brennt das Kunstlicht mit durchschnittlich 6,2 h pro Arbeitstag signifikant länger.

Bewertung der Tageslichtversorgung

Die Bewertung der Tageslichtversorgung ist an den untersuchten Arbeitsplätzen überwiegend positiv. Folgende Faktoren konnten als diejenigen mit dem größten Einfluss auf die Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung identifiziert werden:

- Häufigkeit der Blendung durch das Fenster
- Einschränkung des Ausblicks durch die Fenstergröße
- Bewertung des Ausblicks (angenehm – unangenehm)
- Bedienbarkeit des Sonnenschutzes
- Zufriedenheit mit der Temperatur
- Zufriedenheit mit der Arbeitstätigkeit

Diese Faktoren erklären insgesamt 30% der Streuung (Regressionsanalyse, Hybridmodell: $R^2=0.302$, $F=20.4$, $N=582$).

Die gemessenen Tageslichtquotienten (orientierende Messungen, siehe 3.2) sind in den jeweiligen Gebäuden bzw. Gebäudeteilen sehr unterschiedlich, die Unterschiede sind statistisch signifikant (ANOVA: $F=15.2$, $p<0.001$, $N=370$; Gebäudemittelwerte Minimum 0.90, Mittelwert 2.90, Maximum 5.40). Der gemessene Tageslichtquotient am Arbeitsplatz hat keinen statistisch signifikanten Effekt ($p=0.299$) auf die Nutzerbewertung der Versorgung mit Tageslicht ohne Verschattung (Regressionsanalyse, Hybridmodell, $N=776$).

Die befragten Nutzer präferieren moderate Fensterflächenanteile: Das Nutzerurteil „das Fenster ist zu klein / eher zu klein“ wird bei einem mittleren Fensterflächenanteil von 43% bezogen auf die Nettofassade abgegeben, „gerade richtig“ bei durchschnittlich 58%, „eher zu groß“ bei durchschnittlich 71% und „zu groß“ bei 97% Fensterflächenanteil.

Räume zu Atrien werden von den Nutzern auch bei vergleichbarem Tageslichtquotienten und deutlich größerem Fensterflächenanteil als weniger gut Tageslicht versorgt bewertet als außen liegende Räume (ANOVA: $F=6.785$, $p=0.011$, $N=82$).

Neben Atrium und Fensterflächenanteil ist die Büroform ein weiterer architektonischer Parameter, der die Zufriedenheit der Nutzer stark beeinflusst. In Großraumbüros ist die Zufriedenheit mit fast allen abgefragten Aspekten signifikant niedriger als in Zellenbüros. Besonders groß ist der Unterschied bei der Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel, die Zufriedenheit mit dem Kunstlicht unterscheidet sich nicht signifikant.

In drei der untersuchten Gebäude wird der Sonnenschutz automatisch gesteuert. 69% der Bewertung des Steuerung sind negativ, nur 12% der Nutzer sind zufrieden ($N=268$).

3.4 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Die Testraumversuche haben aufgezeigt, wie wichtig das Thema Sichtkontakt bei der Bewertung von Tageslicht ist. Gleichzeitig sind die Nutzer in Bürogebäuden mit vorhandenen Regelstrategien von Verschattungssystemen unzufrieden.

Hieraus ergibt sich ein großes Optimierungspotential. Einerseits sollten Sonnenschutzsysteme bzw. Fassadensysteme so konzipiert werden, dass die Nutzerwünsche an Aussicht befriedigt werden. Auf der anderen Seite müssen Regelstrategien entwickelt werden, die einerseits die Nutzerwünsche (z.B. nach Aussicht, Blendschutz und thermischen Komfort) erfüllen, die andererseits aber auch energetisch optimiert sein sollten. Bisherige Regler basieren auf sehr einfachen Algorithmen, die nicht an Nutzerwünsche angepasst sind.

Die Ergebnisse der Felduntersuchung zeigen auch für die tageslichtabhängige Regelung von Kunstlicht ein großes Optimierungspotential. Bestehende Regelstrategien realisieren das energetische Einsparpotential, ohne Nutzerwünsche ausreichend zu berücksichtigen, die von zahlreichen Faktoren beeinflusst werden und nicht statisch sind. Eine weitere Untersuchung der Zusammenhänge ist notwendig, um stromsparende Kunstlichtanlagen mit großer Nutzerakzeptanz planen zu können.

Die Zufriedenheit der Nutzer ist ein wichtiger Aspekt bei der Planung nachhaltiger Gebäude. Aus den Ergebnissen der Felduntersuchung können Hinweise abgeleitet werden, welche Faktoren die Zufriedenheit der Nutzer mit einem Gebäude und mit der Beleuchtung beeinflussen, die bei der Planung von nutzerfreundlichen Gebäuden Anwendung finden können. Dazu gehören neben der Möglichkeit, eine Beleuchtungsstärke oberhalb der Mindestanforderungen bereitstellen zu können auch einfache Anpassungsmöglichkeiten von Kunstlicht und Sonnenschutz durch die Nutzer sowie die Vermeidung von Großraumbüros und moderate Fensterflächenanteile.

3.5 Beteiligte Wissenschaftler

Beteiligte Wissenschaftler am ISE:

Prof. Dr. Volker Wittwer: Koordination des Projektes

Dipl.-Ing. Niloofar Moghbel: Kontrastuntersuchungen, Entwicklung eines neuen Kontrastmodells (Arbeitspakete 2.05-2.09). Dissertation.

Dr.-Ing. Jan Wienold: Wissenschaftliche Bearbeitung des Projektes, Aufbereitung und Auswertung der Daten, Entwicklung der Modifikationsformeln für die Blendungsbewertung

Dipl.-Ing. Sandra Mende: Durchführung von Versuchen, Aufbereitung und Auswertung der Versuchsdaten

Dipl.-Psych. Gisela Vogt: Unterstützung bei der Erstellung des Fragebogens für die Felduntersuchungen

Dr. Helen-Rose Wilson: Spektrale Vermessung von Folien. Berechnung der Farbwiedergabe diverser Folien-Glas Kombinationen.

Beteiligte Wissenschaftler am fbta, KIT:

Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner: Koordination des Projektes

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Alexis Bikos: Entwicklung von Messgeräten zur Messung von Beleuchtungsstärke und Schall (Arbeitspaket 7)

Dipl.-Ing. Arne Abromeit: Entwicklung einer Leuchtdichtekamera für Felduntersuchungen (Arbeitspaket 7)

Dipl.-Ing. Cornelia Moosmann: Entwicklung des Fragebogens und der Methodik der Felduntersuchungen, Durchführung der Felduntersuchung, Auswertung der Ergebnisse aus Messung und Befragung, Entwicklung eines Bewertungsverfahrens (Arbeitspakete 1, 6, 7-12, 2.03, 2.04). Die Arbeiten werden im Rahmen einer Dissertation fortgeführt.

Wissenschaftler, die das Projekt als externe Berater unterstützt haben:

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz, Fachgebiet Lichttechnik, TU Ilmenau: externer Berater während der gesamten Projektlaufzeit

Prof. Dr. Jürgen Hoffmeyer-Zlotnik und Dr. Natalja Menold, Center for Survey Design & Methodology der GESIS - Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften, Mannheim: Unterstützung bei der Erstellung des Fragebogens für die Felduntersuchungen

Prof. Dr. Bernhard Schäfers und Alexa Kunz, M.A., Institut für Soziologie, Medien- und Kulturwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH): Unterstützung bei der Erstellung des Fragebogens für die Felduntersuchungen

PD Dr. Henning Best, Center for Survey Design & Methodology der GESIS - Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften, Mannheim: Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Felduntersuchung

Dr. Rainer Leonhart, Institut für Psychologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Testraumuntersuchung

Dipl.-Inform. Wolfgang Schotte, Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Unterstützung bei automatisierter Bildauswertung, Bilderkennung und Data-Mining

Prof. emeritus Dr. Siegfried Kokoschka, Lichttechnisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Berater für die Erstellung der neuen Kontrastmodelle

4 Publikationen

- N. Moghbel: New Model for VDT Associated Visual Comfort in Office Spaces. Dissertation. Karlsruhe, 2012. urn:nbn:de:swb:90-294219
- C. Moosmann, A. Wagner: Nutzerbewertung der Lichtsituation am Büroarbeitsplatz. Tagungsband 15. Anwenderforum Lichttechnik, Regensburg, März 2011.
- C. Moosmann, A. Wagner: Visueller Komfort am Büroarbeitsplatz. Tagungsband Licht 2010, Wien, Oktober 2010.
- C. Moosmann, J. Wienold, A. Wagner, V. Wittwer: Age effects on glare perception under daylight conditions. Tagungsband LuxEuropa 2009, Istanbul, September 2009.
- C. Moosmann, J. Wienold, A. Wagner, V. Wittwer: Tageslichtnutzung und Sichtkontakt am Büroarbeitsplatz. Tagungsband Symposium Licht + Architektur, Kloster Banz, Februar 2009.
- C. Moosmann, J. Wienold, A. Wagner, V. Wittwer: Nutzerbewertung von Tageslicht am Büroarbeitsplatz. Tagungsband Licht 2008, Ilmenau, September 2008.
- A. Abromeit, A. Wagner: Kostengünstige Leuchtdichtekameras mit CMOS-Sensoren. Tagungsband Licht 2008. Ilmenau, September 2008.
- A. Bikos: QUANTA – Messtechnikentwicklung: kostengünstige multifunktionale Sensoren für Felduntersuchungen. Interner Bericht. 2009