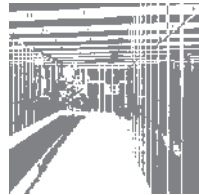


Cornelia Moosmann

Visueller Komfort und Tageslicht am Büroarbeitsplatz

Eine Felduntersuchung in neun Gebäuden



Cornelia Moosmann

Visueller Komfort und Tageslicht am Büroarbeitsplatz.
Eine Felduntersuchung in neun Gebäuden

Visueller Komfort und Tageslicht am Büroarbeitsplatz. Eine Felduntersuchung in neun Gebäuden

von
Cornelia Moosmann

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Architektur, 2014

Tag der mündlichen Prüfung: 17. September 2014

Gutachter: Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner, Prof. Dr. sc. nat. habil. Christoph Schierz

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2014

ISBN 978-3-7315-0312-5

DOI 10.5445/KSP/1000044751

Denn die bloße Empfindung des Lichts, auch von dem Wahrnehmen aller Gegenstände gänzlich abstrahiert, hat etwas unendlich Wohlthätiges und Erfreuliches, und gehört in vieler Beziehung auch zu dem heitern und fruchtbringenden innern geistigen Leben. Das Licht ist wenigstens unter allen uns bekannten Materien die am wenigsten körperliche. Es hängt, ohne daß man selbst sagen kann, wie das zugeht, mit dem Leben selbst zusammen, und Leben, Licht und Luft sind wie verwandte, immer zusammengedachte, das irdische Dasein erst recht möglich machende Dinge. Wunderbar ist es auch, daß die Finsterniß selbst den Reiz, den sie offenbar hat, verlieren muß, wenn sie zur beständigen Begleiterin des Lebens wird. Jedoch ist es nicht zu leugnen, daß die Finsterniß eine süße Ruhe gegen das Licht des Tages gewährt. Allein die angenehme Empfindung beruht nur darauf, daß der Tag vorangegangen ist, und daß man sicher ist, daß er nachfolgen wird. Nur der Wechsel ist wohlthätig. Unaufhörliches Tageslicht ermüdet.

Wilhelm von Humboldt, Briefe an eine Freundin, 30.9.1829

Danksagung

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Felduntersuchung habe ich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta) an der Universität Karlsruhe (TH) bzw. dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Sie wurde von Januar 2007 bis April 2011 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter den Förderkennzeichen WA 1155/5-1 und WA 1155/5-2 gefördert.

Mein Dank gilt zuerst Herrn Prof. Andreas Wagner für sein Vertrauen und für die Möglichkeit, am fbta selbständig an spannenden Projekten zu arbeiten. Herrn Prof. Christoph Schierz danke ich für seine freundschaftliche Begleitung der Arbeit, für seine Fragen, die mich immer weiter gebracht haben, und für seine Bereitschaft, als Gutachter zur Verfügung zu stehen.

Jan Wienold danke ich für seine Hilfe bei der Aufbereitung der Leuchtdichtebilder für die Auswertung mit der Software „evalglare“, für deren Erweiterung um Funktionen, die die automatisierte Berechnung von Blendungsindizes ermöglichten, und für die fruchtbaren Diskussionen während der gemeinsamen Antragstellung und beim Erarbeiten gemeinsamer Tagungsbeiträge.

Herrn Prof. Dr. Hoffmeier-Zlotnik und Frau Dr. Menold vom Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften GESIS danke ich für die kritische Prüfung meines Fragebogens und für ihre konstruktiven Hinweise.

Meinen ehemaligen Kollegen Arne Abromeit, Alexis Bikos und Marco Röllig danke ich für ihren Einsatz bei der Entwicklung und Fertigung der eingesetzten Messtechnik. Sie haben mit langen Arbeitstagen und kurzen Nächten erreicht, dass trotz aller Unwägbarkeiten und Hürden alle Messgeräte wenige Stunden vor dem ersten Termin fertig kalibriert und einsatzbereit waren.

Ich danke den Unternehmen, die an der Felduntersuchung teilgenommen haben, und insbesondere meinen Ansprechpartnern in den Gebäuden für ihre Unterstützung und für ihre Hilfe bei der Abstimmung von Terminen und bei unverzichtbaren „Kleinigkeiten“ wie der Beschaffung von Leitern zum Anbringen der Messgeräte.

Den Probanden danke ich für ihre Bereitschaft, auf den Schreibtischen Platz zu finden für die Messgeräte und an den Befragungen teilzunehmen – ohne ihr Zutun wäre die Arbeit nicht möglich gewesen.

Herzlichen Dank „meinen Hiwis“ Simone Treier und Sabine Giesecke, die auch an langen Arbeitstagen unermüdlich und klaglos mitgeholfen haben, Messgeräte anzubringen und Fragebögen einzusammeln, und damit den Erfolg der Datenerhebung möglich gemacht haben.

Wolfgang Schotte danke ich für seine engagierte Unterstützung des Versuchs, in der riesigen Datenmenge der Leuchtdichtebilder automatisiert nach Veränderungen der Sonnenschutzposition zu suchen.

Meinen derzeitigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am fbta danke ich für die gute Zusammenarbeit und für ihre Freundschaft. Karin Schakib-Ekbatan möchte ich besonders danken. Sie hat mir immer wieder Mut gemacht, wenn er mich angesichts böhmischer Statistik-Dörfer wie „Wellen“ und „Sandwich-Schätzer“ verlassen hat.

Meinen Freunden bin ich dankbar dafür, dass sie sich noch an mich erinnern.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für ihre Unterstützung in allen Lebenslagen und meinem Mann für unzählige Obstsalate während der letzten Jahre, für die kritische Durchsicht des Textes, seine wertvolle Hilfe in der heißen Endphase und für die Gestaltung des Titeltbildes dieser Arbeit.

Inhalt

Kurzzusammenfassung.....	1
Visual comfort and daylight in offices.....	3
1 Einleitung.....	5
2 Stand der Forschung.....	7
2.1 Nutzerwünsche bezüglich Tageslichtversorgung und Fenster.....	7
2.1.1 Mindestfenstergröße	8
2.1.2 Atrien.....	10
2.1.3 Zusammenfassung.....	10
2.2 Präferierte Beleuchtungsstärke	11
2.2.1 Mindestbeleuchtungsstärke bei natürlicher Belichtung	12
2.2.2 Einfluss der Innentemperatur.....	13
2.2.3 Alterseinfluss.....	14
2.2.4 Zusammenfassung.....	14
2.3 Blendung durch Tageslicht.....	15
2.3.1 Informationsgehalt der Blendquelle.....	18
2.3.2 Normative Vorgaben	19
2.3.3 Zusammenfassung.....	19
2.4 Anforderungen an den Sonnenschutz oder Blendschutz.....	20
2.5 Umgang der Nutzer mit Kunstlicht und Sonnenschutz	20
2.5.1 Umgang der Nutzer mit dem Sonnenschutz	22
2.5.2 Zusammenfassung.....	23
2.6 Biologische Lichtwirkungen.....	24
2.6.1 Lichtwirkungen am Tage	24
2.6.2 Messung der „biologischen Wirksamkeit“ von Licht.....	26
2.6.3 Zusammenfassung.....	27
3 Fragestellung.....	29
3.1 Hypothesen.....	31
4 Methodik	33
4.1 Untersuchungsdesign.....	33
4.2 Anforderungen an die Stichprobe.....	35
4.3 Messgeräte.....	36
4.4 Fragebogen.....	39
4.5 Untersuchungsdurchführung.....	41
4.5.1 Messung des Lichtspektrums und des Tageslichtquotienten	46
4.6 Identifizierung von Nutzereingriffen	48
4.6.1 Automatisierte Bildauswertung	49
4.6.2 Nutzereingriffe Kunstlicht.....	53

4.7	Statistische Auswertung.....	56
4.7.1	χ^2 -Verfahren (Chi ² -Test).....	57
4.7.2	Varianzanalyse (Analysis of Variance ANOVA).....	57
4.7.3	Korrelationsanalyse.....	59
4.7.4	Regressionsanalyse.....	60
4.7.5	Regressionsanalyse von Paneldaten.....	64
4.7.6	Darstellung der Ergebnisse.....	65
5	Ergebnisse.....	67
5.1	Beschreibung der Stichprobe.....	67
5.1.1	Kurzbeschreibung der Gebäude.....	67
5.1.2	Räume.....	78
5.1.3	Probanden.....	79
5.2	Ergebnisse der Nutzerbefragung.....	81
5.2.1	Beeinträchtigung durch das Raumklima.....	82
5.2.2	Beleuchtung.....	83
5.2.3	Tageslichtversorgung.....	90
5.2.4	Blendung durch Tageslicht.....	93
5.2.5	Sonnen- und Blendschutz.....	99
5.2.6	Künstliche Beleuchtung.....	105
5.2.7	Raumtemperatur.....	109
5.2.8	Weitere Aspekte des Raumklimas.....	120
5.2.9	Architektonische Parameter – Lage und Gestaltung des Gebäudes.....	123
5.2.10	Zufriedenheit der Nutzer mit dem Raumklima.....	126
5.3	Auswertung der Nutzereingriffe.....	131
5.3.1	Nutzereingriffe Kunstlicht.....	131
5.3.2	Nutzereingriffe Sonnen-/Blendschutz.....	145
5.4	Auswertung der Messung des Tageslichtquotienten und des Lichtspektrums.....	157
5.4.1	Tageslichtquotient an den Arbeitsplätzen.....	157
5.4.2	Lichtspektrum an den Arbeitsplätzen.....	159
6	Diskussion.....	167
6.1	Auswertung der Nutzerbefragung.....	167
6.2	Auswertung der Nutzereingriffe.....	172
6.3	Einflüsse der Raumklimabedingungen und der Architektur.....	175
6.4	Auswertung der Messungen des Lichtspektrums.....	178
6.5	Weitere Befunde.....	179
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	181
8	Literaturverzeichnis.....	185
	Anhang.....	193

Kurzzusammenfassung

Die Zufriedenheit der Nutzer ist ein wichtiger Aspekt bei der Planung nachhaltiger Gebäude. Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Frage, von welchen Faktoren die Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung an Büroarbeitsplätzen im Alltag abhängt, und berücksichtigt jahreszeitliche Unterschiede.

Dafür wurde eine Felduntersuchung in neun Bürogebäuden durchgeführt. In jeder Jahreszeit wurden die Licht- und Raumklimabedingungen an mindestens 27 Arbeitsplätzen jedes Gebäudes zwei Wochen lang aufgezeichnet und von den Nutzern dieser Arbeitsplätze mittels eines standardisierten Fragebogens bewertet.

Die Nutzerbefragung wurde um die Analyse des Nutzerverhaltens ergänzt, das aus den aufgezeichneten Messwerten abgeleitet werden konnte und Rückschlüsse auf die Bedürfnisse der Nutzer und ihre Toleranzgrenzen ermöglicht.

Die Auswertung der knapp 1000 Fragebögen ergab, dass die Nutzer überwiegend eine Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz präferieren, die deutlich oberhalb der normativen Mindestanforderungen zur Erfüllung der Sehaufgabe liegt. Die Höhe der gewünschten Beleuchtungsstärke wird stark von der Außenbeleuchtungsstärke beeinflusst. Die Jahreszeiten sind ebenfalls von Bedeutung, im Frühling werden höhere Helligkeiten gewünscht als im Herbst oder Winter, und Blendung wird eher toleriert.

Im Sommer beeinflusst der thermische Komfort – insbesondere in Gebäuden mit großem Fensterflächenanteil – die präferierte Beleuchtungsstärke und das Verhalten. Nutzer, die ihren Arbeitsplatz als zu warm empfinden, bevorzugen geringere Beleuchtungsstärken. Der Sonnenschutz wird im Gegensatz zu den anderen Jahreszeiten, in denen er primär als Blendschutz verwendet wird, auch zum Schutz vor Wärmeeinträgen geschlossen. Dem entspricht, dass er im Sommer häufiger und rigoroser geschlossen wird.

Der Ausblick, den ein Fenster bietet, beeinflusst sowohl die gewünschte Beleuchtungsstärke als auch das Blendurteil: Je interessanter eine Aussicht, desto weniger blendend wird die betreffende Fensterfläche empfunden und desto höhere Beleuchtungsstärkewerte werden gewünscht. Die Wünsche der Nutzer werden zudem von der Architektur beeinflusst: Ein großer Fensterflächenanteil scheint zu vermitteln, dass die Tageslichtversorgung gut ist, entsprechend höher sind die Erwartungen an die Helligkeit am Arbeitsplatz. Räume an Atrien dagegen werden zwar als dunkler empfunden als außenliegende Räume, es werden aber auch geringere Beleuchtungsstärkewerte akzeptiert.

Die Außenbeleuchtungsstärke, die Jahreszeiten und die Architektur beeinflussen die Bewertung der Tageslichtversorgung und der Helligkeit, vermutlich bedingt durch die Erfahrungen der Nutzer, die sich in ihren Erwartungen und – je nachdem, wie gut diese erfüllt werden – in ihrer Zufriedenheit widerspiegeln.

Aus den Ergebnissen können Hinweise für die Planung von nutzerfreundlichen Gebäuden abgeleitet werden. Dazu gehören auf der Ebene der Architektur die Vermeidung von Großraumbüros, in denen die Nutzerzufriedenheit insgesamt geringer ist als in Zellenbüros, und die Gestaltung von Fassaden mit moderaten Fensterflächenanteilen um 60 %, die von den meisten Nutzern präferiert werden. Die Möglichkeit, störende Blendung den individuellen Bedürfnissen entsprechend reduzieren zu können, ist von entscheidender Bedeutung, insbesondere für ältere Nutzer von Bildschirmarbeitsplätzen.

Bei der aus energetischen Gründen sinnvollen tageslichtabhängigen Regelung von Kunstlicht und bei der automatischen Steuerung von Sonnenschutzsystemen bleiben Nutzerwünsche bisher – zumindest teilweise – unberücksichtigt.

Die Nutzerbewertungen zeigen, dass viele Nutzer schätzen, wenn die Kunstlichtanlage im Gegensatz zu einer energiesparenden Konstantlichtregelung Beleuchtungsstärken oberhalb der normativen Mindestanforderungen ermöglicht. Sie deuten außerdem darauf hin, dass eine Kunstlichtregelung, die die Jahreszeit, den thermischem Komfort und das vom Alter beeinflusste

individuell bevorzugte Helligkeitsniveau der Nutzer berücksichtigt, eine höhere Nutzerakzeptanz finden könnte. Die Steuerung des Sonnenschutzes muss für die Nutzer nachvollziehbar sein und sollte nicht nur den im Sommer gewünschten Schutz vor Wärmeeinträgen berücksichtigen. Und sie sollte – ebenso wie die künstliche Beleuchtung – einfache Eingriffsmöglichkeiten für die Nutzer bereitstellen.

Visual comfort and daylight in offices

Occupant satisfaction is an important aspect in planning sustainable office buildings. The present study contributes to the determination of parameters that influence occupant satisfaction with the daylighting of workplaces in everyday life under consideration of seasonal differences. Therefore, a field study in nine office buildings in Germany was carried out. Lighting and indoor environment conditions were measured throughout two weeks in every season. In every building, the conditions of at least 27 workplaces were recorded and rated by the occupants using a standardized questionnaire.

The users' assessments were supplemented by an analysis of the users' behaviour that could be derived from the measurements and allows conclusions on the users' needs and on their tolerance towards adverse conditions.

The analysis of nearly 1000 questionnaires showed that the users' preferences of illuminance levels were significantly above the minimum requirements for visual task performance according to the European standard. The preferred illuminance level is influenced by the outdoor illuminance and by the season, with higher preferred illuminance levels in spring compared to autumn and winter. Correspondingly, there is greater tolerance towards glare from daylight in spring than in the other seasons.

In summer, thermal comfort influences the preferred illuminance level and the users' behaviour, especially in buildings with a high proportion of window area. Users considering their rooms to be too warm prefer lower illuminance levels. Unlike in other seasons, the shading devices are not used mainly for glare protection but also to protect from solar heat gains. Accordingly, they are shut more often and more rigorously in summer.

The view provided by windows influences both the preferred illuminance level and the glare vote: The more interesting the view the less glare is perceived from the concerning window and the higher illuminance levels are desired.

Architecture influences the users, too: A high proportion of window area seems to convey good daylighting. Accordingly, the expectations regarding the brightness of the workplaces rise with the window area. Rooms facing an atrium are perceived as darker than rooms to the outside. Nevertheless, lower illuminance levels are accepted.

The outdoor illuminance, the season and the architecture influence the users' assessments of daylighting and brightness. This is probably due to the users' experiences reflected in their expectations and – depending on how good expectations are met – in their satisfaction.

By evaluating users' ratings and interventions, some clues for the planning of user friendly buildings could be identified. In terms of architecture, avoiding open space offices and designing façades with a moderate proportion of window area of about 60 % meets most occupants' wishes. Having the opportunity to reduce distracting glare according to a person's individual needs is crucial, especially for older users of VDU workstations.

Regarding the energetically favourable daylight-dependent control of lighting systems and the automatic blind control, users' wishes up to now remain at least partially unconsidered.

User assessments show the importance of having the opportunity to choose illuminance levels above the normative minimum requirements, which is in contrast with an energy saving constant light control. The results suggest that a lighting control considering season, thermal comfort and the age-dependent preferred illuminance level could be more acceptable to the users. The automatic blind control must be comprehensible for the users and should not only consider protection from solar heat gains. Like the lighting, it should offer simple manual adjustment possibilities for the occupants.

1 Einleitung

Es ist umstritten, wie groß der Anteil der Beschäftigten, die in Büros arbeiten, tatsächlich ist. Abhängig davon, ob der Definition von „Bürobeschäftigung“ das Büro als exklusiver oder als gelegentlicher Ort der Tätigkeit zugrunde gelegt wird, nennt Dostal für 2002 Werte von 30 % bis „weit über einem Anteil von 50 % der Erwerbstätigen“ (Dostal, 2005, S. 83). Unumstritten sind die starke Zunahme der Bürobeschäftigten in den letzten 50 Jahren und die Prognose, dass der Anteil weiter steigen wird (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin BAuA). An gleicher Stelle gibt die BAuA an, dass 80 % der Bürobeschäftigten vorrangig an einem Bildschirmgerät arbeiten. Folglich sind Büroarbeitsplätze heutzutage in der Regel auch Bildschirmarbeitsplätze.

Die Qualität dieser Büroarbeitsplätze betrifft einen großen Teil der Beschäftigten zu einem großen Teil ihrer Zeit: Die Erwerbstätigkeit nimmt in Deutschland durchschnittlich 7:47 h der täglich zur Verfügung stehenden Zeit bei Erwerbstätigen ein (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2014).

An Büroarbeitsplätzen sind zahlreiche Tätigkeiten mit der Erfassung visueller Informationen verbunden. Beim Lesen, Schreiben oder Zeichnen sind ebenso Sehaufgaben zu erfüllen wie beim Erkennen der Mimik eines Gesprächspartners. Der visuelle Komfort – oder zumindest störungsfreies Sehen – ist daher ein wichtiges Element guter Arbeitsbedingungen an Büroarbeitsplätzen.

Das zeigt sich auch in verschiedenen Studien, deren Ergebnisse Veitch (2001) in der Aussage zusammenfasst, dass die Beleuchtung für Büroangestellte zu den wichtigen Aspekten der Bürogestaltung gehört. Gleichzeitig, so Veitch, besteht unter Lichtplanern seit langem die Vermutung, dass Licht die Leistungsfähigkeit, den Komfort und das Wohlbefinden beeinflussen kann (Veitch, 2001, S. 124).

Diese Vermutung wurde 2001 bestätigt: Mit der Entdeckung eines Rezeptors im Auge, der auf kurzwelliges Licht reagiert und über das circadiane System unterschiedliche biologische Vorgänge beeinflusst, sind auch nicht-visuelle Wirkungen von Licht auf die Aktiviertheit und das Wohlbefinden der Nutzer Bestandteil des visuellen Komforts.

Eine biologisch wirksame Lichtexposition sollte Wirz-Justice zufolge möglichst durch Tageslichtnutzung erreicht werden, da Tageslicht höhere Beleuchtungsstärken bietet als Kunstlicht und gleichzeitig andere „Zeitgeber“ enthält wie beispielsweise den sich ändernden Sonnenstand (Wirz-Justice & Fournier, 2010).

Zudem wird Tageslicht als Lichtquelle von den meisten Nutzern bevorzugt, wie zahlreiche Studien übereinstimmend berichten (Galasiu & Veitch, 2006). Die Nutzung von Tageslicht kann daher zur Attraktivität des Arbeitsumfeldes beitragen und die Nutzerakzeptanz erhöhen.

Tageslicht kann außerdem zur Beleuchtung eines Gebäudes beitragen, was seit Einführung der Energieeinsparverordnung 2007 verstärkt unter dem Aspekt der Substitution von Kunstlicht und der damit verbundenen Energieeinsparung diskutiert wird. Kunstlicht benötigt grundsätzlich Strom und damit einen – konventionelle Stromerzeugung vorausgesetzt – primärenergetisch ungünstigen Energieträger, was regelmäßig dazu führt, dass die künstliche Beleuchtung einen hohen Anteil am Primärenergiebedarf von Bürogebäuden hat. Energieeinsparungen bei der Beleuchtung haben damit potenziell große Auswirkungen auf den Gesamtenergiebedarf.

Es gibt allerdings relevante Unterschiede zu anderen Konditionierungen: Die Anlagen zur Wärme- und Kälteversorgung eines Gebäudes werden anhand der Heiz- bzw. Kühllast und damit anhand selten auftretender Extrembedingungen ausgelegt, was den Nutzern unter üblichen Bedingungen Spielraum lässt, die Temperaturen – in begrenztem Umfang – an ihre Bedürfnisse anzupassen und höhere oder niedrigere Temperaturen einzustellen als normativ vorgesehen.

Bei der Beleuchtung tritt der „Auslegungsfall“, dass kein Tageslicht zur Verfügung steht, nicht an wenigen (extremen) Tagen im Jahr auf sondern täglich. Die in der aktuellen Energieeinsparverordnung für Büroräume vorgegebene „Referenztechnologie“ ist eine direkt-indirekte Beleuchtung mit tageslichtabhängiger Dimmung und Konstantlichtkontrolle (EnEV, 01.05.2014). In der Norm DIN V 18599-10:2011-12, die die Berechnungsgrundlagen der EnEV enthält, ist in den „Nutzungsprofilen“ für Büroräume eine Beleuchtungsstärke von 500 lx angegeben. Eine entsprechend dieser Referenztechnologie und des Nutzungsprofils ausgeführte Kunstlichtanlage stellt somit eine Beleuchtungsstärke von 500 lx am Arbeitsplatz sicher, lässt dem Nutzer aber keinen Spielraum zur Anpassung an Bedürfnisse, die nicht der normativen Mindestanforderung der DIN EN 12464-1:2011-08 entsprechen.

Die Helligkeitsniveaus, die unterschiedliche Nutzer bevorzugen, weisen jedoch eine weite Streuung auf, wie bereits mehrfach nachgewiesen wurde, z. B. 100 bis 600 lx (Escuyer et al. 2001 nach Galasiu & Veitch, 2006, S. 733) oder 200 bis 1200 lx Kunstlicht zusätzlich zum Tageslicht (Begemann, van den Beld & Tenner, 1997). Wegen altersabhängiger Veränderungen des Auges ist zudem mit zunehmendem Alter für die gleiche Sehleistung eine höhere Beleuchtungsstärke auf der Sehaufgabe erforderlich (Schierz, 2008).

Neben positiven Aspekten wie dem Beitrag zur Attraktivität des Arbeitsumfeldes und zur Energieeffizienz verursacht Tageslicht auch Blendung. Bisher existieren keine Bewertungsmethoden, die der Komplexität von Blendung an tageslichtorientierten Arbeitsplätzen gerecht werden. In der Norm „Beleuchtung von Arbeitsstätten“ findet sich dazu der Hinweis: „Für die psychologische Blendung durch Fenster steht zurzeit kein genormtes Blendungsbewertungsverfahren zur Verfügung.“ (DIN EN 12464-1:2011-08, S. 14)

Wienold und Christoffersen veröffentlichten 2006 die „Daylight Glare Probability“ DGP als neuen Blendungsindex, der in einer Folgestudie um verschiedene Korrekturfaktoren ergänzt wurde (Moosmann, Wienold, Wagner & Wittwer, 2012). Dieser Index und die Korrekturfaktoren wurden in Testraumuntersuchungen unter kontrollierten Bedingungen ermittelt. Die Vorhersagegüte unter Alltagsbedingungen kann von den Testraumergebnissen abweichen. Von praktischem Nutzen für die Planung und den Betrieb von Gebäuden ist jedoch nur ein Index, der Blendung durch Tageslicht auch im Feld zutreffend prognostizieren kann.

Um energieeffiziente Gebäude mit angemessener Tageslichtnutzung, stromsparenden Kunstlichtanlagen und großer Nutzerakzeptanz planen zu können, müssen der Umgang der Nutzer mit Kunstlicht und Sonnenschutz, die Ansprüche an das Beleuchtungsstärkeniveau und die Leuchtdichtetoleranz bekannt sein.

Die Ergebnisse aus Laboruntersuchungen sind dabei wichtige Grundlage, sie sind aber nicht uneingeschränkt auf Alltagssituationen übertragbar: Laboruntersuchungen finden in einer künstlichen Umgebung statt, in der zahlreiche Einflussfaktoren und Störgrößen gezielt ausgeschlossen werden, welche die Nutzerzufriedenheit oder ihr Verhalten in der Realität potenziell stark beeinflussen können. Auch die Varianz von Lichtbedingungen kann aufgrund der in der Regel stark eingeschränkten Probandenanzahl und Versuchsdauer nur unvollständig berücksichtigt werden. Zudem werden häufig einzelne Faktoren isoliert betrachtet. Der Rückschluss, wie relevant diese Faktoren im „wahren Leben“ sind, muss im Feld geführt werden.

2 Stand der Forschung

Nutzerwünsche bezüglich verschiedener Aspekte der Belichtung und Beleuchtung von Arbeitsplätzen wurden bereits in zahlreichen Studien untersucht, ebenso das Nutzerverhalten im Umgang mit Kunstlicht und Sonnenschutz, die Leuchtdichtetoleranz bei Blendung durch Tageslicht und biologische Wirkungen des Lichts. In diesem Kapitel werden zentrale Forschungsergebnisse vorgestellt, die zum Teil Eingang in die Normung gefunden haben, während andere Studien Widersprüche und offene Fragen aufdecken.

Sie gliedern sich thematisch wie folgt:

- Nutzerwünsche bezüglich Tageslichtversorgung und Fenster
- Präferierte Beleuchtungsstärke
- Blendung durch Tageslicht
- Anforderungen an den Sonnenschutz/Blendschutz
- Umgang der Nutzer mit Kunstlicht und Sonnenschutz
- Biologische Lichtwirkungen

Bei Studien aus Nordamerika und teilweise auch Großbritannien ist zu berücksichtigen, dass dort Großraumbüros mit geringem Tageslichtbezug häufiger sind als in Deutschland. Probanden, die üblicherweise in solchen Räumen arbeiten, haben möglicherweise andere Erwartungen an die Belichtung ihres Büroraums als Probanden, die üblicherweise in tageslichtversorgten Räumen arbeiten.

2.1 Nutzerwünsche bezüglich Tageslichtversorgung und Fenster

Die große Bedeutung der Tageslichtversorgung wurde ebenso wie die Relevanz der Aussicht seit den 1960er Jahren vielfach untersucht und bestätigt. Die Ergebnisse verschiedener Studien geben zudem Hinweise, welche weiteren Aspekte Nutzer an Fenstern besonders schätzen.

Collins erstellte 1975 eine Literaturübersicht zur Akzeptanz von Innenräumen mit oder ohne Fenster. Ihrer Zusammenfassung der Ergebnisse verschiedener Studien zufolge dienen Fenster dazu, Innenräume um eine „dynamische, aktive Qualität“ zu ergänzen und einen Ausblick nach draußen zu bieten (Collins, 1975, S. 1). Dabei werden Aussichten mit hohem Informationsgehalt bevorzugt, der Blick in die Natur wird dem Blick in einen städtischen Kontext vorgezogen (ebd., S. 46).

In einer von Collins zitierten Studie von Ruys (1970) in fensterlosen Büroräumen waren 90 % der Nutzer unzufrieden mit der Fensterlosigkeit und fast die Hälfte fühlte sich durch die Fensterlosigkeit in der Arbeitsfähigkeit eingeschränkt. Die Nutzer klagten unter anderem über fehlendes Tageslicht, schlechte Belüftung und den fehlenden Ausblick (ebd., S. 24).

1974 erwähnte Sommer die auffallende Häufigkeit von großen Landschaftsaufnahmen an den Wänden von fensterlosen Büroräumen in Untergeschossen, wo sie als „Ersatzfenster“ dienten (ebd., S. 26).

Wells (1965) befragte Büroangestellte, die in tageslichtbeleuchteten Büros arbeiteten. Er stellte fest, dass Personen, die bis zu 6 m vom Fenster entfernt sitzen, den Tageslichtanteil, unter dem sie arbeiten, realistisch einschätzen konnten. Personen, die weiter vom Fenster entfernt sitzen, überschätzten dagegen den Tageslichtanteil durchweg. 69 % der Befragten waren der Meinung, dass Tageslicht für Büroarbeit eine bessere Lichtqualität bietet als Kunstlicht, fast alle hielten einen Ausblick für wünschenswert (ebd., S. 57).

Collins zitiert außerdem Studien von Markus und Manning, die ebenfalls zu dem Ergebnis kamen, dass Nutzer Tageslicht einer künstlichen Beleuchtung vorziehen und für überlegen halten (ebd., S. 58).

Bei einer eigenen Felduntersuchung zur Leuchtdichteverteilung an Bildschirmarbeitsplätzen, die im April und Mai 2003 durchgeführt wurde, wurden 255 Nutzer eines Bürogebäudes in Karlsruhe gefragt, ob sie sich vorstellen könnten, ständig in einem fensterlosen Raum zu arbeiten. 11 Personen (4 %) antworteten mit „ja“, für 244 Personen (96 %) war ein Arbeitsplatz ohne Fenster nicht denkbar.

Folgende Gründe für den Wunsch nach einem Fenster am Arbeitsplatz wurden am häufigsten genannt (in Klammern die Anzahl der Nennungen):

- Belichtung des Raumes durch Tageslicht (142 x)
- Möglichkeit, aus dem Fenster zu schauen (86 x)
- Blick in die Natur oder zu den Bäumen (41 x)
- Außenbezug (33 x)
- Möglichkeit zu Lüften (30 x)
- Bezug zum Wetter (23 x)
- Wahrnehmung der Tages- oder Jahreszeit (18 x)

In einem Raum ohne Fenster würden sich die Befragten nach eigener Aussage eingesperrt (28 x), beengt (14 x) oder bekümmert (11 x) fühlen (Moosmann, 2003).

Galasiu und Veitch fanden in ihrer Literaturübersicht 2006 die große Wertschätzung des Tageslichts in mehreren Studien bestätigt, so bei Cuttle (1983) und bei Heerwagen und Heerwagen (1986). Fast alle befragten Büroangestellten bevorzugten Tageslicht, das sie als komfortabler erlebten und für gesünder hielten als Kunstlicht. Untersuchungen von Veitch ergaben damit übereinstimmende Ergebnisse: Die Mehrheit der von ihr befragten Studenten und Büroangestellten hielt eine natürliche Belichtung für die künstlichen überlegen und Tageslicht für die bessere Lichtquelle.

2.1.1 Mindestfenstergröße

Welche Fenstergröße Nutzer als ausreichend bewerten, wurde ebenfalls mehrfach untersucht – in der Regel mit Hilfe von Modellen (oft im Maßstab 1:12), deren Fensterfläche variiert werden konnte. Galasiu und Veitch berichten Ergebnisse von Ne’eman und Hopkinson (1970) und von Keighley (1973), die feststellten, dass sich die Mindestabmessungen der Fenster in Abhängigkeit von der Aussicht und der Entfernung des Betrachterstandpunktes vom Fenster unterscheiden. Horizontale Fenster, die mindestens 25 % der Wandfläche einnahmen, wurden bevorzugt (Galasiu & Veitch, 2006, S. 730).

Unabhängig von der Himmelsrichtung werden Christoffersen et al. zufolge in Büroräumen Fensterflächenanteile zwischen 20 % und 35 % seltener als zu klein bzw. zu groß bewertet als kleinere bzw. größere Fensterflächenanteile. Die befragten Nutzer bevorzugten Arbeitsplätze in Fensternähe und fühlen sich mehrheitlich „nie“ von Tageslicht oder Blendung gestört. Der Ausblick, das Wahrnehmen des Wetters und die Möglichkeit, das Fenster zu öffnen sind die wichtigsten Qualitäten eines Fensters (Christoffersen et al., 2000, nach Galasiu & Veitch, 2006, S. 731).

Die Abmessungen der untersuchten Räume oder Modellräume entsprachen überwiegend Gruppen- oder Großraumbüros und nicht Zellenbüros für bis zu vier Personen. Einige der Befragten arbeiteten üblicherweise an Büroarbeitsplätzen ohne Tageslichtversorgung. Probanden, die üblicherweise in Zellenbüros an fensternahen Arbeitsplätzen arbeiten, hätten möglicherweise andere Urteile abgegeben.

In die deutsche Normung eingegangen sind Ergebnisse einer Untersuchung von Seidl aus dem Jahr 1978, die in Berlin durchgeführt wurde. Er untersuchte in Labor- und Feldstudien, welche Tageslichtquotienten und welche Fensterabmessungen in Wohnräumen als ausreichend beurteilt werden. Seidl führt aus: „Dabei muss unterschieden werden zwischen ausreichenden

Lichtverhältnissen zur Erfüllung bestimmter Sehaufgaben und Lichtverhältnissen, die die Sicherstellung einer ausreichenden Annehmlichkeit garantieren. Werden Wohnräume ausschließlich mit Tageslicht beleuchtet, so kann man aber in der Regel davon ausgehen, dass die heute an Arbeitsplätzen für erforderlich gehaltenen Beleuchtungsniveaus bei bedecktem Himmel zumindestens im hinteren Teil des Raumes nicht erreichbar sind.“ Demzufolge sollte ermittelt werden, welche tageslichttechnischen Kennwerte zur „Gewährleistung hinreichender Annehmlichkeit“ erforderlich sind.

Seidl überprüfte die Eignung unterschiedlicher Messpunkte der Beleuchtungsstärke als Bezugspunkt für die Beurteilung der Lichtverhältnisse anhand der Korrelation mit der Nutzerbewertung. Dabei konnten keine Unterschiede zwischen der horizontalen Beleuchtungsstärke in halber Raumtiefe (1 m von der Seitenwand entfernt), der horizontalen Beleuchtungsstärke 1 m von der Rückwand entfernt und der vertikalen Beleuchtungsstärke in Wandmitte der Seitenwände und der Rückwand festgestellt werden: Alle 5 Bezugspunkte korrelierten gleichermaßen mit den Bewertungen der Probanden (Seidl, 1978, S. 54).

Jüngere Personen bewerteten die Tageslichtversorgung im Labor eher negativer als ältere Personen. Die Bewertung der Gestaltung des Raumes, der Fenstergröße und der Aussicht sowie weitere Einflussgrößen korrelierten in der Laboruntersuchung mit der Bewertung der Tageslichtversorgung (ebd., S. 59). In der Felduntersuchung fand Seidl den Einfluss dieser Faktoren jedoch nicht bestätigt.

Seidl stellt außerdem fest, dass „mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden [kann], dass die Einschätzung der Lichtverhältnisse durch die Versuchsperson tatsächlich von der Jahreszeit der jeweiligen Befragung in einer nicht zu vernachlässigenden Weise beeinflusst wurde.“ (ebd., S. 75)

Auf Basis seiner Untersuchungsergebnisse berechnete Seidl für Wohnräume eine horizontale Mindestbeleuchtungsstärke in halber Raumtiefe von ca. 50 lx im Winter und ca. 160 lx im Sommer bzw. 40 lx zur Wintersonnwende und 170 lx zur Sommersonnwende für eine fiktive Durchschnittsperson von 45 Jahren.

In einem weiteren Schritt wurde ermittelt, welcher Tageslichtquotient sicherstellt, dass diese Mindestbeleuchtungsstärke von 40 lx zur Wintersonnwende an einem bedeckten Tag zwischen 11:00 Uhr und 13:00 Uhr in halber Raumtiefe vorhanden ist. Für Berlin ergab sich ein notwendiger Tageslichtquotient von 0,9 % (Seidl, 1978, S. 81), den Seidl in der Felduntersuchung bestätigt fand. Als „ausreichend“ wurde der Tageslichtquotient interpretiert, bei dem die Probanden die Lichtverhältnisse im Mittel als weder schlecht noch gut beurteilten.

In der anschließenden Felduntersuchung wurde die Fenstergröße des eigenen Wohnzimmers von den Probanden beurteilt. Seidl interpretierte die Werte, bei denen eine „sprungartige“ Verbesserung der Beurteilungsmittelwerte beobachtet wurde, als Mindestabmessungen.

Die Fensterabmessungen wurden in der Felduntersuchung allerdings fast ausnahmslos als „klein“ beurteilt: Das Urteil „zu groß“/„viel zu groß“ wurde nur in 1,4 % der Fälle abgegeben, während 41,5 % der Befragten ihr(e) Fenster als „zu klein“/„viel zu klein“ empfanden. Erst bei einem Fensterflächenanteil von über 70 % bezogen auf die Fensterwandfläche wurde in der Stichprobe das Urteil „zu klein“ nicht abgegeben. Zu Ganzglasfassaden wurden in der Untersuchung keine Aussagen getroffen.

Im Weiteren wurde von Klingenberg und Seidl untersucht, wie sich die Fenstergröße unter anderem auf die Kommunikationsmöglichkeit zwischen Innen- und Außenraum, die Privatheit und die Besonnung von Wohnräumen auswirkt (Klingenberg & Seidl, 1978).

Weil die „technischen und biologischen Aufgaben der Fenster“ auch mit Hilfe anderer technischer Einrichtungen erfüllt werden können, so die Autoren, standen für Klingenberg und Seidl die „psycho-physischen“ Aufgaben von Fenstern im Vordergrund (ebd., S. 858), die mit (vor allem visuellen) Informationen verbunden sind, die von außen in (Aufenthalts-)Räume gelangen oder von dort nach außen gelangen. Aus Anforderungen an „Kommunikation“ und „Privatheit“

konnten in der Untersuchung allerdings keine Grenzwerte für die Dimensionierung von Fensterflächen abgeleitet werden (ebd., S. 859).

Die Festlegungen der DIN 5034-1:2011-07 zu Mindestfenstergrößen und den Mindestanforderungen an die Tageslichtversorgung von Wohnräumen und Arbeitsräumen, die in ihren Abmessungen Wohnräumen entsprechen, basieren auf den zitierten Untersuchungen aus dem Jahr 1978. Dementsprechend wird gefordert, dass der Tageslichtquotient in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von den beiden Seitenwänden im Mittel wenigstens 0,9 % beträgt. Als Empfehlung gibt die Norm einen Tageslichtquotienten von mindestens 2 % in Raummitte an.

Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) A3.4 von 2011 enthalten ebenfalls die Forderung nach „ausreichendem Tageslicht“ an Arbeitsstätten und formulieren, dass eine Beleuchtung mit Tageslicht aufgrund seiner Dynamik, Farbe, Richtung und der Menge des Lichts einer rein künstlichen Beleuchtung vorzuziehen sei. Die Güteigenschaften des Tageslichts seien in ihrer Gesamtheit von künstlicher Beleuchtung nicht zu erreichen, und Tageslicht habe im Allgemeinen eine positive Wirkung auf die Gesundheit und das Wohlempfinden des Menschen.

Die ASR fordert einen Tageslichtquotienten am Arbeitsplatz größer als 2 % bzw. ein Verhältnis von lichtdurchlässiger Fenster-, Tür- oder Wandfläche zur Raumgrundfläche von mindestens 1:10 und empfiehlt, Arbeitsplätze fensternah anzuordnen.

In einer Feldstudie, die Gramm et al. in vier Bürogebäuden durchgeführt haben, wurden Grenzwerte im Bereich der von der ASR vorgegebenen Werte ermittelt: Erst ab einem Tageslichtquotienten von 2 % am Arbeitsplatz wurden diese den Autoren zufolge als „ausreichend hell“ bewertet (Gramm, Aydinli, Völker & Kaase, 2013). Räume mit großen Fenstern wurden in dieser Untersuchung im Allgemeinen als „gerade richtig hell“ bewertet – auch bei Tageslichtquotienten, die die normativen Mindestanforderungen erheblich überschritten.

2.1.2 Atrien

Atrien beeinflussen die Tageslichtversorgung angrenzender Räume. In der Regel ist die Tageslichtversorgung aufgrund des Atriumdaches und der Verbauung schlechter, und der Blick durch das Fenster geht nicht ins Freie sondern ins Atrium. Wie sich diese Besonderheiten auf die Nutzerakzeptanz der Arbeitsplatzbedingungen in Büroräumen an Atrien auswirken, hat Schmitz (2003) untersucht. Dabei zeigte sich, dass zwar die Atrien selbst bei den Nutzern sehr beliebt sind, dass aber außenliegende Büroräume den Räumen zum Atrium vorgezogen werden. Die Zufriedenheit mit den abgefragten Kriterien der Arbeitsumfeldbedingungen ist in Räumen an Atrien schlechter. Besonders groß ist der Unterschied bei der Zufriedenheit mit den Lichtverhältnissen, auch die Luftqualität wird in Räumen an Atrien deutlich schlechter bewertet.

Die Proportionen eines Atriums sind entscheidend für die Tageslichtversorgung angrenzender Räume und für die Nutzerbewertung: Atrien sollten nicht höher als breit sein. Der Ausblick ist für die Nutzer ebenfalls von Bedeutung: „Der Ausblick in ein Atrium wird akzeptiert, wenn er mindestens die wichtigsten Kriterien eines Ausblicks ins Freie erfüllt. Es muss eine ausreichende Nachvollziehbarkeit der Wetterbedingungen gegeben sein.“ (Schmitz, 2003, S. 155-156)

Auch Gossauer (2008) fand in ihrer Untersuchung zur Nutzerzufriedenheit an Büroarbeitsplätzen in siebzehn Gebäuden, dass die Zufriedenheit mit der Helligkeit am Arbeitsplatz in Büroräumen zu Atrien signifikant geringer ist als bei außen liegenden Büroräumen.

2.1.3 Zusammenfassung

Die zitierten Studien stimmen darin überein, dass Tageslicht von den Nutzern wertgeschätzt wird und dass eine natürliche Beleuchtung für gesünder und für überlegen gehalten wird im Vergleich zu künstlicher Beleuchtung.

Fenster spielen für die Nutzer eine große Rolle. Neben der Tageslichtversorgung wird vor allem der Ausblick geschätzt und die Möglichkeit, das Wetter wahrzunehmen und den Raum zu lüften. Atrien werden in der Regel als Einschränkung erlebt.

Die normativen Mindestanforderungen an die Tageslichtversorgung von Zellenbüros basieren auf Untersuchungen in Wohnräumen, in denen je nach Jahreszeit Beleuchtungsstärkewerte zwischen 40 lx und 170 lx als „hinreichend“ bewertet wurden. Dass diese Werte auch in Büroräumen, in denen 500 lx Mindestbeleuchtungsstärke gefordert sind, als „hinreichend“ erlebt werden, kann in Frage gestellt werden. Eine Untersuchung von Gramm et al. (2013) deutet für Büroräume auf höhere Mindestwerte hin, wenn eine „ausreichende“ Tageslichtversorgung gegeben sein soll.

Seidl hält einen jahreszeitlichen Einfluss auf die Einschätzung der Lichtverhältnisse durch die Probanden für sehr wahrscheinlich und konnte zeigen, dass die Wahl des Referenzpunktes beim Vergleich von Beleuchtungsstärkemesswert und Nutzerurteil zur Tageslichtversorgung von untergeordneter Bedeutung ist.

2.2 Präferierte Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke ist eine wichtige Planungsgröße für Kunstlichtanlagen, die Auswirkungen auf die Kosten und den Energieverbrauch einer Anlage hat. Neben Untersuchungen zu der Frage, welche Beleuchtungsstärke für die Erfüllung einer Sehaufgabe erforderlich ist, wurden auch zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um die von Nutzern bevorzugte Beleuchtungsstärke zu ermitteln.

Begemann et al. führten 1993 eine Untersuchung in Büroräumen mit Fenstern durch. Die 96 Probanden, die an der Studie teilnahmen, wählten durchschnittlich 800 lx Kunstlicht zusätzlich zum Tageslicht, dessen Beleuchtungsstärke naturgemäß je nach Tages- und Jahreszeit variierte. Die bevorzugten Beleuchtungsstärke-Niveaus lagen damit deutlich über der normativen Mindestanforderung. Viele Nutzer bevorzugten einen „Tagesverlauf“ des Kunstlichts, der im Widerspruch zur energiesparenden Konstantlichtregelung steht.

An einer zweiten Untersuchung nahmen insgesamt 170 Probanden teil (Begemann et al., 1997). Die Probanden waren aufgefordert, eines von vier nordorientierten Einzelbüros jeweils einen Tag lang zu nutzen und die künstliche Beleuchtung den eigenen Wünschen entsprechend ein-/auszuschalten oder zu dimmen. Die horizontale Beleuchtungsstärke des Kunstlichts konnte zwischen 200 lx und 2000 lx frei gewählt werden.

Mehrmals täglich wurde das Kunstlicht dem Versuchsplan entsprechend automatisch ausgeschaltet, die Nutzer mussten das Kunstlicht aktiv wieder einschalten. Das Tageslicht erzeugte (abgesehen von Wintertagen mit bedecktem Himmel) eine horizontale Beleuchtungsstärke von über 500 lx auf dem Schreibtisch. Die Probanden wählten auch in dieser Untersuchung durchschnittlich 800 lx Kunstlicht zusätzlich zum Tageslicht. Die individuellen Unterschiede waren groß, die gewählte Beleuchtungsstärke lag zwischen (zusätzlich) 300 lx und 1200 lx.

Begemann et al. stellten keinen Alterseinfluss fest und keinen eindeutigen Einfluss der Jahreszeit. Ihre Auswertung der bevorzugten Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch (Tageslicht und Kunstlicht) zeigt jedoch jahreszeitliche Unterschiede mit niedrigeren Werten in den Monaten November bis Januar und besonders hohen Werten im April.

Galasiu und Veitch berichten von einer Untersuchung, die Escuyer und Fontoynt durchgeführt haben, in der deutlich niedrigere bevorzugte Beleuchtungsstärkeniveaus ermittelt wurden. Für Bildschirmarbeit wurden Beleuchtungsstärkeniveaus von 100 bis 300 lx bevorzugt, für andere Tätigkeiten 300 bis 600 lx.

Wenn die Nutzer sich frei entscheiden konnten, wählten sie durchschnittlich zwischen 150 und 400 lx elektrisches Licht zusätzlich zum Tageslicht. Viele wählten 280 lx Kunstlicht, auch wenn die

Beleuchtungsstärke des Tageslichts unter 100 lx betrug (Escuyer et al. 2001 nach Galasiu & Veitch, 2006, S. 733).

Halonen und Lehtovaara gingen in ihrer Untersuchung (1995) von der Erfahrung aus, dass die Tageslichtsituation beeinflusst, ob eine gegebene Beleuchtungsstärke als adäquat empfunden wird oder nicht. Sie schließen aus dieser Beobachtung, dass eine Konstantlichtregelung nicht den Bedürfnissen der Nutzer entspricht, und dass bei steigendem Tageslichtangebot auch die Beleuchtungsstärke ansteigen sollte.

An ihrer Studie in einem Büroraum mit Ostfenster nahmen 20 Probanden teil, die während einer dreistündigen Untersuchung das Dimmniveau der künstlichen Beleuchtung alle 15 Minuten verändern konnten.

Auch diese Untersuchung bestätigt die großen individuellen Unterschiede bezüglich der bevorzugten Beleuchtungsstärke (230 bis 1000 lx am Schreibtisch bei geschlossenem Sonnenschutz und freier Wahl der Beleuchtungsstärke des Kunstlichts zwischen 175 und 1000 lx). Bei steigendem Tageslichtangebot wurde das Kunstlicht nicht entsprechend gedimmt, die Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch wurde von den Probanden also nicht konstant gehalten, sondern stieg bei steigendem Tageslichtangebot ebenfalls an.

Besonders groß waren die individuellen Unterschiede bezüglich der gewünschten Helligkeit des fensterfernen Bereichs: Einige Probanden wählten bei steigendem Tageslichtangebot eine zunehmende Beleuchtungsstärke des (zusätzlichen) Kunstlichts. Halonen und Lehtovaara erklären dieses Verhalten mit dem Bemühen, die großen Unterschiede zwischen horizontaler Beleuchtungsstärke und vertikaler Beleuchtungsstärke in Fensternähe sowie im fensterfernen Bereich anzugleichen.

Logadóttir, Christoffersen und Fotios (2011) untersuchten Faktoren des experimentellen Designs, die das Ergebnis von Studien zur Ermittlung der „bevorzugten Beleuchtungsstärke“ beeinflussen können, in denen Probanden das Dimmniveau der elektrischen Beleuchtung den eigenen Wünschen entsprechend anpassen sollen.

Dafür wurde eine Laborstudie mit 36 Probanden unter rein künstlicher Beleuchtung durchgeführt. Die Bandbreite der möglichen Beleuchtungsstärke wurde variiert (21 bis 482 lx, 38 bis 906 lx und 72 bis 1307 lx), ebenso die Ausgangsbeleuchtungsstärke.

Die ermittelte „bevorzugte Beleuchtungsstärke“ wurde signifikant von beiden Faktoren beeinflusst und wies eine Bandbreite von 170 lx (Medianwert für 21 bis 482 lx, Anfangsbeleuchtungsstärke 70 lx) bis 1078 lx auf (Medianwert für 72 bis 1307 lx, Anfangsbeleuchtungsstärke 1287 lx). Logadóttir et al. führen aus, dass die Beleuchtungsstärke, welche die Probanden wählten, sich tendenziell gleichmäßig über die ganze angebotene Bandbreite verteilt. Wird die bevorzugte Beleuchtungsstärke eines Kollektivs durch Mittelwertbildung aller von den Probanden gewählten Einstellungen ermittelt, ergibt sich somit immer ein Wert nahe dem Mittelwert der angebotenen Extremwerte. Es tritt also ein Messfehler auf. Deshalb und wegen des großen Einflusses der Ausgangsbeleuchtungsstärke ist das Ergebnis einer Untersuchung mit Anpassung der Beleuchtungsstärke mit nur einem Beleuchtungsstärke-Intervall aus Sicht von Logadóttir et al. nicht geeignet, die präferierte Beleuchtungsstärke zu ermitteln.

2.2.1 Mindestbeleuchtungsstärke bei natürlicher Belichtung

DIN 5034-1:2011-07 beschreibt, dass natürliche und künstliche Beleuchtung unterschiedlich wahrgenommen werden: „Die speziellen Eigenschaften einer Innenraumbeleuchtung durch Tageslicht unterscheiden sich grundsätzlich von denen einer künstlichen Beleuchtung. Dies kann zu verschiedenen Bewertungen der Beleuchtungsbedingungen bei Tageslicht und bei Kunstlicht führen. So werden zum Beispiel für die Beleuchtung mit Tageslicht gegenüber der Beleuchtung mit künstlichem Licht wesentlich höhere Beleuchtungsstärken noch als angenehm empfunden und Blendung anders wahrgenommen.“ (DIN 5034-1:2011-07, S. 13)

Eine Felduntersuchung von Gall, Vandahl, Jordanow und Jordanowa (2000) mit 16 Probanden an unterschiedlichen Arbeitsplätzen mit direktem Fensterbezug und überwiegend auch mit Bildschirm bestätigt diese Aussage. Aus den Befragungsergebnissen leiten die Autoren eine horizontale Beleuchtungsstärke von 1160 lx am Arbeitsplatz ab, bei der die Helligkeit am Arbeitsplatz als „gerade richtig“ empfunden wird.

Zusammenfassend schlussfolgern Gall et al. aus verschiedenen durchgeführten Studien, dass die horizontale Beleuchtungsstärke mindestens 500 lx betragen sollte und dass die zylindrische Beleuchtungsstärke des Tageslichts zwischen 300 lx und 1400 lx liegen sollte, wobei die vertikale Beleuchtungsstärke in Richtung Fenster 800 lx bis 1300 lx betragen kann.

Gramm et al. (2013) beschreiben die Ergebnisse von Petry, der 1984 aufgrund von theoretischen Überlegungen eine Mindestbeleuchtungsstärke bei natürlicher Belichtung ermittelte. Petry zufolge ist die Sehleistung und damit die Produktivität bei seitlichem Tageslicht im Vergleich zu Kunstlicht deutlich höher, so dass bei seitlich einfallendem Tageslicht 50 % bis 60 % der für künstliche Beleuchtung geforderten Nennbeleuchtungsstärke zur Erfüllung der Sehaufgabe ausreichen. Diese deutliche Reduktion der erforderlichen Beleuchtungsstärke ermöglicht bei tageslichtabhängiger Regelung von Kunstlichtanlagen ein hohes Energieeinsparpotential und wurde in DIN 5034-1 aufgenommen: „Die durch das Tageslicht allein gegebene Beleuchtung in Arbeitsräumen mit Fenstern, in denen die Sehaufgaben auf horizontalen Flächen ausgeübt wird, gilt – bedingt durch den seitlichen Lichteinfall – solange als ausreichend, wie die Beleuchtungsstärke mindestens das 0,6fache des in DIN EN 12464-1 angegebenen Wertes der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m beträgt.“ (DIN 5034-1:2011-07, S. 13)

In Laboruntersuchungen mit einem künstlichen Himmel konnte der große Unterschied zwischen simuliertem seitlich einfallendem „Himmelslicht“ und künstlicher (direktstrahlender) Beleuchtung und damit auch das Energieeinsparpotenzial nicht bestätigt werden (Gramm et al., 2013 und Knoop, 2014).

2.2.2 Einfluss der Innentemperatur

Laurentin, Berrutto und Fontoynt (2000) führen aus, dass man beobachten kann, dass Büroangestellte, die im Sommer hohen Innentemperaturen ausgesetzt sind, bei geschlossenem Sonnenschutz arbeiten, ohne die elektrische Beleuchtung einzuschalten. Die Beleuchtungsstärkeniveaus liegen unterhalb des empfohlenen Niveaus, „als sei dämmriges Licht mit Kühle assoziiert“ (S. 223). Die Autoren leiten daraus ab, dass der thermische Komfort und die Jahreszeit einen Einfluss auf die Bewertung des visuellen Komforts haben könnten.

Um diese Zusammenhänge und den Einfluss der Lichtquelle zu untersuchen, führten sie eine Studie mit 20 Probanden in einem Büroraum mit Ostfenster durch. Die Probanden wurden bei 20,5 °C und 27 °C Innentemperatur und bei drei verschiedenen Lichtsituationen (nur Tageslicht, nur Kunstlicht, beide Lichtquellen) mit jeweils 300 lx Beleuchtungsstärke zum thermischen und visuellen Komfort befragt und konnten abschließend die Beleuchtungsstärke den eigenen Wünschen entsprechend anpassen.

Dabei wurde kein statistisch signifikanter Einfluss der Lufttemperatur auf die Bewertung der Beleuchtung mit Tageslicht festgestellt. Die Autoren erklären dieses Ergebnis mit den unterschiedlichen Tageslichtspektren während der Befragungen. Aus der Studie ergaben sich aber auch Hinweise, dass eine Abhängigkeit zwischen thermischem und visuellem Empfinden bestehen könnte: Rein künstliche Beleuchtung wurde trotz identischer Beleuchtungsstärke bei 27 °C Lufttemperatur dunkler empfunden als bei 20,5 °C.

Bei Beleuchtung mit Tages- und Kunstlicht gleichzeitig wurden von den Probanden höhere Beleuchtungsstärkeniveaus gewählt (558 lx) als bei rein natürlicher (311 lx) oder rein künstlicher Beleuchtung (479 lx).

Die Lichtsituationen mit Tageslicht wurden gleichzeitig als heller und angenehmer empfunden als die rein künstliche Beleuchtung, was den Autoren zufolge in den unterschiedlichen Licht-

richtungen der Lichtquellen und daraus resultierend mit unterschiedlichen Leuchtdichte-
verteilungen im Raum begründet sein könnte.

Boyce (2001) führt in seinem Kommentar zur Untersuchung von Laurentin et al. aus, dass Fenster
den visuellen Komfort auf so vielfältige Weise beeinflussen, dass der kleine Einfluss des
thermischen Komforts nicht feststellbar sei.

Er fährt mit der folgenden Überlegung fort: Falls die Interpretation korrekt sei, dass der visuelle
Komfort stärker von visuellen als von thermischen Bedingungen beeinflusst werde, scheine es
unwahrscheinlich, dass Lichtsteuerungen in der Praxis jemals je nach Jahreszeit unterschiedliche
Beleuchtungsstärken in natürlich belichteten Bereichen erzeugen werden.

2.2.3 Alterseinfluss

Schierz (2008) stellte in einer Übersicht zusammen, wie sich Sehvermögen und Blend-
empfindlichkeit mit zunehmendem Alter verändern. Er nennt unter anderem folgende
Veränderungen und Auswirkungen:

- Reduktion des Transmissionsgrades der Augenmedien und Gelbverfärbung der Augen-
linse: Diese beiden Veränderungen reduzieren die Transmission kurzwelligen („blauen“)
Lichts, was vor allem die biologische Lichtwirkung einschränkt.
- Zunahme der Lichtstreuzentren in den Augenmedien: Durch die zunehmende Anzahl
von Lichtstreuzentren entsteht mehr Streulicht im Auge, was physiologische Blendung
hervorrufen kann. Daher nimmt die Blendempfindlichkeit mit dem Alter zu.
- Abnahme der Akkommodationsbreite (Alterssichtigkeit) und Abnahme der Funktions-
fähigkeit der Netzhaut: Der Distanzbereich, innerhalb dessen fokussiert werden kann,
wird mit zunehmendem Alter kleiner. Dazu nimmt die Rezeptordichte der Netzhaut ab,
was ein geringeres Auflösungsvermögen des Auges zur Folge hat.
- Verkleinerung der Pupillenweite: Dies führt dazu, dass bei einem 65-jährigen verglichen
mit einem 25-jährigen nur rund 60 % des Lichts ins Auge gelangt.

Schierz leitet aus diesen Veränderungen ab, dass der Lichtbedarf mit dem Alter stark ansteigt,
und dass zur Kompensation dieser Veränderungen für dieselbe Sehleistung höhere Beleuch-
tungsstärken auf der Sehaufgabe erforderlich sind.

Auch die Norm DIN EN 12464-1:2011-08 trifft eine entsprechende Festlegung: „Der geforderte
Wartungswert der Beleuchtungsstärke sollte erhöht werden, wenn [...] das Sehvermögen der
Arbeitsperson unter dem üblichen Sehvermögen liegt.“ (ebd., S.10-11) Dies betrifft auch das mit
zunehmendem Alter abnehmende Sehvermögen.

2.2.4 Zusammenfassung

Die zitierten Studien kamen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der präferierten
Beleuchtungsstärke: Zusätzlich zum Tageslicht wurden gewünschte Beleuchtungsstärken von
150 lx bis 400 lx und von 300 lx bis 1200 lx ermittelt. Logadóttir et al. wiesen nach, wie groß der
Einfluss des Versuchsdesigns auf die ermittelte präferierte Beleuchtungsstärke ist.

Diesen Untersuchungen zufolge entspricht der Wartungswert der Beleuchtungsstärke nach
DIN EN 12464-1:2011-08, der für Bürotätigkeiten 500 lx beträgt, nicht notwendigerweise den
Wünschen aller Nutzer.

Unterschiede zwischen natürlicher und künstlicher Beleuchtung hinsichtlich der (Mindest-)
Beleuchtungsstärke wurden theoretisch ermittelt und sind normativ verankert, konnten aber in
einer Laboruntersuchung mit simuliertem Tageslicht nicht bestätigt werden.

Auch der vermutete Einfluss des thermischen Komforts und der Jahreszeit auf die Bewertung des visuellen Komforts konnte in einer Untersuchung von Laurentin et al. nicht nachgewiesen werden.

Der Alterseinfluss auf das Sehvermögen dagegen ist unumstritten: Das Sehvermögen nimmt ab, weshalb höhere Beleuchtungsstärken auf der Sehaufgabe benötigt werden, während gleichzeitig die Blendempfindlichkeit zunimmt.

2.3 Blendung durch Tageslicht

Neben positiven Aspekten wie Tageslichtversorgung und Ausblick können Fenster auch Blendung verursachen. Iwata et al. betonen die Relevanz dieses Themas für die Tageslichtnutzung: „We will never be able to use daylight fully if we do not understand the discomfort caused by glare.“ (Iwata, Kimura, Shukuya & Takano, 1990, S. 391)

Dabei ist die physiologische Blendung mit Beeinträchtigung der Sehleistung von untergeordneter Bedeutung im Vergleich zur sehr viel häufiger auftretenden psychologischen Blendung, so Hopkinson (1972).

Studien zur Blendung durch elektrische Beleuchtung wurden seit den 1920er Jahren in den USA und in England durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen wurde der Blendungsindex „BRS Glare Index“ für Blendung durch Kunstlichtquellen entwickelt, der Leuchtdichte und Größe der Blendquelle ebenso berücksichtigt wie ihre Position im Gesichtsfeld und die Adaptationsleuchtdichte. Bei großflächigen Blendquellen wie Fenstern führt dieser Index jedoch zu falschen Ergebnissen, da die Blendquelle mit zunehmender Größe das Adaptationsniveau des Auges anhebt und dadurch die Blendung reduziert. Dieser Einfluss wurde in Laborstudien untersucht, als Blendquelle („Himmel“) diente eine mit Leuchtstoffröhren hinterleuchtete Mattscheibe (Chauvel, Collins, Dogniaux & Longmore, 1982).

Hopkinson überarbeitete den Glare Index und entwickelte aus der bestehenden Formel den „Daylight Glare Index“ DGI für große Blendquellen, indem er den im Labor ermittelten Einfluss dieser Blendquelle auf das Adaptationsniveau berücksichtigte (Hopkinson, 1972):

$$DGI = 10 * \lg \sum 0,48 * \frac{L_s^{1,6} * \Omega^{0,8}}{L_b + 0,07\omega^{0,5} * L_s} \quad (1)$$

mit	DGI	Blendungsgrad durch Tageslicht
	L_s	Blendquellenleuchtdichte [cd/m^2]
	L_b	Adaptationsleuchtdichte/Hintergrundleuchtdichte (mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld) [cd/m^2]
	Ω	Raumwinkel, unter dem die Blendquelle (das Fenster) gesehen wird [sr], gewichtet entsprechend der Position im Gesichtsfeld
	ω	Raumwinkel, unter dem die Blendquelle (das Fenster) gesehen wird [sr]

Ein DGI-Wert von 16 entspricht einer „gerade wahrnehmbaren Blendung“, ein Wert von 28 bedeutet „gerade unerträgliche Blendung“. Der Einfluss von direktem Sonnenlicht wurde nicht berücksichtigt.

Zur Überprüfung des DGI befragte Hopkinson Probanden in tagesbelichteten Räumen (Blendungsbewertung „imperceptable“ ... „intolerable“). Er stellte fest, dass Index und Probandenurteil weniger hoch korrelieren als bei Kunstlicht, und dass leichte Blendung bei Tageslicht eher toleriert wird als bei künstlichen Lichtquellen. Daraus schloss er, dass weitere von der Formel nicht erfasste Faktoren die Bewertung beeinflussen. Aus Kommentaren der Probanden leitete Hopkinson ab, dass der Ausblick einer dieser Faktoren ist, der die Blendungsbewertung beein-

flusst, und dass bei einem besonders angenehmen oder interessanten Ausblick Blendung eher toleriert wird (ebd., S. 211).

Iwata et al. (1990) führten neue Blendungsbewertungsskalen ein, in denen sie Komfort und Akzeptanz trennten (Discomfort Sensation Vote: „not uncomfortable“ ... „very uncomfortable“; Acceptability: „acceptable“/„not acceptable“). Sie ermittelten neben dem Blendurteil den Anteil Unzufriedener („percentage dissatisfied“).

Die Ergebnisse einer Laboruntersuchung mit einer Mattscheibe als „künstlichem Fenster“ (80 x 80 cm) und 80 jungen Probanden bestätigen das sehr viel mildere Urteil bei großflächigen Blendquellen und den DGI als Bewertungskriterium für großflächige Blendquellen.

Bei einer weiteren Studie von Iwata et al. mit echten Fenstern konnte dagegen der DGI nicht bestätigt werden. Die Autoren fanden aber einen signifikanten Einfluss der Gesamtmenge des Lichts, das das Auge erreicht, auf die Blendungsbewertung großer Lichtquellen (Galasiu & Veitch, 2006, S. 735).

Die Ergebnisse einer Testraum-Untersuchung von Gall et al. (2000) stimmen mit diesen Ergebnissen überein: Bei Versuchen mit einem „künstlichen Fenster“ ohne Direktblendung und Sicht nach außen stimmten DGI-Wert und Nutzerurteil sehr gut überein, die Korrelation betrug $r=0.91$. Bei Versuchen mit einem realen Fenster ergab sich ein anderes Bild (ebd., S. 33): „Es zeigt sich, daß der DGI-Wert von realen Beleuchtungsanlagen nicht eindeutig dem subjektiven Blendeindruck zugeordnet werden kann.“

Wie bei Gall et al. (2000) wurde auch in einer eigenen Felduntersuchung kein signifikanter Zusammenhang zwischen DGI und Nutzerbewertung der Blendung durch Fenster gefunden (Moosmann, 2004), ebenso wenig zwischen Fensterleuchtdichte und Nutzerbewertung.

Nazzal erweiterte den DGI so, dass „ungleichmäßige Lichtquellen“ damit bewertet werden können, dass also neben Blendung durch den Himmel auch direktes Sonnenlicht berücksichtigt werden kann. Dieser DGI_N basiert hauptsächlich auf der vertikalen Beleuchtungsstärke des Fensters, wurde jedoch nicht mittels Nutzerbefragungen überprüft (Galasiu & Veitch, 2006, S. 736).

Wienold und Christoffersen (2006) führten Untersuchungen in büroähnlichen Testräumen mit Fenstern durch, an denen in Hoersholm, Dänemark, und Freiburg insgesamt 76 Probanden teilnahmen. Sie fanden, dass zwischen Fensterleuchtdichte und Blendungsempfindung keine Korrelation bestand und zwischen DGI und Blendungsempfindung nur eine mittlere Korrelation. Ein Nachteil der verschiedenen existierenden Blendungsbewertungsmethoden sei, dass sie ausnahmslos auf Untersuchungen mit künstlichen Lichtquellen basieren, keine sei unter Tageslichtbedingungen entwickelt worden, so Wienold (2009). Die Blendwirkung komplexer Blendquellen, wie z. B. Fenster mit Lamellenbehängen in einem Arbeitsumfeld, könne mit den bekannten Methoden nicht verlässlich vorhergesagt werden (ebd., S. 752).

Aufgrund der geringen Vorhersagequalität der bestehenden Blendungsindizes entwickelten Wienold und Christoffersen einen neuen Index, die „Daylight Glare Probability“ DGP. Dieser Index berücksichtigt die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge, die Leuchtdichte der Blendquelle, ihren Raumwinkel und ihre Position im Gesichtsfeld des Nutzers.

Der DGP-Wert entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Person in der vorhandenen Lichtsituation durch Blendung gestört fühlt:

$$DGP = 5,87 * 10^{-5} E_v + 9,18 * 10^{-2} \lg \left(1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 * \omega_{s,i}}{E_v^{1,87} * P_i^2} \right) + 0,16 \quad (2)$$

mit	<i>DGP</i>	Wahrscheinlichkeit der Blendung durch Tageslicht
	E_v	vertikale Beleuchtungsstärke am Auge [lx]
	L_s	Blendquellenleuchtdichte [cd/m ²]
	ω	Raumwinkel, der von der Blendquelle (dem Fenster) eingenommen wird [sr]
	<i>P</i>	Positionsindex nach IES Lighting Handbook (Kaufman, 1984) und Iwata und Tokura (1997)

Der Gültigkeitsbereich dieser Gleichung ist $0,2 < DGP < 0,8$ bei einer vertikalen Mindestbeleuchtungsstärke am Auge von 380 lx.

Die Autoren erwähnen, dass die individuelle Wahrnehmung von Blendung jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen könnte, da die Akzeptanz von Tageslicht während der Wintermonate höher sein könnte als im Sommer. Dieser Frage wurde in der Untersuchung aber nicht nachgegangen (Wienold & Christoffersen, 2006, S. 748). Wienold (2009) weist darauf hin, dass Untersuchungen zu Situationen mit niedrigem Beleuchtungsstärkeniveau bei der Entwicklung des Index fehlten, und dass das Alter der Nutzer und der Sichtkontakt nach außen einen Einfluss haben könnten.

In einer weiteren Testraum-Studie wurden der Einfluss der Sichtverbindung nach außen und der Einfluss des Alters untersucht, zudem wurden Situationen mit niedrigem Beleuchtungsstärkeniveau berücksichtigt. Der Einfluss des Alters auf die Blendungsbewertung konnte nachgewiesen und quantifiziert werden. Ebenfalls nachgewiesen wurde der Einfluss der Quantität des Sichtkontaktes durch Verschattungssysteme auf die Blendungsbewertung: „Je besser der Sichtkontakt, desto weniger störend bezüglich Blendung wird eine Situation bewertet.“ (Moosmann et al., 2012, S. 2)

Für den Einfluss der Quantität der Aussicht und den Einfluss des Alters wurden folgende Korrekturfaktoren ermittelt:

$$DGP_{viewratio} = \frac{DGP}{1 + 0,5 * viewratio} \quad (3)$$

mit	<i>DGP</i>	Wahrscheinlichkeit der Blendung durch Tageslicht
	<i>viewratio</i>	Verhältnis des sichtbaren Flächenanteils der verschatteten Fensterfläche zur unverschatteten Fensterfläche

sowie

$$DGP_{age} = \frac{DGP}{1,1 - 0,5 * age / 100} \quad (4)$$

mit	<i>DGP</i>	Wahrscheinlichkeit der Blendung durch Tageslicht
	<i>age</i>	Alter in Jahren

Der Alterskorrekturfaktor, mit dem der DGP-Wert modifiziert wird, beträgt 1,00 für eine 20-jährige Person und 1,25 für eine 60-jährige Person. Der Korrekturfaktor der Sichtverbindung beträgt 1,00 bei einem viewratio von 0, also bei gänzlich verschatteter Fensterfläche, und 0,67 bei einem viewratio von 1, also bei gänzlich unverschatteter Fensterfläche.

Eine weitere Modifikation des DGP wurde vorgeschlagen für Situationen mit geringer Blendungswahrscheinlichkeit:

$$DGP_{\text{lowlight}} = DGP \frac{e^{0,024 \cdot E_v - 4}}{1 + e^{0,024 \cdot E_v - 4}} \quad (5)$$

mit DGP Wahrscheinlichkeit der Blendung durch Tageslicht
 E_v vertikale Beleuchtungsstärke am Auge [lx]

Damit ist die Daylight Glare Probability DGP auch für Werte kleiner 0,2 bzw. vertikale Beleuchtungsstärken am Auge unter 380 lx definiert. Der Korrekturfaktor für Situationen mit geringem Blendrisiko beträgt 1,0 bei einer vertikalen Beleuchtungsstärke von 380 lx und 0,0 bei einer vertikalen Beleuchtungsstärke unter 40 lx (Moosmann et al., 2012).

2.3.1 Informationsgehalt der Blendquelle

Hopkinson fand – wie oben erwähnt – Hinweise, dass der Ausblick die Blendungsbewertung beeinflusst. Auch Schierz weist darauf hin, dass Blendquellen, die Aufmerksamkeit erregen ohne Information zu bieten, wie z. B. Leuchten oder sonnenbeschienene Markisen, störender wirken als der Blick ins Freie (Schierz, 2004).

Tuaycharoen und Tregenza (2005) untersuchten, ob der „Inhalt“ des Ausblicks, also das, was durch ein Fenster zu sehen ist, das Blendungsempfinden beeinflusst.

Sie führten Laboruntersuchungen durch, bei denen acht Probanden projizierte Bilder gezeigt wurden, die von einer anderen Probandengruppe als interessant beurteilt worden waren.

Im Vergleich zu einer Mattscheibe ohne Inhalt, die die gleiche Abmessung, Position und Leuchtdichte aufwies wie die Bilder, wurden die Bilder als weniger blendend bewertet. Tuaycharoen et al. weisen darauf hin, dass dieser Effekt sich bei starker Blendung verringern könnte.

In einer zweiten Untersuchung mit 24 Probanden wurden natürliche und städtische Bildinhalte miteinander verglichen. Dabei wurden natürliche Bildinhalte von den Probanden bevorzugt. Tuaycharoen et al. schließen aus den Ergebnissen, dass eine Blendquelle, die als interessant beurteilt wird, als weniger blendend empfunden wird, und dass die Blendungsbewertungsindizes BRS Glare Index und Unified Glare Rating UGR dazu tendieren, die Blendwirkung von Blendquellen mit „interessanten Inhalten“ zu überschätzen. (Beide Indizes dienen der Blendungsbewertung von Blendquellen mit kleinen Abmessungen, z. B. Leuchten, und werden hier nicht vorgestellt.)

In einer Folgestudie untersuchten Tuaycharoen und Tregenza (2007) die Blendwirkung von Fenstern eines Hochhauses mit unterschiedlichem Ausblick. 72 Studenten nahmen am ersten Teil dieser Studie teil und bewerteten die Blendwirkung unterschiedlicher Ausblicke, die von den Autoren folgendermaßen charakterisiert wurden:

- Mattscheibe (kein Ausblick)
- Blick auf eine nahe Mauer („uninteressanter Ausblick“)
- Blick auf Bäume und in die Landschaft („interessanter Ausblick“)

Die von den Probanden angegebene Blendwirkung wurde mit dem Blendurteil des Daylight Glare Index DGI verglichen.

Die drei Situationen wurden bei gleichen DGI-Werten als signifikant unterschiedlich blendend beurteilt. Die Situation ohne Ausblick wurde als blendender beurteilt als die Situation mit uninteressantem Ausblick, die Situation mit interessantem Ausblick wurde von den Probanden am wenigsten blendend empfunden.

In einer weiteren Untersuchung mit 96 Studenten wurde die Blendwirkung städtischer und natürlicher Szenen mit bzw. ohne Weitblick verglichen.

Die niedrigsten Blendurteile wurden für den Blick in eine natürliche Umgebung mit Weitblick abgegeben, gefolgt vom Blick in eine natürliche Umgebung ohne Weitblick und dem Blick in eine städtische Umgebung mit Weitblick, die sich nicht deutlich unterschieden. Die höchsten Blendurteile wurden beim Blick in eine städtische Umgebung ohne Weitblick abgegeben.

Gleichzeitig wirkt ein Ausblick mit hellen Sonnenflecken blendender als ein Ausblick mit gleichmäßigerer Leuchtdichteverteilung und identischer mittlerer Leuchtdichte, so Tuaycharoen und Tregenza (2007).

2.3.2 Normative Vorgaben

In der maßgeblichen Norm DIN EN 12464-1:2011-08 „Beleuchtung von Arbeitsstätten“ finden sich zu Blendung durch Fenster lediglich Hinweise: „Blendung kann entweder als psychologische Blendung oder als physiologische Blendung erfahren werden. Bei Arbeitsstätten im Innenraum ist physiologische Blendung in der Regel kein wesentliches Problem, wenn die Grenzen für psychologische Blendung eingehalten werden. [...]

Für die psychologische Blendung durch Fenster steht zurzeit kein genormtes Blendungsbewertungsverfahren zur Verfügung. [...]

Helle Lichtquellen können Blendung hervorrufen und das Sehen von Objekten beeinträchtigen. Dies muss z. B. durch geeignete Abschirmung von Lampen und Dachoberlichtern oder durch passende Abschattung von hellem Tageslicht bei Fenstern vermieden werden.“ (ebd., S. 14-15)

Zur Vermeidung störender Reflexionen in Bildschirmen empfiehlt DIN EN ISO 9241-6 „Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten“ für „Fenster, [...] die vom Bildschirmbenutzer im Bildschirm reflektiert gesehen werden können“, eine durchschnittliche Leuchtdichte $\leq 1000 \text{ cd/m}^2$ und Maximalwerte, die „so wenig wie möglich von mittleren Werten abweichen.“ (ebd., S. 22)

2.3.3 Zusammenfassung

Die Toleranz gegenüber „leichter Blendung“ (also gegenüber hohen Leuchtdichten, die die Sehfunktion nicht einschränken), ist bei Fenstern in der Regel groß.

Ein normativ festgelegtes Verfahren zur Blendungsbewertung durch Tageslicht existiert nicht. Die etablierten Bewertungsverfahren für Blendung durch Tageslicht sind unter Laborbedingungen mit künstlichen Lichtquellen und wenigen Testpersonen entstanden. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass sie Blendung im Alltag nicht zuverlässig vorhersagen können.

Als neuer Blendungsindex steht die Daylight Glare Probability DGP zur Verfügung, die maßgeblich auf der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge basiert. Auch dieser Index und die ergänzenden Korrekturfaktoren wurden in Testraumuntersuchungen unter kontrollierten Bedingungen ermittelt.

Hopkinson wies bereits 1972 darauf hin, dass der Ausblick die Blendungsbewertung zu beeinflussen scheint. Wienold konnte einen Einfluss der Sichtverbindung (Quantität) nachweisen, Tuaycharoen einen Einfluss des Ausblicks (Qualität), mit signifikant größerer Leuchtdichtetoleranz bei einem Ausblick in Natur mit Fernsicht als bei einem Ausblick ohne Fernsicht oder in städtische Umgebung. Die unterschiedliche Bewertung von Natur und gebauter Umwelt legt nahe, dass Natur bei vielen Menschen positiver besetzt ist – möglicherweise durch die Konnotation von Freizeit und Erholung.

2.4 Anforderungen an den Sonnenschutz oder Blendschutz

Die Norm DIN EN 12464-1:2011-08 weist darauf hin, dass Blendung durch Tageslicht durch „passende Abschattungen“ vermieden werden muss (ebd., S. 15).

Wienold priorisiert die Anforderungen an einen Blendschutz folgendermaßen: Wichtigste Aufgabe sei die Unterbrechung des Sichtkontaktes zur Sonne, es folge die Gewährleistung von Aussicht in vielen Situationen, variable Einstellmöglichkeit und individuelle Bedienbarkeit, und zuletzt die Reduktion der Himmelsleuchtdichte (Wienold, 2008, S. 18).

Gall et al. (2000) gehen davon aus, dass eine möglichst ausreichende Tageslichtversorgung und eine Sichtverbindung nach außen zum Wohlbefinden der Nutzer beitragen. Da Tageslicht und der Blick nach außen mit dem Risiko von Direktblendung durch die Sonne, Reflexen heller Flächen auf Monitoren und Überhitzung verbunden sind, untersuchten sie in mehreren Labor- und Feldstudien mit realen und künstlichen Fenstern, welche Forderungen an einen guten Lichtschutz zu stellen sind.

Bezüglich der Anforderungen, die an einen Sonnenschutz gestellt werden, zitieren sie Aydınli (ebd., S.15):

„Demnach wird von Sonnenschutzeinrichtungen die Erfüllung der folgenden Punkte erwartet:

- Vermeidung der Blendwirkung des direkten Sonnenlichts im Innenraum;
- Vermeidung von Wärme- und Strahlungsbelastung des Innenraumes und von Personen im Raum;
- Vermeidung von großen Leuchtdichteunterschieden zwischen besonnten und unbesonnten Flächen im Gesichtsfeld;
- Gewährleistung der visuellen Sichtverbindung nach außen;
- Unwesentliche Beeinflussung der spektralen Zusammensetzung des Tageslichts im Innenraum und damit der Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften.“

Diese Kriterien wurden in der Untersuchung von Gall et al. bestätigt. Bei einem realen Fenster, das sich beim gewählten Versuchsaufbau im Monitor spiegelte, benutzen die Probanden fast grundsätzlich einen Sonnenschutz, um diese Reflexionen zu vermeiden. Ein weiteres Fenster, das sich nicht im Monitor spiegelte, wurde nur dann verschattet, wenn direktes Sonnenlicht auf den Arbeitsplatz fiel. Gall et al. fassen dieses Nutzerverhalten folgendermaßen zusammen (ebd., S. 46): „Die Sicht nach außen ist eines der wichtigsten Kriterien bei der Einstellung. Dafür werden auch Kompromisse eingegangen. [...] Nur bei direkter Sonneneinstrahlung auf den Arbeitsbereich oder den Bildschirm wurde auf die Sicht nach außen verzichtet.“

2.5 Umgang der Nutzer mit Kunstlicht und Sonnenschutz

Die Analyse des Umgangs der Nutzer mit der elektrischen Beleuchtung und mit Sonnen- oder Blendschutzsystemen kann zeigen, unter welchen Umständen Nutzer – unter energetischen Gesichtspunkten – nicht ideal handeln, und auch wo ihre Wünsche von normativen Mindestanforderungen abweichen.

Beim Vergleich von Messwerten und Befragungsergebnissen fiel Maniccia, Rutledge, Rea und Morrow (1999) auf, dass Nutzer ihr eigenes Verhalten nicht immer zutreffend beschreiben: 18 % der Befragten machten falsche Angaben bei der Frage, ob sie das Licht gedimmt hatten oder nicht. Die Autoren schließen daraus, dass in Verhaltensstudien neben Nutzerbefragungen möglichst auch objektive Daten erhoben werden sollten.

Dass Nutzer falsche Angaben machen, kann aus Sicht der Autorin verschiedene Ursachen haben: Möglicherweise geben einige Nutzer statt des tatsächlichen ein „sozial erwünschtes“ Verhalten

an. Möglicherweise geschieht das Ein- und Ausschalten des Kunstlichts auch häufig nicht bewusst und wird deshalb nicht realistisch wiedergegeben.

Hunt (1979) untersuchte das Nutzerverhalten u.a. in zwei Klassenzimmern und drei Großraumbüros, in denen die Anwesenheit und der Umgang mit der elektrischen Beleuchtung sechs Monate lang erfasst wurden. Er stellte fest, dass alle Leuchten eines Raumes gleichzeitig geschaltet wurden, und dass das Schalten hauptsächlich beim Betreten oder Verlassen eines Raumes erfolgte.

In den beiden untersuchten Klassenzimmern wurde das Licht zu Beginn der Pausen, in denen sich niemand in den Räumen aufhielt, fast grundsätzlich ausgeschaltet. Zu Beginn der folgenden Unterrichtseinheit wurde das Licht in der Regel wieder eingeschaltet.

Zwei untersuchte Großraumbüros wurden während des ganzen Arbeitstages von mindestens einer Person genutzt. Die elektrische Beleuchtung dieser Räume wurde in der Regel morgens eingeschaltet und abends ausgeschaltet. Einschaltvorgänge während des Tages traten nur auf, wenn das Tageslicht deutlich unter das Helligkeitsniveau fiel, das an diesem Tag frühmorgens zu Beginn der Nutzung des Raums geherrscht hatte. Ebenso wurden nur wenige Fälle beobachtet, in denen die Beleuchtung um die Mittagszeit ausgeschaltet wurde.

Hunt beobachtete in einem der Klassenzimmer einen deutlichen Unterschied zwischen „Frühling“ (Februar und März) und „Sommer“ (April und Mai): Im Frühling wurde die elektrische Beleuchtung bei niedrigeren Außenbeleuchtungsstärken eingeschaltet als im Sommer. Im anderen Klassenzimmer war der Unterschied zwischen den beiden Zeiträumen nicht signifikant, woraus Hunt schloss, dass der Einfluss ohne Bedeutung ist. Im zweiten Klassenzimmer scheinen im April und Mai allerdings nur sehr wenige Einschaltvorgänge aufgetreten zu sein, was dieses Ergebnis beeinflusst haben könnte.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Beleuchtung eingeschaltet wird, korreliert Hunt zufolge stark mit der Beleuchtungsstärke des dunkelsten Arbeitsplatzes im Raum. Bei 150 lx mittlerer Beleuchtungsstärke im Raum lag die Wahrscheinlichkeit, dass die Beleuchtung eingeschaltet wurde, bei 18 %, dagegen bei einer mittleren Beleuchtungsstärke von 500 lx bei 1 %.

Der Tageslichtquotient am dunkelsten Arbeitsplatz lag in den untersuchten Großraumbüros bei 0,2 bis 0,3 %, in den Klassenzimmern bei 2,0 bzw. 3,1 %. Die Nennbeleuchtungsstärke der künstlichen Beleuchtung lag in den Büros bei 300 lx bzw. 500 lx, in den Klassenzimmern bei 150 lx.

Christoffersen et al. beobachteten, dass trotz hohen Tageslichtangebots häufig zusätzlich die elektrische Beleuchtung eingeschaltet war – dies umso häufiger, je mehr Personen in einem Raum arbeiteten (Christoffersen et al., 2000, nach Galasiu & Veitch, 2006, S. 731).

Reinhart untersuchte den Umgang der Nutzer mit Sonnenschutz und Kunstlicht in einer Feldstudie in zehn südorientierten Büroräumen eines Gebäudes in Weilheim (Reinhart, 2001). Anlass dieser Studie war der Wunsch, Nutzerverhalten realistisch in einem Simulationswerkzeug abbilden zu können. Als weitere Gründe für das Interesse am Umgang der Nutzer mit Sonnenschutz und Kunstlicht nennt Reinhart die Möglichkeit, innovative Produkte zu entwickeln, die von den Nutzern besser akzeptiert werden und damit zu einer höheren Leistungsfähigkeit der Nutzer beitragen können. Dazu kommt die Beobachtung, dass der Erfolg einer Maßnahme zur Energieeinsparung von der Wertschätzung und der Kooperation der Nutzer abhängt (ebd., S. 59).

Die elektrische Beleuchtung im untersuchten Gebäude ist eine rein indirekte, manuell geschaltete und tageslichtabhängig gedimmte Beleuchtung, die 350 lx an den Arbeitsplätzen sicherstellt. Die Tageslichtversorgung der Arbeitsplätze in den Zellenbüros ist gut, der Sonnenschutz ist ein außenliegender, zweigeteilter Behang mit Tageslichtlenkung im Oberlichtbereich, der automatisch gesteuert wird und von den Nutzern manuell verändert werden kann.

Reinhart stellte fest, dass 88 % der Einschaltvorgänge der elektrischen Beleuchtung bei Ankunft im Raum erfolgten, und dass große individuelle Unterschiede zwischen den Nutzern bestehen.

In zwei der zehn untersuchten Räume schalteten die Nutzer die Beleuchtung ein, sofern die Beleuchtungsstärke des Tageslichts am Arbeitsplatz unter ca. 400 lx lag. Bei höheren Beleuchtungsstärken durch Tageslicht leistete das Kunstlicht aufgrund der tageslichtabhängigen Dimmung keinen Beitrag. Reinhart schloss daraus, dass diese Nutzer das Kunstlicht unabhängig vom Tageslichtangebot zuschalten (S. 77).

In den übrigen acht Räumen wurde das Kunstlicht üblicherweise bei deutlich niedrigeren Beleuchtungsstärken eingeschaltet.

Das Einschaltverhalten, das Reinhart für die Gesamtheit der zehn Räume für den Arbeitsbeginn feststellte, korreliert hoch mit den Ergebnissen von Hunt (Reinhart, 2001, S. 77).

Für Einschaltvorgänge während des Arbeitstages ermittelte Reinhart auf Basis einer sehr kleinen Stichprobe eine Beleuchtungsstärke von 240 lx, unterhalb derer die Wahrscheinlichkeit sprunghaft ansteigt, dass das elektrische Licht eingeschaltet wird.

60 % der Ausschaltvorgänge fanden beim Verlassen des Büros statt, die übrigen Vorgänge verteilten sich auf Situationen, in denen das Büro nach Abwesenheit wieder betreten wird, auf Ausschaltvorgänge während der Nutzung und Ausschaltvorgänge in Situationen, in denen keine Anwesenheit beobachtet wurde (ebd., S. 79).

Das Monitoring ergab, dass das Kunstlicht nur mit einer Wahrscheinlichkeit von unter 70 % ausgeschaltet wurde, wenn der Raum für mehr als vier Stunden (z. B. auch über das Wochenende) verlassen wurde. Da das Kunstlicht tageslichtabhängig gedimmt wurde und rein indirekt strahlende Leuchten verwendet wurden, haben die Nutzer möglicherweise nicht immer wahrgenommen, dass das Licht eingeschaltet war.

Da das Beleuchtungsstärkeniveau mit 400 lx relativ niedrig ist, könnte – entgegen der Interpretation von Reinhart, dass das Tageslichtangebot in zwei Räumen wenig Einfluss auf das Einschaltverhalten hatte – auch der Wunsch nach mehr Helligkeit Anlass für dieses Einschaltverhalten gewesen sein.

Galasiu und Veitch (2006) referenzieren verschiedene Studien von Escuyer et al. (2001) sowie von Slater et al., die übereinstimmend ergaben, dass Nutzer mehrheitlich die manuelle Steuerung ihres Kunstlichts einer automatischen Regelung vorziehen. Slater et al. betonen, dass die einfache Bedienbarkeit entscheidend ist sowohl für den visuellen Komfort als auch für den Energieverbrauch. In Atrien und Gemeinschaftsbereichen, die niemandem „gehören“, würden tageslichtabhängige Kontrollsysteme klaglos akzeptiert, während sie in den Bürobereichen der untersuchten Gebäude zu Beschwerdemeldungen führten und in einigen Gebäuden außer Betrieb genommen wurden (Galasiu & Veitch, 2006, S. 737).

2.5.1 Umgang der Nutzer mit dem Sonnenschutz

Rea (1984) untersuchte den Umgang von Nutzern eines Hochhauses in Ottawa, Kanada, mit dem Sonnenschutz, indem er die Fassaden fotografierte und die Positionen der Behänge ermittelte. Er fasst die Ergebnisse einer eigenen Studie und einer Studie von Rubin et al. (1987) folgendermaßen zusammen: „Die Daten dieser Studie und der von Rubin et al. scheinen die Hypothese zu bestätigen, dass Nutzer – zumindest im Mittel – dazu neigen, den Sonnenschutz dazu zu verwenden, Solarstrahlung (Hitze und Licht) auszuschließen.“ (Rea, 1984, S. 136)

Reinhart zitiert eine Untersuchung von Lindsay et al. (1993), die in fünf Bürogebäuden in England durchgeführt wurde. Dabei wurde die Position des Sonnenschutzes in Zellen- und Großraumbüros unterschiedlicher Orientierung mehrmals täglich erfasst. Die Position des Sonnenschutzes wurde an einigen Fenstern nie verändert, an anderen täglich, der Mittelwert lag bei 0,4 Veränderungen pro Fenster und Tag.

Das Schließen des Sonnenschutzes erfolgte überwiegend bei direkter Besonnung der Fassade, das Öffnen am Ende des Arbeitstages oder am nächsten Morgen.

Lindsay beobachtete bei einem der untersuchten Gebäude, dass die Jalousien durchschnittlich zu 70 % geschlossen waren und damit deutlich stärker als bei den anderen Gebäuden. Er vermutet, dass der Grund in Überhitzungsproblemen dieses Gebäudes zu suchen ist. Im Allgemeinen sei jedoch Blendung Anlass für Nutzereingriffe, nicht die Vermeidung von Überhitzung, so seine Zusammenfassung Reinhart zufolge. (Reinhart, 2001, S. 66/67)

Reinhart beobachtete in der oben erwähnten Feldstudie in einem Bürogebäude pro Tag und Büroraum durchschnittlich ca. 1,5 Veränderungen des Sonnenschutzes, die nicht auf die automatische Steuerung oder die Korrektur einer automatischen Veränderung zurückzuführen sind. Der Mittelwert der Fassadenbeleuchtungsstärke beim Schließen lag bei 49 000 lx, der Mittelwert beim Öffnen bei 25 000 lx. Der deutliche Unterschied der Beleuchtungsstärke wird von Reinhart als Hinweis interpretiert, dass das Schließen wegen Blendung bzw. wegen unerwünschter solarer Wärmeeinträge erfolgte, während das Öffnen erfolgte, um die Tageslichtversorgung an den Arbeitsplätzen zu verbessern.

Korrekturen der automatischen Steuerung traten mit durchschnittlich ca. 1,1 Eingriffen pro Büro und Tag fast ebenso häufig auf. Dabei wurde überwiegend der Sonnenschutz geöffnet, vor allem bei geringen Eindringtiefen der Sonne in den Raum. Ein korrigierendes Schließen des Sonnenschutzes wurden sehr selten beobachtet und wird von Reinhart auf Blendung durch direktes Sonnenlicht zurückgeführt (Reinhart, 2001, S. 79-82).

Bordass et al. (1994) fanden bei Studien in Großbritannien, dass die Mehrheit der Nutzer mit der automatischen Steuerung des Sonnenschutzes unzufrieden war. Die Nutzer hatten den Eindruck, dass die Position des Sonnenschutzes von der Steuerung zur falschen Zeit verändert wurde, so dass die manuelle Übersteuerung der Automatik den Nutzern unverzichtbar schien (Bordass et al., 1994, nach Galasiu & Veitch, 2006, S. 739).

Mahdavi, Mohammadi, Kabir und Lambeva (2008) erfassten das Nutzerverhalten in 42 Büroräumen in zwei Gebäuden in Österreich ein Jahr lang und das Nutzerverhalten in sechs Büroräumen eines weiteren Gebäudes während neun Monaten. Alle Räume waren Einzel-, Zweier- oder Dreipersonenbüros. Neben dem Nutzerverhalten (Veränderungen des Kunstlichts und des Sonnenschutzes) wurden auch die Anwesenheit der Nutzer und Klimabedingungen wie Innen- und Außentemperatur und relative Feuchte, Beleuchtungsstärke innen und Globalstrahlung außen im Abstand von fünf Minuten aufgezeichnet. Die untersuchten Räume waren im Mittel zu weniger als 50 % der Arbeitszeit belegt, dabei wurden große Unterschiede zwischen den Gebäuden und zwischen einzelnen Räumen beobachtet.

Die Autoren stellten fest, dass in den untersuchten Gebäuden nur Beleuchtungsstärken unter 200 lx mit großer Wahrscheinlichkeit zum Einschalten des Kunstlichts führten. Beim Umgang mit dem Sonnenschutz ist ein Zusammenhang mit hohen Einstrahlungen (ab 200 W/m² vertikal) in den Sommermonaten zu sehen, während derer der Sonnenschutz stärker und häufiger geschlossen wird.

2.5.2 Zusammenfassung

Nutzer sind in ihren Angaben zum Umgang mit dem Kunstlicht oder dem Sonnenschutz nicht immer zuverlässig. In Verhaltensstudien sollten daher möglichst objektive Daten erhoben werden.

Das Kunstlicht wird in erster Linie bei der Ankunft in einem Raum oder beim Verlassen ein- bzw. ausgeschaltet. In Großraumbüros ist nicht immer offensichtlich, ob der Raum noch genutzt wird, und ob der eigene Wunsch nach Veränderung im Widerspruch zum Wunsch der anderen Nutzer steht. Das führt dazu, dass Nutzereingriffe seltener sind.

In mehreren Studien hat sich gezeigt, dass Nutzer die manuelle Steuerung ihres Kunstlichts einer automatischen Regelung vorziehen. Wenn die automatische Regelung zu Beschwerde-

meldungen führt, wird sie unter Umständen außer Betrieb genommen, oder von den Nutzern sabotiert – der Erfolg einer Steuerung hängt daher von der Wertschätzung und der Kooperation der Nutzer ab, wie Reinhart (2001) ausführt.

Veränderungen bei der Position des Sonnenschutzes werden eher selten vorgenommen. Anlass für das Schließen ist in erster Linie Blendung, seltener der Schutz vor Überhitzung. Mit der automatischen Steuerung des Sonnenschutzes sind Nutzer häufig unzufrieden.

2.6 Biologische Lichtwirkungen

Ein weiterer Aspekt des visuellen Komforts sind biologische Lichtwirkungen, die seit den 1960er Jahren in zahlreichen Studien untersucht wurden. Zu den bekannten Wirkungen von Licht auf biologische Vorgänge gehören die Stabilisierung des circadianen Rhythmus' und die Steigerung des Wachheitsgrades (Schierz, 2002). Circadiane Rhythmen wie der Schlaf-Wach-Rhythmus des Menschen haben eine Periodenlänge von ungefähr 24 Stunden und können durch sogenannte Zeitgeber an den Tag-Nacht-Rhythmus angepasst, mit ihm synchronisiert werden.

Seit 2001 ist mit den sogenannten Melanopsin-haltigen retinalen Ganglienzellen eine Rezeptorart im Auge bekannt, die auf kurzwelliges Licht reagiert. Die Empfindlichkeit dieser Rezeptoren entspricht nicht der $V(\lambda)$ -Kurve, welche die gemessene Beleuchtungsstärke entsprechend der visuellen Wahrnehmung von Licht durch das menschliche Auge gewichtet. Brainard et al. (2001) nennen Wellenlängen zwischen 446 und 477 nm als diejenigen mit dem größten Einfluss. Untersuchungen von Rea, Bullough und Figueiro (2001) bestätigen die Abhängigkeit der circadianen Wirkung vom Spektrum des eingesetzten Lichts.

Auch die räumliche Verteilung des Lichts ist von Bedeutung: Es gibt wahrscheinlich nur wenige tausend dieser Melanopsin-haltigen Ganglienzellen, die in der Retina weit verteilt sind, wobei mehr Zellen im unteren Bereich der Retina und zur Nase hin zu finden sind. Daher ist flächiges Licht von oben und von der Seite wirksamer als Licht auf die obere Hälfte der Retina (Glickman et al., 2003) oder Lichtgaben mit nur geringer räumlicher Ausdehnung. Die räumliche Anordnung und Ausdehnung biologisch wirksamer Beleuchtung entspricht somit den natürlichen Bedingungen mit einem hellen Himmel.

Die erforderliche Beleuchtungsstärke, der Zeitpunkt der Lichtgabe, deren Dauer sowie die spektrale Zusammensetzung für die circadiane Wirksamkeit von Licht sind noch nicht abschließend geklärt. Einige Untersuchungen weisen circadiane Wirkungen bereits bei geringen Beleuchtungsstärken von 15 lx (Zeitler, Dijk, Kronauer, Brown & Czeisler, 2000) oder 180 lx (Boivin & Czeisler, 1998) nach. Der Zeitpunkt der Lichtgabe im circadianen Rhythmus des Menschen bestimmt dessen Wirksamkeit und dessen Wirkweise. Lichtgaben in der subjektiven Nacht nahe dem Körpertemperaturminimum sind besonders wirksam.

2.6.1 Lichtwirkungen am Tage

Die Auswirkungen von Lichtgaben während des subjektiven Tages sind umstritten – Dumont und Carrier (1997) fanden keine signifikanten Auswirkungen bei Lichtgaben am Nachmittag, während Jewett et al. (1997) zeigten, dass Licht zu jedem Zeitpunkt wirksam sein kann. Duffy und Wright (2005) fassen die Ergebnisse verschiedener Studien zusammen und schließen ebenfalls, dass biologische Lichtwirkungen auch während des subjektiven Tages auftreten.

In molekularen und neurophysiologischen Laboruntersuchungen wurde festgestellt, dass das circadiane System von Tieren von der (im Labor künstlichen) „Tageslänge“, der es ausgesetzt ist, beeinflusst wird und dass es sich in vollständiger Dunkelheit entsprechend der zuletzt erfahrenen Tageslänge verhält. Daan et al. (2001) schließen aus diesen Studien, dass bei Nagetieren

(und vermutlich auch beim Menschen) sowohl die Morgen- als auch die Abenddämmerung das circadiane System beeinflussen („Morning and Evening Oscillator“), und dass mittels dieser beiden Signale die Änderung der Tageslänge im Jahresverlauf erfasst wird. Das ermöglicht die Anpassung des Verhaltens an die Jahreszeiten.

Die jahreszeitlich unterschiedliche Länge der Nacht spiegelt sich beim Menschen beispielsweise in der Länge der nächtlichen Melatoninausschüttung wider. Patienten mit SAD (Seasonal Affective Disorder, Winterdepression) reagieren besonders stark auf die abnehmende Tageslänge im Herbst (Wirz-Justice, 2009).

Dass Licht der wichtigste Zeitgeber ist, ist mittlerweile unumstritten. Lange Zeit wurden jedoch soziale Zeitgeber als die wesentlichen für das menschliche circadiane System betrachtet. Einflussfaktoren, die neben Sonnenlicht auf den circadianen Rhythmus wirken, sind Temperaturänderungen, Nahrungsaufnahme, körperliche Aktivität und Lärm, so Ehrenstein (1995).

Youngstedt, Kripke und Elliott zitieren ebenfalls zahlreiche Untersuchungen, die einen Effekt körperlicher Aktivität auf den circadianen Rhythmus zeigten, konnten diesen Effekt in einer eigenen Untersuchung aber nicht statistisch signifikant bestätigen (Youngstedt et al., 2002).

Ein Großteil des Wissens über biologische Lichtwirkungen wurde durch Untersuchungen zu Schlafstörungen und Befindlichkeitsstörungen wie SAD gewonnen. Aus der wirksamen Behandlung psychiatrischer und neurologischer Krankheiten mit Licht lässt sich Wirz-Justice zufolge ableiten, dass adäquate Lichtexposition auch eine wichtige Grundlage für Gesundheit und Wohlbefinden ist (Wirz-Justice & Fournier, 2010).

Wirz-Justice bezeichnet Tageslicht als ideale Lichtquelle für biologische Wirkungen, da es höhere Beleuchtungsstärken bietet als Kunstlicht und gleichzeitig mit dem sich im Tagesverlauf ändernden Sonnenstand und sich ändernder Lichtfarbe und Beleuchtungsstärke weitere Zeitgeber enthält (Wirz-Justice & Fournier, 2010).

Ein Zusammenhang zwischen Produktivität und Tageslichtangebot zeigt sich bei Figueiro, Rea, Stevens und Rea (2002). In einer Felduntersuchung, die gezielt während des lichtarmen Winters durchgeführt wurde, verglichen sie das Verhalten von Probanden in Büroräumen mit Fenstern mit dem von Probanden in fensterlosen Büroräumen. Figueiro et al. beobachteten, dass die Nutzer von Büroräumen mit Fenstern signifikant mehr Zeit damit verbrachten, am PC zu arbeiten und signifikant weniger Zeit mit Telefonaten oder Gesprächen mit Kollegen verbrachten als die Nutzer fensterloser Räume. Als mögliche Ursache für diesen Unterschied wird die in den fensterlosen Räumen fehlende circadiane Wirkung des Tageslichts genannt, die im Winter weniger durch Tageslicht außerhalb der Arbeitszeit ausgeglichen werden kann als in anderen Jahreszeiten.

Auch Smolders und Kort (2012) untersuchten den Einfluss hoher Beleuchtungsstärken am Tage auf die Leistungsfähigkeit. Sie fanden positive Effekte auf die subjektive Wachheit und Vitalität, die sofort mit Beginn der Lichtexposition von 1000 lx am Auge einsetzten. Ein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit wurde nur ansatzweise beobachtet: Eine Gruppe Probanden, die durch anstrengende Aufgaben während der Untersuchung geistig erschöpft waren, wurde mit einer Kontrollgruppe verglichen, die diese Aufgaben nicht erfüllen musste. Ein Einfluss der erhöhten Lichtexposition auf die Leistungsfähigkeit wurde in beiden Gruppen nur gegen Ende der Lichtexposition beobachtet. Smolders et al. schließen daraus, dass ein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit verzögert wirkt und unabhängig vom Erschöpfungsgrad vor Beginn der Lichtexposition ist.

Ehrenstein (2002) weist darauf hin, dass die leistungsfähige Adaptation des visuellen Systems an niedrige Leuchtdichten ermöglicht, dass die Gestaltung künstlicher Beleuchtungen sich vorrangig an visuellen Anforderungen und niedrigen Kosten orientiert. Er führt aus, dass viele Kunstlichtanlagen „die physiologischen Bedürfnisse des Timing Systems nur unzureichend“ befriedigen und die stimulierenden Wirkungen des Lichts hauptsächlich bei Therapiegeräten zur

Behandlung von Winterdepression genutzt würden: „Sie entsprechen dem Nutzen und dem Charme von Wärmestuben, die zu einer Zeit geschätzt wurden, als viele Menschen im Winter über keine ausreichend beheizten Aufenthaltsräume verfügten. Sinnvoller wäre es, die Stimulierung des Timing Systems durch die normale Wohnraum- und Arbeitsplatzbeleuchtung zu ermöglichen.

Zwar leiden nur etwa 2 % der Bevölkerung an der schweren Form der Winterdepression, aber auch solche Menschen, die gar nicht über depressive Verstimmungen berichten, profitieren im nordeuropäischen Winter von einer besseren Stimulierung des Timing Systems durch Licht.“ (Ehrenstein, 2002)

Hubalek, Brink und Schierz (2010) führen aus, dass anerkannte biologische Lichtwirkungen wie die Verschiebung des circadianen Rhythmus' zur Vermeidung des Jetlag, die Steigerung der Wachsamkeit während der Nacht oder die Therapie der Winterdepression nur Teile der Bevölkerung betreffen.

Wirkungen von Licht während des Tages, die breite Teile der Bevölkerung betreffen könnten, sind laut Hubalek et al. der mögliche Einfluss des Lichts auf die Schlafqualität und auf die Stimmung. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, ob die Wirkungen nur in Laborversuchen auftreten, oder ob sie so stark sind, dass sie auch im Alltag auftreten.

In einer Felduntersuchung mit 23 Büroarbeitern erfasste Hubalek (2007) deren tägliche Lichtexposition und den Blaulichtanteil in der Nähe der Augen. Sie stellte fest, dass die Fassadenart und die Entfernung des Arbeitsplatzes zum Fenster die Lichtintensität am Auge beeinflussen.

Die gemessene Lichtexposition der 23 Probanden streute weit, der Medianwert der Beleuchtungsstärke (vertikal, nahe des Auges) während der Zeiten im Büro betrug 308 lx. Beleuchtungsstärkewerte über 100 lx wurden zu Zeiten mit Tageslichtangebot und daher überwiegend im Büro gemessen, während die Beleuchtungsstärkewerte abends deutlich niedriger lagen. Sehr hohe vertikale Beleuchtungsstärken über 2500 lx vertikal traten im Mittel täglich 43 Minuten lang auf, davon im Mittel nur 1 Minute im Büro. Die gemessenen Werte der Blaulichtexposition verteilen sich entsprechend der Beleuchtungsstärke (Hubalek et al., 2010).

Ein Einfluss der Beleuchtungsstärke oder des Blaulichtanteils auf die Stimmung konnte in der – relativ kleinen – Stichprobe nicht nachgewiesen werden. Hubalek kommt zu folgendem Fazit: „Deutliche nicht-visuelle Wirkungen der Lichtexposition auf breite Teile der Bevölkerung konnten im Rahmen dieses Versuchs nur auf die Aktiviertheit vor dem zu Bett gehen nachgewiesen werden. Es ist zu diskutieren, ob Lichtwirkungen während des Tages mehr psychologischer als physiologischer Natur sind.“ (Hubalek, 2007, S. 10)

2.6.2 Messung der „biologischen Wirksamkeit“ von Licht

Da die spektrale Empfindlichkeit der Melanopsin-haltigen retinalen Ganglienzellen nicht der spektralen Empfindlichkeit der Zapfen für das Tagsehen entspricht, ist die $V(\lambda)$ -bewertete Beleuchtungsstärke ein unzureichendes Maß für biologische Lichtwirkungen.

Gall gibt eine $c(\lambda)$ -Kurve an, die die Beleuchtungsstärke entsprechend der circadianen Wirkungsfunktion für Melatonin-suppression gewichtet (Gall, 2004). Da bisher nur einzelne Wellenlängen untersucht wurden, spricht Gall von einer „groben Festlegung“. Gall schlägt einen circadianen Wirkungsfaktor a_{cv} vor, der definiert ist als das Verhältnis von circadian bewertetem Lichtstrom $\Phi c(\lambda)$ zu visuell bewertetem Lichtstrom $\Phi V(\lambda)$ (Gall, 2002).

2009 wurde mit DIN V 5031-100 „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen“ normativ festgelegt, wie bei der spektralen Bewertung der optischen Strahlung im sichtbaren Bereich zur Beurteilung biologischer Wirkungen vorzugehen ist. Diese Norm gibt ein Wirkungsspektrum für Unterdrückung von Melatonin in der Nacht $s_{ms}(\lambda)$ an (siehe Abbildung 1), dessen Werte der $c(\lambda)$ -Kurve entsprechen.

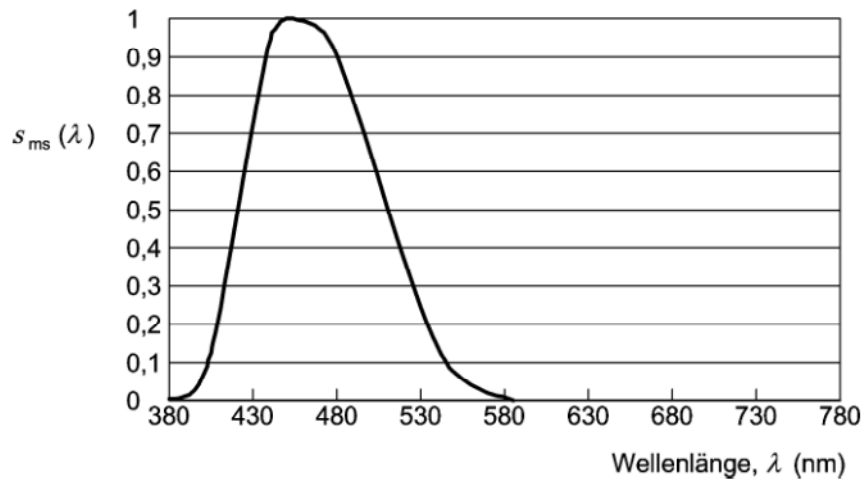


Abbildung 1 Wirkungsspektrum für Unterdrückung von Melatonin in der Nacht $s_{ms}(\lambda)$ nach DIN 5031-100:2009-06

DIN 5031-100 weist darauf hin, dass bisher lediglich für Melatoninsuppression in der Nacht ein Wirkungsspektrum bekannt ist, während die Wirkungsspektren anderer biologischer Lichtwirkungen wie beispielsweise der Aktivierung mit Licht noch unbekannt sind. An gleicher Stelle wird festgelegt, dass als Wirkungsspektrum der Aktivierung mit Licht vorläufig das Wirkungsspektrum der nächtlichen Melatoninsuppression zu verwenden ist.

2.6.3 Zusammenfassung

Die Existenz biologischer, „nicht-visueller“ Lichtwirkungen wie die Beeinflussung des circadianen Rhythmus' oder der Wachsamkeit ist unumstritten. Dabei haben sich Lichtgaben während der subjektiven Nacht und mit Wellenlängen zwischen 446 und 477 nm als besonders wirksam erwiesen.

Welche Wirkungen von Licht am Tage ausgehen, ist noch nicht abschließend geklärt, ebenso wenig die erforderliche Beleuchtungsstärke, der Zeitpunkt der Lichtgabe, deren Dauer und die spektrale Zusammensetzung.

Tageslicht als die natürliche Lichtquelle stellt aufgrund seiner räumlichen und zeitlichen Verteilung und mit seiner Intensität eine biologisch wirksame Beleuchtung dar, während sich die Planung der künstlichen Beleuchtung häufig an Kosten orientiert und physiologische Anforderungen nicht erfüllt, wie Ehrenstein ausführt.

Einflüsse der Jahreszeiten auf das circadiane System werden von Daan und Wirtz-Justice erwähnt.

3 Fragestellung

Die vorgestellten Studien zeigen, dass bereits viele Einflussgrößen des „visuellen Komforts“, also der Zufriedenheit von Nutzern mit den visuellen Bedingungen, bekannt sind. Dazu gehören die Parameter Tageslichtversorgung und Ausblick, Beleuchtungsstärke, Blendung und auch die nicht-visuellen, biologischen Lichtwirkungen.

Gleichzeitig wurden für viele dieser Aspekte in unterschiedlichen Studien unterschiedliche Werte ermittelt, die der jeweiligen Studie zufolge komfortabel oder zumindest akzeptabel sind. Einige Ergebnisse widersprechen sich. Zahlreiche Studien wurden in Laborräumen mit zum Teil kleiner Probandenzahl durchgeführt und befassen sich mit Einzelaspekten. Auch die vorgestellten Felduntersuchungen betrachteten häufig nur einen Aspekt, wie z. B. den Umgang mit dem Sonnenschutz oder dem Kunstlicht.

Für die Planung und Bewertung von Tageslicht an Büroarbeitsplätzen stehen derzeit kaum normativ festgelegte Kenngrößen oder Verfahren zur Verfügung, die unumstritten sind – die Mindestanforderungen an Tageslichtquotienten und Beleuchtungsstärke bei natürlicher Belichtung konnten in aktuellen Untersuchungen nicht bestätigt werden, und zur Blendung durch Tageslicht steht gar kein normativ verankertes Verfahren zur Verfügung.

Das Ziel dieser Untersuchung ist daher, Einflussgrößen des visuellen Komforts an tageslichtversorgten Büroarbeitsplätzen zu identifizieren, die im Alltag relevant sind. Die Kenntnis dieser Einflussgrößen, ihrer Zusammenhänge und Wirkungen auf die subjektive Bewertung von Tageslicht kann wichtige Hinweise geben, wie Tageslichtnutzung in Gebäuden den Nutzerwünschen entsprechend umgesetzt werden kann.

Eine hohe Nutzungsqualität ist Schakib-Ekbatan, Wagner und Lützkendorf zufolge erforderlich, um langfristig eine für Gesundheit, Wohlbefinden und Zufriedenheit förderliche Arbeitsumgebung zu bieten. Die Autoren fahren fort: „Da die Personalkosten alle anderen Gebäudekosten einschließlich der Kosten für den Gebäudebetrieb um mindestens das zweifache überschreiten, sind angemessene Arbeitsplatzbedingungen über gesundheitliche Aspekte hinaus auch hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, d. h. in wirtschaftlicher Hinsicht von größter Relevanz.“ (Schakib-Ekbatan et al., 2012, S. 3)

Hinsichtlich der Einflussgrößen soll neben der Frage nach der präferierten Beleuchtungsstärke an natürlich belichteten Arbeitsplätzen und der Überprüfung des Blendungskriteriums DGP der Frage nachgegangen werden, ob das präferierte Helligkeitsniveau und die Toleranz gegenüber Blendquellen intrapersonell schwanken. Der offensichtlich starke Einfluss, den Umgebungsbedingungen auf Nutzerbewertungen haben, lässt vermuten, dass ähnliche Lichtsituationen bei veränderten Umgebungsbedingungen unterschiedlich wahrgenommen werden.

Eine dieser sich ändernden Umgebungsbedingungen ist die Jahreszeit. Aus Untersuchungen zum thermischen Komfort ist bekannt, dass langfristige Adaptationsprozesse stattfinden, die abhängig von den Außentemperaturen der vergangenen Tage zu unterschiedlichen Bewertungen der Innentemperatur führen (Nicol & Humphreys, 1973). Auch die Tageslänge und das Helligkeitsniveau außen unterliegen starken Schwankungen im Jahresverlauf. Einflüsse des zum Sommer steigenden und zum Winter abnehmenden Tageslichtangebots auf die Erwartungen der Nutzer und auf Nutzerwünsche bezüglich der Helligkeit am Arbeitsplatz und auf die Blendungstoleranz können nicht ausgeschlossen werden.

Wie von Laurentin et al. (2000) dargelegt, ist auch ein Einfluss des thermischen Komforts auf die Bewertung des visuellen Komforts denkbar, dem in dieser Studie ebenfalls nachgegangen werden soll.

Die normativen Vorgaben des für die Fassadengestaltung und die Architektur prägenden Fensterflächenanteils wurden für Deutschland unter Bedingungen ermittelt, die nur einge-

schränkt auf Büroräume übertragbar sind. Im Gegensatz zu diesen Mindestanforderungen sind in der aktuellen Baupraxis häufig sehr große Fensterflächenanteile bis hin zu Ganzglasfassaden zu sehen, bei denen der Ausblick kaum eingeschränkt ist, bei denen aber das Risiko der sommerlichen Überhitzung und der Blendung durch Tageslicht höher ist. Zum Schutz vor Überhitzung werden in der Regel Sonnenschutzverglasungen eingesetzt, was auch bei selektiven Gläsern eine reduzierte Lichttransmission zur Folge hat. Die Nutzer von Bürogebäuden sind mit diesen vielfältigen Auswirkungen der Fensterflächenanteile konfrontiert. Aus der Kenntnis, wie Nutzer die Vor- und Nachteile gewichten, können Planungshinweise für einen den Nutzerwünschen entsprechenden Fensterflächenanteil abgeleitet werden.

Auch räumliche Bedingungen wie Atrien oder die Büroform (Zellenbüro/Großraumbüro) beeinflussen das Nutzerurteil. Die Anzahl weiterer Personen im Raum beeinflusst die psychosozialen Faktoren Privatheit und Selbstbestimmtheit der Nutzer, die – wie die Arbeitsatmosphäre und die psychische Belastung, der ein Proband ausgesetzt ist – die Zufriedenheit insgesamt beeinflussen. Diese architektonischen Faktoren sollen bei der Analyse relevanter Einflussfaktoren berücksichtigt werden, da sie die räumlichen Bedingungen prägen und nach Abschluss der Planungsphase eines Gebäudes nur mit immensem Aufwand verändert werden können.

Im Gegensatz dazu ist die Veränderung der Steuerung oder Regelung von Kunstlicht und Sonnenschutz einfacher möglich. Die Unzufriedenheit von Nutzern mit automatisierten Veränderungen des Kunstlichts oder des Sonnenschutzes wurde in mehreren Untersuchungen beobachtet. Gerade der Erfolg von Maßnahmen zur Energieeinsparung hängt jedoch davon ab, dass Steuerungen nicht außer Betrieb genommen oder von den Nutzern sabotiert werden, weil sie ihren Wünschen widersprechen (Reinhart, 2001, S. 59).

Für den energieeffizienten Betrieb eines Gebäudes ist daher elementar, dass Steuerung oder Regelung von den Nutzern akzeptiert werden. Nutzereingriffe stellen eine indirekte Bewertung der Lichtsituation dar und können Hinweise zur Akzeptanz von (Tages-)Licht unter Alltagsbedingungen geben.

Ein weiterer Aspekt des visuellen Komforts, der in den letzten Jahren viel diskutiert wird und langsam Einzug in die Planung hält, ist die vom circadianen System beeinflusste Gesundheit der Nutzer, ihr Wohlbefinden und ihre empfundene Leistungsfähigkeit. Die spektrale Zusammensetzung des Lichts und ihr Einfluss auf die Nutzer soll daher ebenfalls ermittelt werden.

Die vorliegende Untersuchung möchte einen Beitrag leisten, die Wünsche der Nutzer bezüglich Beleuchtungsstärkeniveau und Blendungsbegrenzung, ihren Umgang mit Kunstlicht und Sonnenschutz sowie Zusammenhänge zwischen einzelnen Komfortaspekten besser zu verstehen. Daraus können Hinweise abgeleitet werden, die die Planung energieeffizienter Gebäude mit angemessener Tageslichtnutzung, stromsparenden Kunstlichtanlagen und vor allem großer Nutzerakzeptanz unterstützen können: „Die primäre Aufgabe eines Gebäudes ist nicht, möglichst wenig Energie zu verbrauchen, sondern den sich darin aufhaltenden Menschen einen ihnen angemessenen Lebensraum zu bieten.“ (Schmitz, 2003, S. 9)

3.1 Hypothesen

Das präferierte Beleuchtungsstärkeniveau und die Blendungstoleranz von Nutzern, der Einfluss von Alter und Jahreszeit, die Qualität des Außenkontakts, der Umgang der Nutzer mit Sonnen- und Blendschutzsystemen, der Einfluss verschiedener Raumklimabedingungen und Einflussfaktoren der Architektur sowie Einflüsse des Lichtspektrums auf Wohlbefinden und Aktiviertheit der Nutzer sollen in einer Felduntersuchung mit Nutzerbefragung und Langzeitmessung der relevanten Größen untersucht werden.

Die Ermittlung, ob die beschriebenen Einflussfaktoren und Zusammenhänge von praktischer Relevanz sind, erfolgt anhand der folgenden Hypothesen, die mit Mitteln der Statistik überprüft werden.

1. Die Nutzerbewertung der Helligkeit ist abhängig von der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz. Die präferierte Beleuchtungsstärke wird vom Alter der Nutzer, der Jahreszeit und der Nutzerbewertung des Ausblicks beeinflusst.
2. Die Nutzerbewertung der Blendung ist abhängig vom DGP-Wert, vom Alter der Nutzer, von der Jahreszeit und von der Nutzerbewertung des Ausblicks.
3. Der Umgang der Nutzer mit dem Kunstlicht ist abhängig von der Jahreszeit, von der Bedienbarkeit des Systems und von der Bürogröße.
4. Der Umgang der Nutzer mit Sonnen- und Blendschutzsystemen ist abhängig von der Qualität des Außenkontakts (Bewertung des Ausblicks, Einschränkung des Ausblicks durch Sonnen-/Blendschutz) sowie von deren Bedienbarkeit.
5. Die Blendungstoleranz der Nutzer ist abhängig von der Jahreszeit.
6. Die Zufriedenheit mit Raumklimabedingungen wie Temperatur, Luftqualität und Schallpegel beeinflusst den visuellen Komfort.
7. Die Architektur (Fensterflächenanteil, Fassadenart, Größe und Proportion der Räume, Materialität und Farbgebung der Oberflächen der Gebäude) beeinflusst den visuellen Komfort.
8. Die Gesundheit der Nutzer, ihr Wohlbefinden und ihre empfundene Leistungsfähigkeit sind abhängig von der spektralen Zusammensetzung des Lichts.

4 Methodik

Im Folgenden wird das Untersuchungsdesign beschrieben und erläutert, welche Überlegungen zum gewählten Untersuchungsdesign geführt haben. Die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Stichprobe, die verwendeten Messgeräte und die Konstruktion des Fragebogens werden vorgestellt. Zum Abschluss dieses Kapitels wird auf die Durchführung der Untersuchung eingegangen, auf die Methoden, mit denen Nutzereingriffe identifiziert wurden und auf die statistischen Verfahren, die bei der Datenanalyse angewandt wurden.

4.1 Untersuchungsdesign

Die Ermittlung von Einflussgrößen der subjektiven Bewertung von Tageslicht in Büroräumen ist sowohl in Testraumuntersuchungen als auch in Felduntersuchungen möglich.

In Testräumen können Umgebungsbedingungen kontrolliert werden, hochwertige Messtechnik kann eingesetzt und Messwerte können sehr genau erfasst werden. Die Umgebung ist aber nicht das „natürliche“ Arbeitsumfeld der Probanden, die sich in der Regel nur wenige Stunden in den Testräumen aufhalten. Welche Einflussgrößen im Büroalltag tatsächlich relevant sind, kann in Testräumen nicht uneingeschränkt ermittelt werden. Bei Testraumuntersuchungen können zudem nur wenige Probanden gleichzeitig befragt werden, was die Stichprobengröße begrenzt.

Felduntersuchungen weisen im Vergleich zu Untersuchungen in Testräumen eine größere Validität der Ergebnisse auf, da der reale Alltag mit zahlreichen Einflüssen bereits während der Untersuchung zum Tragen kommt. So können Einflüsse identifiziert werden, die im Alltag relevant sind. Psychosoziale Faktoren wie die Arbeitsatmosphäre und der Einfluss von weiteren Personen, die im selben Raum arbeiten, bleiben im realen Arbeitsplatzumfeld erhalten. Die gleichzeitige Untersuchung mehrerer Räume und die gleichzeitige Befragung vieler Probanden sind möglich. Welche Einflüsse im Untersuchungszeitraum vorliegen, ist jedoch nur begrenzt kontrollierbar, ebenso welche (Licht- oder Raumklima-)Bedingungen zum Zeitpunkt der Befragung herrschen. Physikalische Werte sind schwerer zu erfassen als in Testräumen.

Wegen des großen Vorteils, dass bei Felduntersuchungen alltagsrelevante Einflussfaktoren vieler Nutzer ermittelt werden können, und nicht nur die Zufriedenheit einer kleinen Stichprobe in einer eher künstlichen Testumgebung untersucht wird, wurden die Nachteile in Kauf genommen und eine Felduntersuchung durchgeführt.

Befragungen der Nutzer zum Komfort oder den räumlichen Bedingungen an ihrem üblichen Arbeitsplatz werden als „Post-Occupancy Evaluation“ bezeichnet. Schakib-Ekbatan et al. erläutern die Vorteile einer solchen Felduntersuchung: „Post-Occupancy Evaluation [...] als nutzungsorientierte Bewertung einer Immobilie nach deren Inbetriebnahme durch die mit dem Gebäude vertrauten Personen stellt ein geeignetes systematisches Verfahren dar, um über die Erfahrungen der Nutzer mit räumlich-physikalischen Gegebenheiten des Arbeitsplatzes Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie gut die Passung zwischen Personen und Gebäuden gelungen ist.“ (Schakib-Ekbatan et al., 2012, S. 3)

Der Einfluss architektonischer Parameter wie Fensterflächenanteil, Sonnenschutzsystem und Bürogröße ist Bestandteil der Fragestellung. Die Untersuchung dieser Parameter erforderte die Einbeziehung verschiedener Gebäude, die charakteristische Merkmale aufweisen.

Die Ermittlung der präferierten Beleuchtungsstärke an natürlich belichteten Arbeitsplätzen, die Überprüfung des Blendungskriteriums DGP und die Berücksichtigung von Einflüssen anderer Komfortparameter ist nur möglich, wenn Nutzerbewertungen der Lichtsituation und der fraglichen Raumklimaparameter im Zusammenhang mit physikalischen Messwerten untersucht werden. Daher mussten die relevanten Messwerte für jeden zu untersuchenden Arbeitsplatz

ermittelt werden. Stichprobenartige Messungen an einigen „Referenzarbeitsplätzen“ hätten dem beschriebenen Anspruch nicht genügt. Die Messungen und Befragungen mussten vier Mal im Abstand von drei Monaten durchgeführt werden, um den Einfluss der Jahreszeiten untersuchen zu können. Idealerweise sollten dabei vier Mal dieselben Probanden an denselben Arbeitsplätzen befragt werden, um möglichst viele Parameter konstant zu halten.

Die Messungen sollten nicht nur während der Befragung durchgeführt werden, sondern einen Zeitraum von zwei (Arbeits-)Wochen umfassen, an dessen Ende die Befragung steht. Dieses Vorgehen begrenzt aufgrund der erforderlichen Messtechnik die mögliche Anzahl der Probanden. In jedem Gebäude sollten 15 Räume – idealerweise Zweierbüros – parallel untersucht werden, um eine ausreichende Anzahl Nutzerbewertungen zu erhalten.

Die zweiwöchige Langzeitmessung bietet mehrere Vorteile:

Aus Untersuchungen zum thermischen Komfort ist bekannt, dass mehrtägige Adaptationsprozesse stattfinden, die die Nutzerbewertung der Temperatur beeinflussen. Das kann auch für andere Komfortbereiche nicht ausgeschlossen werden. Bei der Analyse jahreszeitlicher Effekte müssen daher – zumindest für den thermischen Komfort – ausreichend lange Messreihen vorliegen, um die Adaptation der Probanden berücksichtigen zu können.

Ein weiterer Grund, Langzeitmessungen durchzuführen, ergibt sich aus dem Umstand, dass Probanden zur Vermeidung von Verzerrung ihrer Antworten nicht nur zur momentanen Situation sondern auch zu den vergangenen Tagen befragt werden sollten. In einer Felduntersuchung kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Tag der Befragung sich von den vorhergehenden Tagen deutlich unterscheidet. Wenn ein Problem wie Blendung oder (zu) hohe sommerliche Temperaturen am Tag der Befragung nicht auftritt, von den Probanden aber in den Tagen davor wahrgenommen wurde, kann das die Bewertung beeinflussen: Nutzer möchten beispielsweise darauf hinweisen, dass sie ein Blendungsproblem haben, auch wenn gerade keine Blendung vorliegt, und geben deshalb nicht die Bewertung ab, die ihrem momentanen Empfinden entspricht. Der Gefahr einer Verzerrung der Antworten kann man begegnen, indem man Probanden die Möglichkeit gibt, sich erst grundsätzlich zu einem Aspekt zu äußern, und anschließend die momentane Situation zu bewerten. Auch extreme Situationen am Tag der Befragung können durch die Bewertung der vergangenen Tage relativiert werden.

Die Abfrage der Zufriedenheit mit Komfortaspekten während der vergangenen Tage bietet die Möglichkeit, auch diesen Nutzerurteilen Messwerte zuzuordnen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, für diesen Zeitraum Messwerte zu erfassen.

Die Erinnerung an Licht- oder Temperaturverhältnisse, die nicht extrem sind, ist jedoch begrenzt. Daher wurde eine zweiwöchige Messphase festgelegt, die mit der Befragung der Nutzer endet. Die Befragung muss noch während der Messung erfolgen, damit sowohl den Nutzerurteilen der längerfristigen als auch der momentanen Situation Messwerte zugeordnet werden können.

Eine längere Messphase beinhaltet außerdem zwangsläufig Informationen über das Verhalten der Nutzer. Es ist möglich, Nutzereingriffe zu identifizieren und festzustellen, unter welchen Bedingungen Nutzer eingreifen und beispielsweise einen Sonnenschutz betätigen. Da die Tageslichtsituation zum Zeitpunkt der Befragung nicht kontrollierbar ist (z. B. Bedeckungsgrad des Himmels), kann nicht ausgeschlossen werden, dass während der Befragung nur wenige als blendend bewertete Lichtsituationen auftreten. Nutzereingriffe sollten identifiziert und analysiert werden, da sie hier zusätzliche Informationen zur Akzeptanzgrenze der Nutzer liefern können. Diese Informationen könnten nur mit einer Messung und Befragung an einem vorgegebenen Tag nicht gewonnen werden.

Um möglichst viele Gebäude mit einer begrenzten Anzahl an Messgeräten untersuchen zu können, müssen die Messgeräte nach jeder Messperiode in einem Gebäude ab- und in einem anderen Gebäude aufgebaut werden. Bei zweiwöchigen Messungen im Abstand von 3 Monaten (12 Wochen) können so innerhalb eines Jahres vier Gebäude abwechselnd untersucht werden.

Die Datenerhebung bestand somit aus vier unterschiedlichen Teilen:

- Messung der Lichtsituation und verschiedener Raumklimaparameter: zweiwöchige Messung verschiedener physikalischer Größen in 15 ausgewählten Büroräumen zu jeder Jahreszeit, also vier Mal pro Gebäude
- Befragung der Nutzer der berücksichtigten Arbeitsplätze: subjektive Beurteilung der aufgezeichneten physikalischen Größen sowie weiterer Aspekte am Ende jeder Messphase
- Ermittlung des Nutzerverhaltens: Identifizierung von Nutzereingriffen anhand der aufgezeichneten Messdaten
- Erhebung von Gebäude- oder Raumparametern wie Klimatisierung, Sonnenschutzsystem, Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) und der spektralen Zusammensetzung des Tageslichts im Gebäude (Messung eines „circadianen Quotienten“ entsprechend dem Tageslichtquotienten)

Die (unbeabsichtigte) Beeinflussung der Probanden durch den Versuchsleiter, in der Literatur auch als „Versuchsleiterartefakt“ bezeichnet, ist bei der geplanten Untersuchung von untergeordneter Bedeutung. Die Hypothesen beziehen sich ja in der Mehrzahl auf die subjektive Bewertung objektiver Messwerte, die dem Versuchsleiter während der Befragung ebenso wenig bekannt sind wie dem Probanden. Somit handelt es sich – zumindest in Bezug auf Hypothesen zur Bewertung von physikalischen Messwerten – per se um einen sogenannten Doppelblindversuch (Bortz & Döring, 2006, S. 82), bei dem weder die Probanden noch der Versuchsleiter wissen, welche Antwort die Hypothese bestätigt und welche nicht.

4.2 Anforderungen an die Stichprobe

Ein Ziel der Felduntersuchung war, den Einfluss architektonischer Parameter wie Fensterflächenanteil und Sonnen- oder Blendschutzsystem auf die Nutzerbewertung des Tages- und Kunstlichts zu untersuchen. Diese Parameter mussten daher bei der Suche geeigneter Gebäude berücksichtigt werden. Eine möglichst große Anzahl verschiedener Gebäude ist dafür wünschenswert.

In jedem Gebäude sollten fünfzehn Räume gleichzeitig untersucht werden, um Bewertung und Verhalten unterschiedlicher Nutzer unter gleichen Randbedingungen (Architektur, Haustechnik, Arbeitgeber) vergleichen zu können. Um die Anforderungen an die Messtechnik und an die Auswertung nicht zu komplizieren, sollten die Räume nur eine Fensterfassade aufweisen, die an den Arbeitsplätzen Blendung durch Tageslicht verursachen kann.

Dabei sollten möglichst Zwei- oder Mehrpersonenbüros berücksichtigt werden, um mehrere Nutzerbewertungen einer Situation zu erhalten, und um auch bei Ausfall eines Probanden während des Messzeitraums (beispielsweise durch Krankheit) eine Nutzerbewertung der physikalischen Messgrößen zu erhalten und die Daten wie vorgesehen auswerten zu können.

Die Möglichkeit der gleichzeitigen Untersuchung von fünfzehn den Anforderungen der Untersuchung entsprechenden Zwei- oder Mehrpersonenbüros ist nicht in jedem Gebäude gegeben und schränkt die Auswahl ein.

Pro Befragung wurde eine Anzahl von 30 Fragebögen mit entsprechenden Messdatensätzen angestrebt, um trotz zu erwartender Ausfälle wegen Urlaub, Krankheit oder Dienstreisen eine statistisch zuverlässige Datenbasis für jeden Messzeitraum in jedem Gebäude zu erhalten.

Die Teilnahme an der Felduntersuchung erforderte von jedem der betroffenen Probanden insgesamt etwa drei Stunden Arbeitszeit während der vier Messphasen – bei mindestens 30 Probanden pro Gebäude war dieser Aufwand für die beteiligten Unternehmen nicht unerheblich. Auch die Zustimmung von Unternehmen und Betriebsrat zur kontinuierlichen Aufzeichnung von

Messwerten in einem bildgebenden Verfahren, die für die Untersuchung von Blendung durch Tageslicht unverzichtbar ist, ist nicht selbstverständlich.

Für die Felduntersuchung wurden daher primär Unternehmen angefragt, zu denen aus früheren Projekten an der Universität Karlsruhe oder bei einem anderen Arbeitgeber der Autorin bereits Kontakt bestand. Anfragen ohne früheren Kontakt haben nicht zu Zusagen dieser Unternehmen geführt. Bei den gewonnenen Unternehmen handelt es sich daher nicht um eine Zufallsstichprobe.

In den neun Gebäuden, die an der Untersuchung teilgenommen haben, wurden dem Versuchsplan entsprechend Zwei- oder Mehrpersonenbüros gesucht. Bei der Auswahl der Räume anhand der Grundrisse wurde auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Räume geachtet (Geschosse, Himmelsrichtungen, gegebenenfalls Atrium/außenliegend oder Altbau/Neubau). Die Nutzer dieser Räume wurden persönlich angesprochen, über die geplante Untersuchung informiert und – falls keine längeren Abwesenheiten in den geplanten Untersuchungszeiträumen durch Urlaub oder lange Dienstreisen absehbar waren – um ihre Mitarbeit gebeten. Dabei wurde versucht, im Rahmen der Altersstruktur des Unternehmens eine möglichst gleichmäßige Verteilung hinsichtlich Alter und Geschlecht zu erreichen. Auch diese Auswahl entspricht nicht den Anforderungen an eine Zufallsstichprobe.

4.3 Messgeräte

Aus der Fragestellung ergibt sich, dass in den Büroräumen folgende Größen aufgezeichnet werden sollten:

- ortsaufgelöste Leuchtdichteverteilung der Fensterfassade (1 x pro Raum)
- horizontale Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz (2 x pro Raum)
- zylindrische Beleuchtungsstärke im Raum (1 x pro Raum) anhand der vertikalen Beleuchtungsstärke in den vier Raumrichtungen gemäß DIN 5035-6:2006-11
- Lichtfarbe („RGB-Beleuchtungsstärke“, 1 x pro Raum)
- Temperatur (1 x pro Raum)
- relative Luftfeuchtigkeit (1 x pro Raum)
- Schallpegel (1 x pro Raum)
- Betriebszustand der Kunstlichtanlage (an/aus, 1 bis 2 x pro Raum)

Parallel zu den Messungen in den Räumen sollten folgende Außenbedingungen auf dem Dach des Gebäudes aufgezeichnet werden:

- horizontale Beleuchtungsstärke
- Lichtfarbe („RGB-Beleuchtungsstärke“)
- Temperatur
- relative Luftfeuchtigkeit

Es müssen fünfzehn Messtechniksätze vorhanden sein, um alle zu untersuchenden Räume eines Gebäudes gleichzeitig mit Messtechnik ausstatten zu können. Aus dem Versuchsdesign folgt, dass die Messgeräte während der zweiwöchigen Messphasen an den Arbeitsplätzen der Probanden verbleiben mussten, was mit marktüblicher kostenintensiver Messtechnik wie z. B. Leuchtdichtekameras nicht möglich gewesen wäre. Daher wurden am fbta für einige Messgeräte Alternativen aus preiswerten Bauteilen entwickelt, die robust genug sind für den regelmäßigen und zügigen Auf- und Abbau, die einfach zu transportieren sind und auch die übrigen Anforderungen des Versuchsdesigns möglichst gut erfüllen.

Alexis Bikos beschreibt diese Anforderungen folgendermaßen:

„Aufgrund der großen Anzahl an benötigten Messgeräten spielen die Kosten eine entscheidende Rolle.

Darüber hinaus soll die Messtechnik, ohne den Nutzer zu beeinträchtigen, am Arbeitsplatz untergebracht werden können, die Messgeräte sollen also möglichst klein und unauffällig sein.

Ebenfalls von großer Bedeutung ist die Handhabbarkeit der Messinstrumente, das Daten-Handling und die Zuverlässigkeit. Bei der sehr großen Menge der zu sammelnden Daten ist das Zusammenfassen verschiedener Messgrößen in einem Gerät gewünscht, um die Anzahl der Auslesevorgänge zu verringern.

Der Betrieb der Messtechnik ohne externe Stromversorgung ist anzustreben, um Ausfallraten zu minimieren und eine größtmögliche Flexibilität beim Aufstellort zu erreichen.

Da es sich um „orientierende Messungen“ handelt, werden gewisse Einschränkungen bei der Genauigkeit in Kauf genommen.“ (Bikos, 2009, S. 1)

Für orientierende Messungen ist nach DIN 5034-5 bei Beleuchtungsstärkemessgeräten und bei Leuchtdichtemessgeräten eine Gesamtfehlergrenze von 20 % ausreichend.

Die Messung der Leuchtdichteverteilung muss orts aufgelöst erfolgen, um die Ermittlung von Blendungsbewertungsindizes zuzulassen. Das bedeutet, dass mit Leuchtdichtekameras Bilder aufgenommen und gespeichert werden, die zwar die Leuchtdichtewerte enthalten, aber auch als Bilder interpretierbar sind.

Aus Gründen des Datenschutzes musste sichergestellt sein, dass keine Leuchtdichtekamera die Nutzer an ihren Arbeitsplätzen erfasst. Gleichzeitig musste die Fensterfassade möglichst vollständig von der Kamera erfasst werden.

Der typische Messtechnikaufbau in einem Zweierbüro entspricht damit der schematischen Darstellung in Abbildung 2.

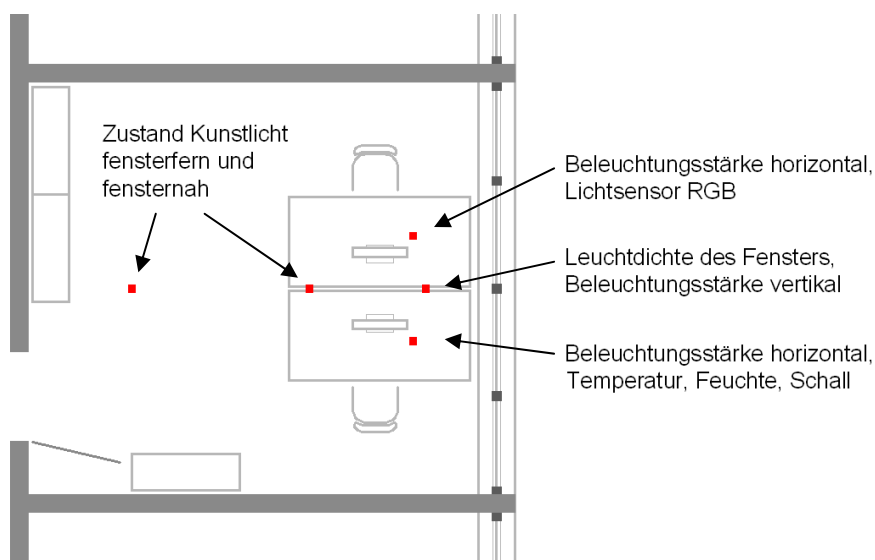


Abbildung 2 Prinzipieller Aufbau der Messtechnik in einem beispielhaften Zweierbüro

Für die Messung der Leuchtdichteverteilung wurde ein im Rahmen des DFG-Projektes „Quanta“ für diese Untersuchung von Arne Abromeit am fbta entwickeltes Kameramodul aus einem digitalen CMOS-Sensor eingesetzt, der über einen ARM- μ Controller gesteuert und ausgelesen wird. Um einen für die Blendungsbewertung ausreichenden Leuchtdichteumfang zu erreichen, werden drei Bilder unterschiedlicher Integrationszeit aufgenommen, die bereits innerhalb des Mikrocontrollers zu einem Leuchtdichtebild im Radiance-Format umgerechnet und auf einer

Speicherkarte (ca. 1 GB Speicherkapazität) gesichert werden (Abromeit & Wagner, 2009). Der begrenzte Speicherplatz erforderte einen Kompromiss zwischen möglichst großer Bildgröße und möglichst kurzem Messintervall. Die Größe der Leuchtdichtebilder wurde auf 320 x 240 Pixel festgelegt, das Messintervall auf vier Minuten. Die Größe der Leuchtdichtebilder schränkt die Auswertung von Leuchtdichte-Peaks ein, wie sie bei seilgeführten Lamellenbehängen auftreten können.

Die Leuchtdichtekamera benötigt eine externe Stromversorgung. Aufgrund eines Fehlers bei der Stromversorgung, der lange unentdeckt blieb, ist der Messbereich auf 10 cd/m² bis ca. 12 000 cd/m² begrenzt (vorgesehen war 10 cd/m² bis 250 000 cd/m²).

Der Umgang mit dieser Einschränkung wird im Abschlussbericht des DFG-Projektes „Quanta“ wie folgt beschrieben: „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 Messgenauigkeit der Beleuchtungsstärke-Sensoren 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.“ (Moosmann et al., 2012, S. 6)

Die Auswertung der Leuchtdichtebilder erfolgte mit Hilfe des Radiance-basierten Bewertungstools „evalglare“, Version 0.9 (Wienold & Christoffersen, 2006). Das Querformat der Leuchtdichtebilder musste dafür zu einem quadratischen Bild ergänzt werden. Das aufgenommene Leuchtdichtebild wurde in die Mitte des neuen quadratischen Bildes gesetzt, das nach oben und unten mit den Leuchtdichtewerten der ersten bzw. letzten Pixelreihe aufgefüllt wurde. Dafür wurde eine von Jan Wienold für diesen Zweck programmierte Prozedur verwendet.

Die im DFG-Projekt „Quanta“ entwickelten Korrekturfaktoren der Daylight Glare Probability für den Einfluss des Alters (DGP_{age}), für Situationen mit geringer Blendungswahrscheinlichkeit ($DGP_{lowlight}$) und für die Qualität des Sichtkontaktes ($DGP_{viewratio}$) wurden berücksichtigt.

Für die Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden Datenlogger der Firma Onset (HOBO U12-011 und HOBO U12-013) verwendet. Der Messbereich für die Raumtemperatur reicht von -20 °C bis 70 °C ($\pm 0,35$ °C). Der Messbereich für die relative Feuchte reicht von 5 % bis 95 % ($\pm 2,5$ %).

Zur Messung der Beleuchtungsstärke, der Lichtfarbe und des Schallpegels wurde Messtechnik eingesetzt, die von Alexis Bikos am fbta entwickelt wurde.

Die Messung der horizontalen und der zylindrischen Beleuchtungsstärke erfolgte mit am fbta kalibrierten und eigens an den Datenlogger angepassten Lichtsensoren mit $V(\lambda)$ -ähnlicher spektraler Empfindlichkeit und Cosinus-ähnlicher räumlicher Charakteristik. Zur Aufzeichnung der Daten wurden Datenlogger der Firma Onset verwendet (HOBO U12-006 und HOBO U12-013). Der Messbereich der horizontalen Beleuchtungsstärke reicht bis 6 000 lx (Messgenauigkeit $\pm 2,5$ % zwischen 300 lx und 5 000 lx). Der Messbereich der vertikalen Beleuchtungsstärke reicht bis 12 000 lx (Messgenauigkeit ± 5 % zwischen 500 lx und 12 000 lx).

Für die RGB-Sensoren wurden Photodioden verwendet, deren spektrale Empfindlichkeitskurven jeweils ein Maximum im roten (660 nm), grünen (540 nm) bzw. blauen (460 nm) Bereich aufweisen, für den Schallpegelsensor ein Kondensatormikrofon. Diese Sensoren dienen lediglich orientierenden Messungen.

Auch diese Daten wurden auf Datenlogger der Firma Onset gespeichert (HOBO U12-006 und HOBO U12-013). Die Schallpegelmessung benötigt – wie die Leuchtdichtekameras – eine externe Stromversorgung.

Für die Ermittlung des Betriebszustands der Raumbelichtung wurden Onset-Datenlogger der Serie H8 (H08-004-02) mit integriertem Lichtsensor verwendet. Der Messbereich reicht von 2 lm/ft² bis 600 lm/ft² (ca. 20 lx bis 6400 lx, Messgenauigkeit ±20 %). Die Messgenauigkeit spielt bei diesem Sensor eine untergeordnete Rolle, da nur die Betriebszustände „an“ und „aus“ zu unterscheiden waren.

Während jedes Messzeitraums wurden Parameter des Außenklimas auf dem Dach des jeweiligen Gebäudes oder eines Nachbargebäudes gemessen und aufgezeichnet. Dafür wurde folgende Messtechnik verwendet:

Zur Erfassung der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchte wurde ein Datenlogger der Firma Onset (HOBO U23 Pro v2) in wetterfestem Gehäuse eingesetzt. Der Messbereich für die Temperatur reicht von -40 °C bis 70 °C (± 0,21 °C). Der Messbereich für die relative Feuchte reicht von 0 % bis 100 % (± 2,5 %).

Zur Messung der Außenbeleuchtungsstärke und der Lichtfarbe wurde Messtechnik eingesetzt, die der im Gebäude verwendeten entspricht und wie diese von Alexis Bikos entwickelt wurde. Als Wetterschutz für die Lichtmesstechnik wurde eine transparente Kuppel aus PMMA verwendet.

Alle Messwerte wurden während der zweiwöchigen Messphasen kontinuierlich mit einem Messintervall von vier Minuten aufgezeichnet. Bei den Leuchtdichtebildern wurde die kontinuierliche Messdatenerfassung wegen des begrenzten Speicherplatzes auf den Zeitraum zwischen 6:00 Uhr morgens und 19:00 Uhr abends und auf die Wochentage beschränkt.

Die Messung des Lichtspektrums erfolgte mit zwei Spektroradiometern der Firma Jeti (Specbos 1201). Der Messbereich reicht von 380 nm bis 780 nm (± 2 %). Sie wurde für jeden Raum einmal durchgeführt. Der in DIN V 5031-100 definierte biologische Wirkungsfaktor $a_{\text{biol},v}$ für die Aktivierung mit Licht entspricht dem vom verwendeten Messgerät ausgewiesenen circadianen Wirkungsfaktor a_{cv} , da das Wirkungsspektrum $s_{\text{ms}}(\lambda) c(\lambda)$ entspricht und $s_{\text{ms}}(\lambda)$ vorläufig als Wirkungsspektrum der Aktivierung mit Licht $s_{\text{ak}}(\lambda)$ zu verwenden ist. Der circadiane Wirkungsfaktor a_{cv} (Gall, 2002) wird bei jeder Messung ermittelt und ausgewiesen.

Durch gleichzeitige Messung des Lichtspektrums innen und auf dem Dach des Gebäudes kann ein „circadianer Quotient“ ermittelt werden. Dieser Wert zeigt, in welchem Maße ein System (Verglasung, Sonnen-/Blendschutz, Oberflächenmaterialien und Reflexionsgrade) die circadian wirksamen Wellenlängen in den Raum gelangen lässt. So können Räume und Systeme mit hohem und niedrigem „circadianem Quotienten“ verglichen werden.

4.4 Fragebogen

Der Fragebogen ist das Messinstrument zur Erfassung der Nutzerbewertungen. Er muss alle für die Untersuchung relevanten Fragen enthalten, jedoch möglichst keine überflüssigen, um die Probanden nicht unnötig zu beanspruchen. Die Fragen müssen von den Untersuchungsteilnehmern möglichst einfach zu verstehen sein und eindeutig verstanden werden.

Grundlage für den in dieser Untersuchung verwendeten Fragebogen ist ein Fragebogen, den Elke Gossauer in ihrer Feldstudie zur Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden von 2004 bis 2006 eingesetzt hat (Gossauer, 2008). Dieser basiert auf einem am Center for the Built Environment der University of California in Berkeley entwickelten und validierten Fragenkatalog (Zagreus, Huizenga, Arens & Lehrer, 2004), der am fbta bereits für das Projekt „enerkenn“ übersetzt und

angepasst wurde (Wambsganß, Fröhlich, Klingele & Wagner, 2004). Er enthält Fragen zu den Lichtverhältnissen und der künstlichen Beleuchtung, zu den Temperaturverhältnissen, der Luftqualität, Möblierung und Gestaltung, Akustik und zu gesundheitlichen Beschwerden und der Arbeitszufriedenheit, die sich im Projekt enerken und in der Felduntersuchung von Elke Gossauer bewährt haben.

Dieser Fragebogen wurde für die vorliegende Untersuchung angepasst. Er wurde nochmals überarbeitet, um die Verständlichkeit weiter zu verbessern, und wurde mit detaillierten Fragen zum visuellen Komfort ergänzt. Bei der Überarbeitung des Fragebogens und der Formulierung der Fragen haben Herr Prof. Dr. Christoph Schierz vom Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau, Herr Prof. Dr. Bernhard Schäfers und Frau Alexa Kunz BA vom Institut für Soziologie, Medien- und Kulturwissenschaft der Universität Karlsruhe (TH), Frau Dipl.-Psych. Gisela Vogt vom Fraunhofer ISE sowie Herr Prof. Dr. Jürgen Hoffmeyer-Zlotnik und Frau Dr. Natalja Menold vom Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften GESIS beratend unterstützt.

Die Fragen sind überwiegend mit einer fünfstufigen bipolaren Antwortskala verbunden. Grafische Ratingskalen mit einer Linie ohne Einteilung, deren Enden mit den beiden Polen der Skala beschriftet sind, ermöglichen zwar den Probanden durch das Ankreuzen einer beliebigen Stelle auf dieser Linie, sehr differenziert zu antworten. Der Aufwand der Auswertung ist jedoch erheblich, weshalb Skalen mit Stufen gewählt wurden.

Bei Skalenstufen stellt sich die Frage, wie viele Stufen gewählt werden und ob eine gerade oder ungerade Anzahl Stufen geeignet ist. Bortz und Döring erläutern, dass „eine zu feine Differenzierung bei einer Ratingskala das Urteilsvermögen der Probanden überfordert“ (Bortz & Döring, 2006, S. 181). Man sollte „dem Urteilenden die Wahl des Skalenformats überlassen“ (ebd., S. 181), und bei Felduntersuchungen würden von den Probanden häufig Fünferskalen präferiert. Eine gerade Anzahl Stufen erzwingt die Entscheidung für einen der beiden Pole und umgeht damit das Problem der „zentralen Tendenz“, das vor allem auftritt, wenn Probanden mit dem zu beurteilenden Objekt nicht vertraut und in ihrer Antwort unsicher sind. In dieser Felduntersuchung ist nicht davon auszugehen, dass die Probanden unsicher sind hinsichtlich ihrer Zufriedenheit mit den Lichtverhältnissen und den Bedingungen an ihrem Arbeitsplatz. Daher wurde eine ungerade Anzahl Skalenstufen gewählt, die ein neutrales Urteil zulässt, wenn beispielsweise ein Nutzer seinen Arbeitsplatz als weder hell noch dunkel empfindet.

Zur Erfassung des Befindens der Probanden wurden das „Self Assessment Manekin“ SAM verwendet (Morris, 1995).

Bei Fragen zur Blendungsbewertung wurde weder die häufig verwendete Söllner-Skala („keine Blendung“ ... „Blendung unerträglich“) noch die GSV-Skala (Glare Sensation Vote, „störende Blendung gerade wahrnehmbar“ ... „störende Blendung gerade unerträglich“) eingesetzt. Um die Vorhersagequalität des Blendungsindex DGP im Feld mit der in den Testräumen vergleichen zu können, wurden die Fragen zur Blendung und der Blendempfindlichkeit dem Fragebogen entnommen, der am Fraunhofer ISE im Projekt ECCO-build zur Entwicklung des DGP-Index verwendet wurde (Blendung „nicht wahrnehmbar“ ... „nicht tolerierbar“) (Wienold, 2009).

Die berufliche Stellung der Probanden wurde mit Hilfe der vom Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften GESIS, dem Statistischen Bundesamt und anderen Einrichtungen erstellten „Demographischen Standards“ von 2004 erfragt (Destatis).

Die Verständlichkeit des Fragebogens wurde in einem Pretest in einem der untersuchten Gebäude getestet, in einem Bereich, in dem die eigentliche Untersuchung nicht stattfand. Die Pretest-Probanden wurden aufgefordert mitzuteilen, wenn Fragen schwer verständlich oder missverständlich waren. Die Anmerkungen wurden berücksichtigt, einige Fragen wurden umformuliert oder sind daraufhin entfallen.

stempeln viel Arbeit, die notwendige Änderung der Zeitstempel ist fehleranfällig. Daher wurde versucht, Messzeiträume zu finden, die nicht von einer Zeitumstellung betroffen sind.

Auch Wochenfeiertage und die Schulferien wurden für die Messzeiträume möglichst vermieden. Dabei war von Vorteil, dass sich die Gebäude in unterschiedlichen Bundesländern befinden mit teilweise unterschiedlichen Feiertagsregelungen und Schulferienzeiten. Ein „Ausparen“ der Sommerferien war nicht sinnvoll möglich und auch nicht erforderlich, da die Belegungsdichte in den untersuchten Gebäuden von den Sommerferien weit weniger beeinflusst war als beispielsweise von Weihnachtsferien oder Pfingstferien mit relativ vielen Wochenfeiertagen, die auch von Personen ohne schulpflichtige Kinder genutzt werden.

Alle Messgeräte mussten für jeden Messzeitraum gestartet werden und nach Abschluss der zweiwöchigen Messung ausgelesen werden. Die eingesetzten Datenlogger konnten bereits vor der Messung gestartet werden. Die Leuchtdichtekameras mussten während des Aufbaus über einen Laptop gestartet werden, da jede Unterbrechung der externen Stromversorgung die Messung abbricht.



Abbildung 4 Studentische Hilfskraft mit einem der Messtechnik-Koffer und Leiter (links) und beim Anbringen eines Datenloggers an der Deckenbeleuchtung (rechts)

Zu Beginn jedes Messzeitraums mussten die Messgeräte (insg. ca. 60 kg) an den zu untersuchenden Arbeitsplätzen aufgebaut werden (Abbildung 4). Dieser Aufbau erfolgte in der Regel montags. Die Probanden wurden nach Möglichkeit einige Tage zuvor über den anstehenden Aufbau und den Messzeitraum informiert.

Der Aufbau begann je nach Dauer der Anreise zum Gebäude in der Regel zwischen 8:00 und 9:00 Uhr, in einem Gebäude gegen 10:00 Uhr, und dauerte ca. 6 Stunden. Der Aufbau erfolgte grundsätzlich durch zwei Personen, die die Messgeräte gemeinsam aufbauten, um die Störung der Probanden möglichst kurz zu halten.

In jedem der fünfzehn ausgewählten Räume wurde vor dem Aufstellen der Messgeräte geklärt, ob von der Anwesenheit der Nutzer während der nächsten zwei Wochen (Messzeitraum) auszugehen ist.

Alle Messgeräte wurden mit doppelseitig klebenden Montageklebestreifen fixiert, die am Ende der zweiwöchigen Messphase rückstandslos entfernt werden konnten.

Die Datenlogger zur Erfassung des Betriebszustands der Beleuchtung wurden möglichst nah am Leuchtmittel befestigt, damit ein großer Anteil des Erfassungsbereichs der Sensoren vom jeweiligen Leuchtmittel eingenommen wird, um den Einfluss des Tageslichts und anderer Leuchtmittel möglichst gering zu halten (siehe Abbildung 5 links).

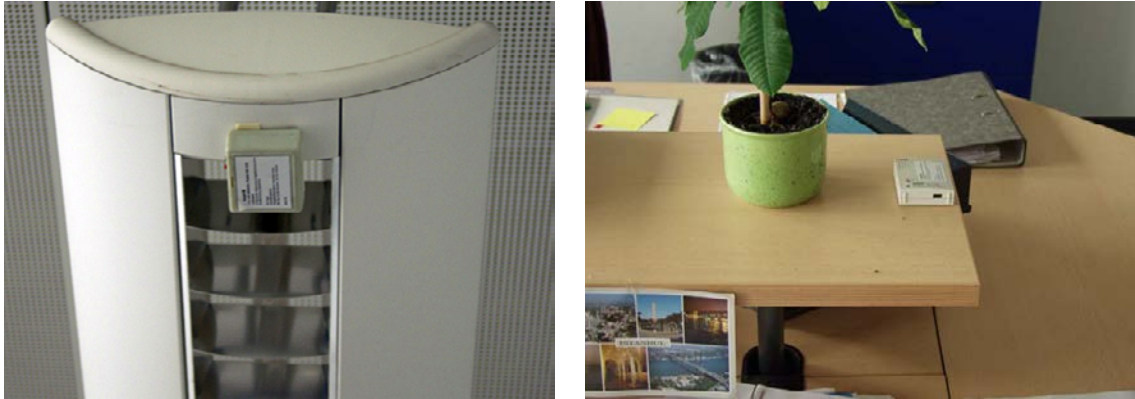


Abbildung 5 An der Deckenleuchte angebrachter Datenlogger zur Erfassung des Betriebszustands der Deckenbeleuchtung (links) und Datenlogger zur Messung von Temperatur und relativer Feuchte (rechts)

Die Datenlogger zur Messung von Temperatur und Feuchte wurden möglichst fensterfern befestigt, um direkte Besonnung zu vermeiden, wie Abbildung 5 (rechts) zeigt.

Bei den Datenloggern, bei denen Temperatur- und Feuchtemessung mit der Beleuchtungsstärke- und Schallmessung kombiniert sind, musste gleichzeitig die Stromversorgung des Schallsensors sichergestellt sein. Das führte für diese Datenlogger häufig zu einer Position am fensternahen Arbeitsplatz. Die Mehrfachsteckdose, welche die Stromversorgung der Leuchtdichtekamera sicherstellte, konnte so auch für den Schallsensor genutzt werden. Es standen fünf zusätzliche Datenlogger ausschließlich für Temperatur und Feuchte zur Verfügung, die ergänzend zu den mit Beleuchtungsstärke und Schall kombinierten Datenloggern in Räumen verwendet wurden, wo eine Besonnung des vierfach-Loggers nicht ausgeschlossen werden konnte.

Für die Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke musste auch auf vollen Schreibtischen ein Platz gefunden werden, der die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz möglichst gut repräsentieren kann, und an dem der Datenlogger den Probanden nicht bei der Arbeit stört (Abbildung 6 und Abbildung 8).

Die Leuchtdichtekameras mussten aus Gründen des Datenschutzes fensternah aufgestellt werden (Abbildung 7), damit die Probanden an ihrem Arbeitsplatz nicht von der Messung erfasst wurden. Gleichzeitig müssen die Fensterflächen möglichst vollständig erfasst werden.



Abbildung 6 Studentische Hilfskraft beim Anbringen des Datenloggers für horizontale Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe.



Abbildung 7 Aufbau der Leuchtdichtekamera mit Luftpolsterfolie zum Schutz der Linse beim Auf- und Abbau sowie beim Transport (links) und Leuchtdichtekamera mit Stromversorgung nach erfolgtem Aufbau und Starten der Messung (rechts)



Abbildung 8 Messaufbau in einem der untersuchten Räume mit Leuchtdichtkamera in Fensternähe und Datenloggern in der Nähe der Monitore der beiden Arbeitsplätze

Am Ende jedes zweiwöchigen Messzeitraums erfolgten die Befragung der Nutzer und der Abbau aller Messgeräte. Der Abbau fand in der Regel freitags statt, nachdem die Nutzer fünf Arbeitstage in Folge an ihrem Arbeitsplatz verbracht hatten und die Unterbrechung durch das Wochenende möglichst lange zurück lag.

Bei Bedarf wurde bereits beim Aufbau der Messgeräte einzelnen Probanden ein Fragebogen gegeben, wenn z. B. am Abbautag eine Dienstreise vorgesehen war. Die Probanden wurden in diesem Fall gebeten, den Fragebogen möglichst gegen Ende der Messperiode auszufüllen.

Der Abbau begann mit dem Verteilen der Fragebögen zwischen 8:00 und 9:00 Uhr, in einem Gebäude gegen 10:00 Uhr. Dabei wurde mit den Probanden geklärt, wann sie an diesem Tag Zeit für das Ausfüllen finden würden und wann der Abbau erfolgen könnte.

Das Einsammeln der ausgefüllten Fragebögen und der Abbau der Messtechnik erfolgten raumweise ab ca. 11:00 Uhr, um den Probanden ausreichend Zeit für das Ausfüllen der Fragebögen zu geben. Der Abbau der Messgeräte konnte erst erfolgen, nachdem alle Fragebögen eines Raumes ausgefüllt waren, da die Messwerte zum Zeitpunkt der Nutzerbewertungen für die Auswertung der Fragebögen benötigt wurden.

Vor dem Abbau der Messgeräte wurde in jedem Raum die horizontale Beleuchtungsstärke an den beiden Datenloggern und an den untersuchten Arbeitsplätzen gemessen. Mit dem Verhältnis der Messwerte an den Arbeitsplätzen zu den Messwerten an den Datenloggern stehen für jeden Arbeitsplatz zwei „Korrekturfaktoren“ zur Verfügung, mittels derer aus den aufgezeichneten Messwerten der Datenlogger entsprechende Werte für die Arbeitsplätze abgeleitet werden können. Für jeden Messzeitpunkt, an dem beide Datenlogger plausible Messwerte geliefert haben, liegen daher pro Arbeitsplatz zwei abgeleitete Beleuchtungsstärkewerte vor. Diese beiden abgeleiteten Beleuchtungsstärkewerte eines Arbeitsplatzes wurden jeweils miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. In der Regel wurde für die weitere Analyse der Wert verwendet, der aus dem Korrekturfaktor abgeleitet wurde, der näher bei 1 lag.

Die Datenerhebung war insgesamt sehr erfolgreich und entspricht dem geplanten Umfang, Es liegen 539 Messdatensätze und ca. 900 000 Leuchtdichtebilder vor. Messausfälle beschränken sich auf einzelne Sensoren, die (beispielsweise durch Unterbrechung der Stromversorgung während des Messzeitraums) an einzelnen Tagen keine Daten aufzeichnen konnten.

4.5.1 Messung des Lichtspektrums und des Tageslichtquotienten

Die Messung des Lichtspektrums konnte in allen neun Gebäuden durchgeführt werden. Aus den Ergebnissen kann auch der Tageslichtquotient bestimmt werden.

Die gleichzeitige Messung des Lichtspektrums am Arbeitsplatz und außen muss bei möglichst gleichmäßig bedecktem Himmel durchgeführt werden. Aufgrund der Arbeitsbelastung im Zeitraum Oktober 2007 bis Oktober 2009, in dem 92 % der eigentlichen Felduntersuchungen durchgeführt wurden, war es oft nicht möglich, kurzfristig auf einen geeigneten Bedeckungsgrad des Himmels zu reagieren. Die Messungen haben daher zwischen März 2009 und Mai 2010 stattgefunden.

Einige der Räume wurden zwischen dem Abschluss der Felduntersuchungen 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.



Abbildung 9 Messung des Lichtspektrums auf dem Dach eines Gebäudes

Trotz großer Anstrengungen entsprachen die Randbedingungen der Messung nicht immer den Vorgaben der DIN 5034-5:2010-11. Eine Messung der Himmelsleuchtdichte zur Überprüfung, ob die Bedeckung dem „bedeckten Himmel“ nach DIN 5034-2:1985-02 entspricht, wurde nicht durchgeführt. Die Messergebnisse können daher nur als orientierende Messungen betrachtet werden.

Die Messungen des Lichtspektrums erfolgten horizontal, sie wurden zeitgleich am Arbeitsplatz und auf dem Dach des jeweiligen Gebäudes durchgeführt mit zwei baugleichen Spektroradiometern mit Beleuchtungsstärke-Aufsatz (Streuscheibe).

Während der Messung auf dem Dach musste das Wetter beobachtet werden (Abbildung 9). Bei zu geringem Bedeckungsgrad des Himmels wurde die Messung unterbrochen, bei Regen musste die Messtechnik geschützt werden und die Messung ebenfalls unterbrochen werden.



Abbildung 10 Messung des Lichtspektrums am Arbeitsplatz (links; im Monitor des Laptops ist die spektrale Verteilung des Lichts zu erkennen) und gleichzeitig außen auf dem Dach desselben Gebäudes oder eines Gebäudes in unmittelbarer Nachbarschaft (rechts). Das Foto zeigt, dass der Aufbau bei noch nicht völlig bedecktem Himmel erfolgte. Die Messungen wurden bei größerem Bedeckungsgrad durchgeführt.

Die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtungsstärke auf dem Dach wurde im Minutentakt gemessen. Zwischen den beiden Laptops, über die die Messgeräte bedient wurden, wurde zu Beginn eines jeden Messtags ein Zeitabgleich durchgeführt. Die Messungen an den Arbeitsplätzen wurden wie die Messungen auf dem Dach jeweils zu einer vollen Minute gestartet (Abbildung 10). Die Messungen konnten einander dann anhand des Zeitstempels zugeordnet werden. Die Messzeit war im Gebäude aufgrund der geringeren Beleuchtungsstärke teilweise deutlich länger als bei den Messungen außen. Diese Ungenauigkeit wurde in Kauf genommen.

4.6 Identifizierung von Nutzereingriffen

Wie bereits bei der Fragestellung und im Versuchsdesign dargestellt, sollten Nutzereingriffe als indirektes Urteil berücksichtigt werden.

Eine Nutzerbewertung der Blendung, die einem konkreten Messwert zugeordnet werden kann, liegt für jeden Fragebogen nur einmal vor. Bei insgesamt 977 Fragebögen wurde nur in 118 Fällen (12,3 %) störende oder nicht tolerierbare Blendung angegeben.

Neben dem direkten Nutzerurteil der Fragebögen lässt die Bedienung des Sonnen- oder Blendschutzes durch die Nutzer Rückschlüsse auf das Blendungsempfinden zu. Jeder Nutzereingriff ist ein indirektes Nutzerurteil, da man davon ausgehen kann, dass eine Änderung der Position des Sonnenschutzes immer dann vorgenommen wurde, wenn die Situation vor der Änderung als unangenehm erlebt wurde.

Während beispielsweise beim thermischen Komfort die während der üblichen Bürozeiten gemessene Innenraumtemperatur herangezogen werden kann, um diese der Bewertung des thermischen Komforts gegenüberzustellen, ist diese Herangehensweise bei Lichtmessungen nicht möglich.

Die Anwesenheit der Nutzer konnte in diesem Feldversuch nicht erfasst werden. Daher liegen keine Informationen vor, ob eine gemessene Lichtsituation von einem Nutzer beobachtet und toleriert wurde oder ob gerade kein Nutzer anwesend war. Gerade die lichttechnisch relevanten Größen Beleuchtungsstärke und Fensterleuchtdichte schwanken aber – insbesondere an wechselhaften Tagen – erheblich, zum Teil um eine Größenordnung.

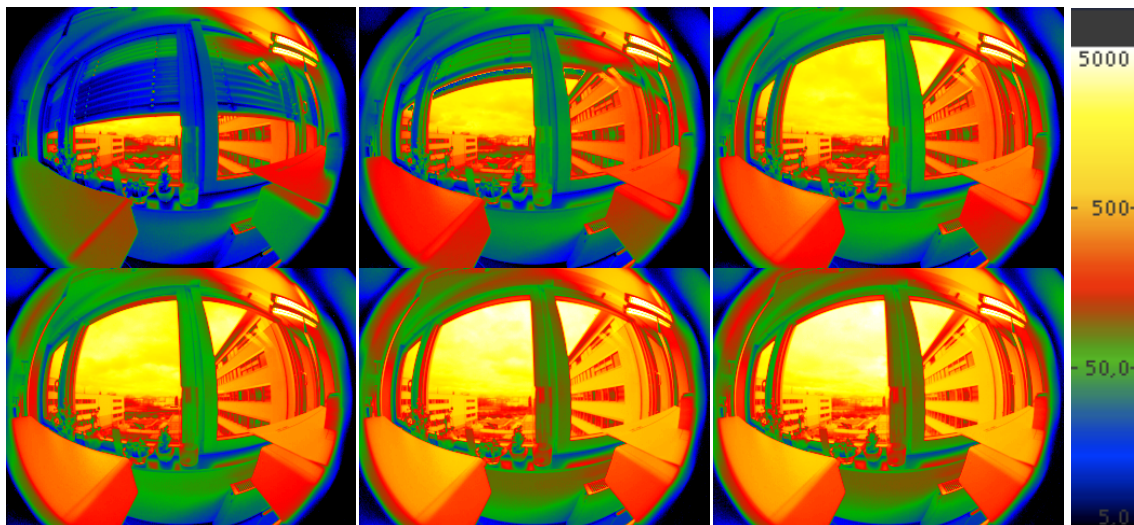


Abbildung 11 Folge von Leuchtdichtebildern, in denen ein Nutzereingriff (Öffnen des Sonnenschutzes) zu sehen ist (elcam-04, 21.02.2008, 12:48 bis 13:08)

Nur die Nutzereingriffe können Auskunft geben, welche Lichtsituationen während der Messperiode als unangenehm (vor dem Eingriff) und welche als „so komfortabel wie möglich“ (nach dem Eingriff) empfunden wurden. Da die Nutzereingriffe (Veränderung von Sonnen- oder Blendschutz, Ein- und Ausschalten des Kunstlichts) nicht zentral erfasst wurden, mussten die Nutzereingriffe aus den Messwerten bzw. Leuchtdichtebildern abgeleitet werden (Abbildung 11).

4.6.1 Automatisierte Bildauswertung

Insgesamt liegen 909048 Leuchtdichtebilder aus 531 Messreihen vor. Bei dieser großen Anzahl ist das visuelle Überprüfen aller Bilder sehr zeitaufwändig und wurde daher zunächst ausgeschlossen. Die Positionen von Sonnen- und Blendschutz sollten mittels automatisierter Bilderkennung bestimmt werden. Veränderungen der Positionen könnten dann computergestützt ermittelt und visuell überprüft werden. Die Bestimmung der Positionen von Sonnen- und Blendschutz sollte darüber hinaus ermöglichen, auch kleinere Veränderungen zu identifizieren, die bei der – ebenfalls denkbaren – Suche nach Nutzereingriffen anhand von Leuchtdichte- oder Beleuchtungsstärke-Differenzen nicht gefunden werden könnten.

Mit Unterstützung von Wolfgang Schotte vom Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI) des KIT entwickelte eine studentische Hilfskraft eine Software zur automatisierten Bestimmung der Position des Sonnenschutzes in jedem Leuchtdichtebild. Dafür wurden Methoden der freien Programmbibliothek OpenCV genutzt, die Algorithmen für Bildverarbeitung und maschinelles Sehen („Computer Vision“) bereitstellt (Schotte, 2011).

Die Bestimmung der Position von Sonnen- oder Blendschutz aus den Rohbildern der Kameras erfolgte in drei Schritten, die Wolfgang Schotte folgendermaßen beschreibt:

Im ersten Schritt fand eine Kalibrierung statt, in der die Kamera- bzw. Objektivparameter bestimmt werden. Die Leuchtdichtebilder wurden mit einem Fischaugenobjektiv aufgenommen, welches einen Gegenstandsbereich von fast idealen 180° abbildet. Die dadurch entstehenden Asymmetrien und Verzerrung müssen aus den Bildern heraus gerechnet werden (Abbildung 12), bevor Methoden der Computer Vision angewandt werden können. Die Berechnung dieser Parameter musste einmal durchgeführt werden und dann auf jedes auszuwertende Bild angewandt werden.



Abbildung 12 Original-Leuchtdichtebild (elcam-07, 07.07.2008, 13:04 Uhr) und Bild nach erfolgter Teilverzerrung

Im zweiten Schritt sollte der Fensterrahmen und damit die vorhandene Fensterfläche automatisiert identifiziert werden, um die Merkmalsextraktion, das heißt das Finden des Sonnenschutzes, auf dieses Feld einzuschränken. Bei Leuchtdichtebildern mit (teilweise) geschlossenem Sonnenschutz wäre die erkannte Fensterfläche kleiner als die tatsächliche Fensterfläche, alle folgenden Vergleiche mit dieser wären fehlerhaft. Die Erkennung der Fensterflächen wäre folglich nur über Sequenzen von Bildern möglich, die mindestens ein Bild mit vollständig sichtbarer Fensterfläche enthalten. Diese Voraussetzung ist nicht in allen Messreihen gegeben. Die

Fensterflächen mussten daher für jede der 531 Messreihen vor der automatischen Verarbeitung manuell festgelegt werden.

Im dritten Schritt folgte die Erkennung der Position des Sonnen- oder Blendschutzes innerhalb der festgelegten Fensterfläche. Die genutzten Jalousien, Markisen, Vertikallamellen, Screens und Vorhänge decken die Fensterfläche horizontal oder vertikal verlaufend ab, zudem verläuft die untere oder seitliche Begrenzung mit einer geraden Kante. Wurde die Position der abschließenden Kante des Sonnen- oder Blendschutzes auf Basis dieser Merkmale im Bild erkannt, so ist die relative Stellung des Sonnenschutzes einfach zu berechnen.

Für die automatisierte Detektion von Kanten bietet die Programmbibliothek OpenCV eine Implementierung der sogenannten Hough-Transformation. Diese wird genutzt, um geometrische Strukturen wie Geraden oder Linien in Bildern zu detektieren.

Im Fall einer horizontal verlaufenden Sonnenschutzkante wurden diagonale Linien mit einer Abweichung der Steigung von mehr als 15° zur Horizontalen und vertikale Linien entfernt. Außerdem wurden alle Linien entfernt, die im Bild weniger als 15 Pixel Länge zeigten, um kleine Störungen und Artefakte auszuschließen. Analog erfolgte bei vertikalem Verlauf der Sonnenschutzkante das Entfernen der horizontalen Linien.

Zur visuellen Kontrolle können die verbliebenen Hough-Linien in das teilentzerrte Bild eingefügt werden. Die Hough-Linien sind dabei rot dargestellt (Abbildung 13). Der als Fensterfläche eingegebene Bereich (im Bild nicht sichtbar) entspricht 100 %, anhand der Position der niedrigsten gefundenen Linie wird der prozentuale Anteil der Verschattung in der Fensterfläche berechnet (Schotte, 2011).

Der Öffnungsgrad eines Lamellenbehangs, der von der Neigung der Lamellen abhängt, kann mit der implementierten Kantendetektion nicht ermittelt werden. Der Abstand zwischen einzelnen „Lamellenlinien“ wird nicht erfasst.



Abbildung 13 Entzerrtes Bild mit rot dargestellten detektierten Kanten im zuvor manuell festgelegten Bereich des Fensters (Ergebnis der automatisierten Bildauswertung: Sonnenschutz 96 % geschlossen)

Bei der Überprüfung der automatisiert gewonnenen Sonnenschutzpositionen wurden zahlreiche Fehldetektionen festgestellt. Die automatisierte Detektion des Sonnenschutzes wurde dadurch erschwert, dass auf vielen Leuchtdichtebildern zahlreiche Linien abgebildet sind, die von der Kantendetektion gefunden werden, aber nicht im Zusammenhang mit dem Sonnenschutz stehen. Dies sind vor allem Pflanzen und Büromobiliar, welches sich vor dem Fenster befindet, aber auch Absturzsicherungen vor Fenstern, Gebäudekanten, Fensterbänder der umgebenden Bebauung oder ein Baugerüst vor dem Fenster. Insbesondere wenn diese über kontrastreiche Kanten in der Horizontalen oder Vertikalen verfügen, können sie das Ergebnis stark verfälschen. Eine weitere Fehlerquelle ist im Fehlen von Linien bei vollständig geschlossenem Sonnenschutz begründet und in der flächigen Struktur von Blendschutz-Textilien, die häufig nicht detektiert wurden.

Die folgenden Leuchtdichtebilder Abbildung 14 bis Abbildung 18 zeigen repräsentativ einige Ursachen für falsche Ergebnisse bei der automatisierten Bilderkennung.



Abbildung 14 Fensterbänder eines gegenüberliegenden Gebäudes oder Gebäudeteils werden als Linie erkannt und als Sonnenschutz fehlinterpretiert. Ergebnis der automatisierten Bildauswertung: Sonnenschutz 80 % geschlossen (elcam-05, 14.04.2008, 16:16 Uhr)



Abbildung 15 Reflexionen in der Fensterscheibe werden als Linie erkannt und als Sonnenschutz fehlinterpretiert. Ergebnis der automatisierten Bildauswertung: Sonnenschutz 69 % geschlossen (elcam-09, 17.12.2008, 08:32 Uhr)



Abbildung 16 Pflanzen vor den Fenstern unterbrechen die Linien des Sonnenschutzes im Bild, die Linien werden nicht detektiert. Ergebnis der automatisierten Bildauswertung: Sonnenschutz 0 % geschlossen (elcam-13, 10.10.2007, 13:40 Uhr)



Abbildung 17 Komplett geschlossene Lamellenbehänge bilden im Leuchtdichtebild eine relativ gleichmäßige Fläche ohne kontraststarke Kanten, die Linien werden nicht detektiert. Ergebnis der automatisierten Bildauswertung: Sonnenschutz 0 % geschlossen (elcam-10, 10.07.2008, 15:52 Uhr)

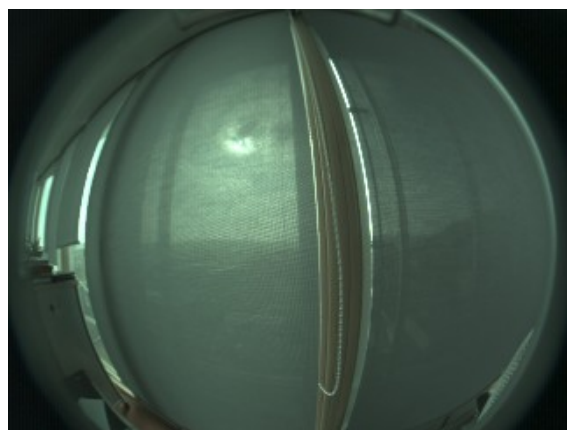


Abbildung 18 Komplett geschlossene textile Blendschutzrollos bilden im Leuchtdichtebild ebenfalls eine gleichmäßige Fläche ohne Linien, der Blendschutz wird nicht detektiert. Ergebnis der automatisierten Bildauswertung: Blendschutz 0 % geschlossen (elcam-11, 10.10.2008, 13:16 Uhr)

Wegen der Fehler der automatisierten Auswertung war eine visuelle Überprüfung der Leuchtdichtebilder erforderlich. Die mit Hilfe der automatisierten Auswertung beabsichtigte Zeiterparnis und die größere Genauigkeit bei der Auswertung der Bilder konnten nicht realisiert

werden. Die Ergebnisse der automatisierten Auswertung konnten lediglich als Hinweis für die visuelle Überprüfung verwendet werden.

In den neun Gebäuden konnten bei der visuellen Überprüfung insgesamt 4081 Nutzereingriffe identifiziert werden. Der Vergleich mit dem Ergebnis der automatisierten Bildauswertung in Tabelle 1 zeigt die große Anzahl Fehldetektionen und die Notwendigkeit der aufwändigen visuellen Kontrolle.

	Anzahl Fälle	Anteil bezogen auf 4081 Nutzereingriffe
Korrekt identifizierte Nutzereingriffe	2481	61 %
Falsch identifizierte Nutzereingriffe	274546	6727 %
Nicht identifizierte Nutzereingriffe	1598	39 %

Tabelle 1 Ergebnis der automatisierten Bildauswertung im Vergleich zum Ergebnis der visuellen Überprüfung

4.6.2 Nutzereingriffe Kunstlicht

Wie die Nutzereingriffe beim Sonnen- und Blendschutzsystem kann auch das Ein- und Ausschalten des Kunstlichts als indirektes Nutzerurteil interpretiert werden: Man kann davon ausgehen, dass das Kunstlicht eingeschaltet wird, wenn die Situation vor dem Einschalten als zu dunkel empfunden wurde.

Da der Zustand des Kunstlichts nicht zentral erfasst wurde, müssen diese Nutzereingriffe aus Messwerten abgeleitet werden.

Die Messung der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz kann hierfür keinen Anhaltspunkt bieten, da sie von der Außenbeleuchtungsstärke und dem Zustand des Sonnen- und Blendschutzes beeinflusst wird. Messfehler wegen Gegenständen wie Ordner u. ä., die von den Nutzern in Sensor-Nähe abgestellt wurden, können nicht identifiziert werden.

In sieben der neun untersuchten Gebäude wurde daher auch an der Grundbeleuchtung ein Beleuchtungsstärkesensor angebracht wie im Abschnitt „4.5 Untersuchungsdurchführung“ beschrieben. In zwei Gebäuden war das nicht möglich. In einem Fall wird das Kunstlicht ausschließlich präsenzabhängig geschaltet, die Aufzeichnung des Kunstlichtzustandes wäre gleichzeitig eine Anwesenheitskontrolle der Nutzer gewesen, die nicht gewünscht war. In einem weiteren Gebäude waren die vorhandenen Stehleuchten mechanisch so wenig belastbar, dass das Anbringen des Beleuchtungsstärkesensors vom Betreiber ausgeschlossen wurde.

Für die übrigen sieben Gebäude liegen Beleuchtungsstärkemesswerte vor, die in größtmöglicher Nähe zum Leuchtmittel der Grundbeleuchtung aufgezeichnet wurden. Wie die übrigen Messwerte wurden auch diese im 4-Minuten-Takt aufgezeichnet. In Räumen, in denen die Grundbeleuchtung in Gruppen geschaltet werden kann, wurden soweit möglich zwei Datenlogger eingesetzt.

In einigen Fällen ist die Unterscheidung, ob das Kunstlicht an oder aus ist, aus dem aufgezeichneten Messwert eindeutig abzulesen. Die Unterscheidung ist umso zuverlässiger, je weniger Licht aus anderen Quellen (Tageslicht, andere Kunstlichtquellen) auf den Sensor fällt. Das trifft zum Beispiel auf Räume zu, in denen das Kunstlicht nur in einer Gruppe schaltbar und nicht dimmbar ist. Der Sensor konnte in diesen Fällen an einer fensterfern angeordneten Leuchte angebracht werden. Die folgende Abbildung 19 zeigt die Messwerte eines Sensors, der auf einer abgependelten Direkt-Indirekt-Leuchte so angebracht werden konnte, dass das Licht der Leuchtstoffröhre direkt auf den Sensor fiel.

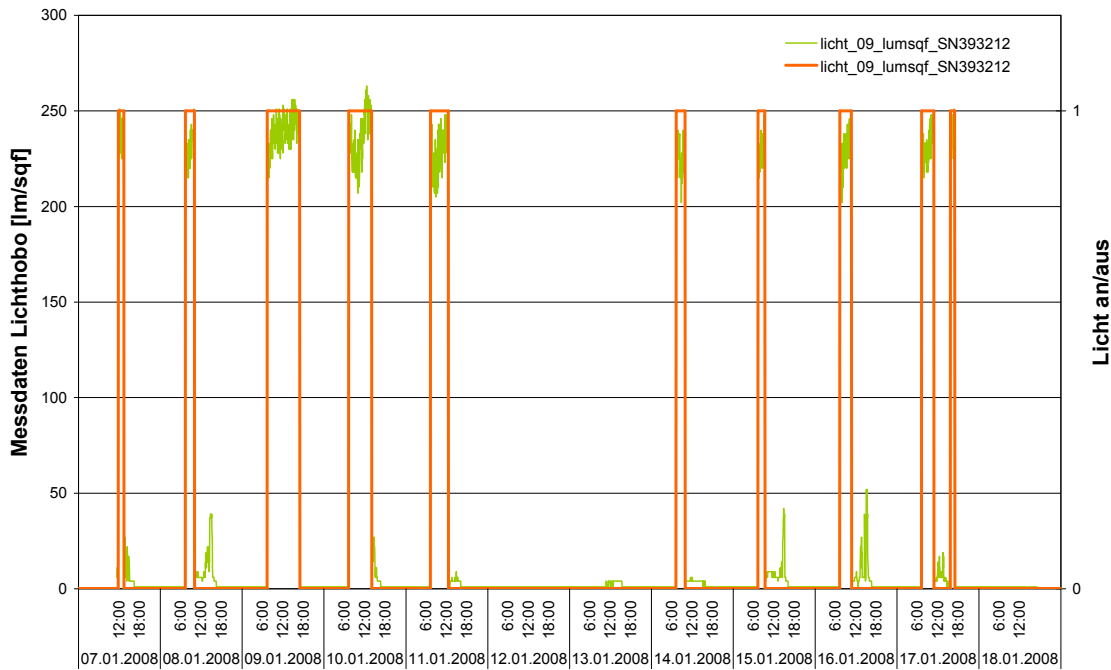


Abbildung 19 Messwerte eines Sensors an einer abgependelten Direkt-Indirekt-Leuchte. Grün dargestellt sind die Messwerte der Beleuchtungsstärke, die sich in diesem Beispiel auf zwei unterschiedliche Niveaus verteilen. Der Zustand des Kunstlichts (orangefarbene Linie) kann eindeutig abgeleitet werden.

Die Messwerte der Beleuchtungsstärke verteilen sich in diesem Beispiel eindeutig auf zwei unterschiedliche Niveaus, die vom Schaltzustand des Kunstlichts abhängen. Die Zeiten, die dem Zustand „Kunstlicht an“ zugeordnet werden, sind plausibel. Aufgrund der fensterfernen Position der Leuchte und der Anordnung des Sensors gelangt nur wenig Tageslicht zum „Kunstlichtsensor“.

In anderen Fällen – z. B. bei Stehleuchten, die in Fensternähe angeordnet sind – ist der Einfluss des Tageslichts auf den Kunstlichtmesswert deutlich größer (Abbildung 20).

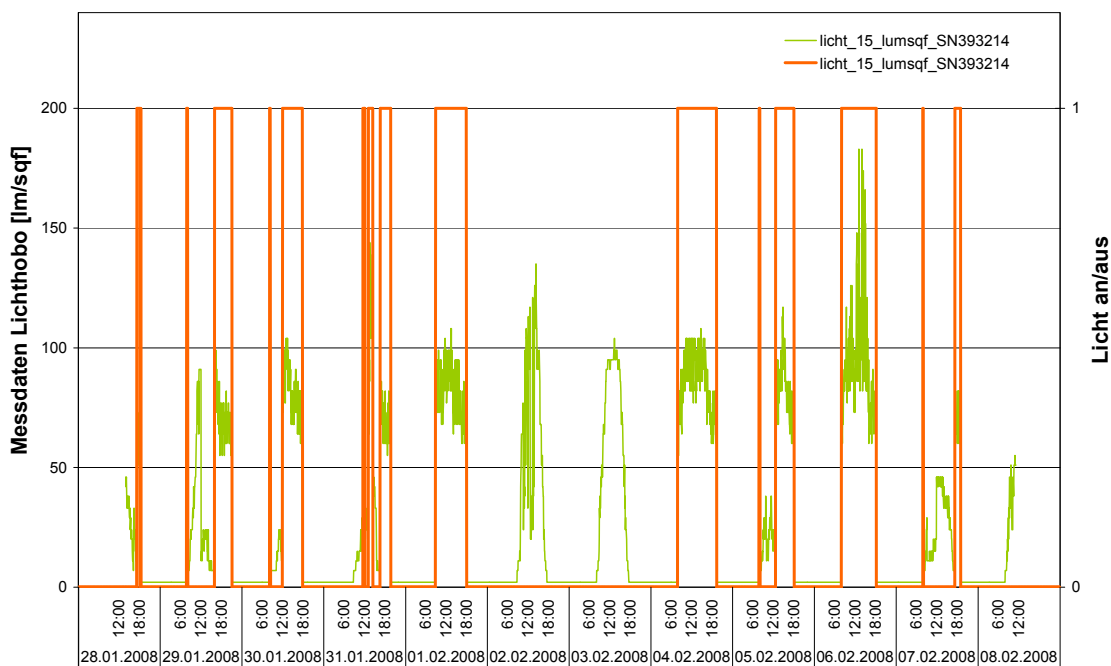


Abbildung 20 Messwerte eines Sensors an einer Stehleuchte. Grün dargestellt sind die Messwerte der Beleuchtungsstärke, aus denen sich der Zustand des Kunstlichts (orangefarbene Linie) nicht eindeutig ableiten lässt.

In diesen Fällen können Schaltvorgänge beim Kunstlicht nur unter Einbeziehung der Außenbeleuchtungsstärke identifiziert werden, deren Einfluss durch Sonnen- und Blendschutzsysteme beeinflusst wird.

Im ersten Schritt wurde für jede Messreihe automatisiert ermittelt, welcher Zustand des Kunstlichts vorliegt. Dabei wurden Verhältnisse innerhalb der Messreihen und Mindestwerte für einen Kunstlichtanteil festgelegt. Für jede der 476 vorhandenen Messreihen wurde anschließend ein Diagramm wie oben abgebildet erzeugt, um die Ergebnisse visuell zu überprüfen. Aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen, die bei den Messreihen herrschten, war diese Überprüfung und die manuelle Korrektur der automatisiert ermittelten Ergebnisse erforderlich. 3 325 Einschaltvorgänge und 3 312 Ausschaltvorgänge konnten identifiziert werden.

4.7 Statistische Auswertung

Die mittels Messung und Befragung erhobenen Datensätze enthalten sehr unterschiedlich geartete und unterschiedlich strukturierte Informationen. Die Skalenniveaus sind unterschiedlich, ebenso die Anzahl Zeitpunkte der Datenerhebung:

- Kontinuierlich erfasste physikalische Messwerte (4-Minuten-Messintervalle)
- Aus den Messwerten abgeleitete Nutzereingriffe
- Nutzerbewertung (Erhebung mittels eines standardisierten Fragebogens)
- Gebäude- und Raumparameter

Die physikalischen Messwerte weisen eine metrische Skala auf (z. B. Beleuchtungsstärke, Temperatur), auch das Skalenniveau der aus ihnen abgeleiteten Nutzereingriffe ist metrisch (z. B. Zeitpunkt, Beleuchtungsstärke, Blendungsindex).

Die Antwortskalen des Fragebogens waren überwiegend 5er-Skalen (z. B. 5er-Skala „sehr dunkel“ bis „sehr hell“). Diese werden als metrische Skalen interpretiert. Dabei wird unterstellt, dass die Befragten die Abstände zwischen den benachbarten Skalenpunkten als gleich groß wahrnehmen und Intervallskalenniveau vorliegt. Andere Antwortskalen des Fragebogens sind nominal (z. B. Geschlecht).

Bei den erhobenen Gebäude- und Raumparametern treten metrische Daten (z. B. Anteil Fensterfläche an der Nettofassade), ordinale Daten (z. B. Fassadentyp Lochfassade/Bandfassade/Ganzglasfassade) und nominale Daten auf (z. B. Raum an der Außenfassade/Raum zum Atrium).

Die physikalischen Messwerte liegen in Form von kontinuierlichen Messreihen der zweiwöchigen Messzeiträume vor (Längsschnittdaten, stetige Zeitreihen). Die Messungen wurden jeweils in 15 Räumen parallel durchgeführt (Querschnittdaten).

Die aus diesen Längsschnittdaten ermittelten Nutzereingriffe werden nicht als Längsschnittdaten interpretiert, da nicht bekannt ist, welcher Nutzer den Eingriff vorgenommen hat. Die Nutzereingriffe werden als voneinander unabhängige Ereignisse betrachtet.

Bei den mittels Befragung erhobenen Daten handelt es sich um sogenannte „Paneldaten“, da mehrere Probanden (Querschnittuntersuchung) mehrmals untersucht wurden (Längsschnittuntersuchung, diskrete Zeitreihen). Die Daten eines Probanden werden bei der Paneldatenanalyse im Gegensatz zu anderen statistischen Methoden nicht als unabhängige Stichproben behandelt.

Den Unterschieden bei den vorliegenden Daten entsprechend wurden unterschiedliche statistische Verfahren für die Auswertung gewählt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Neben den angegebenen Quellen wurde vor allem folgende Literatur verwendet: „Statistik“ von Bortz und Schuster (2010), „Multivariate Analysemethoden“ von Backhaus, Erichson, Plinke und Weiber (2011), „Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse“ von Wolf und Best (2010a) sowie „Panel Data Econometrics in R: The plm Package“ von Croissant und Millo (2008). Die statistische Auswertung erfolgte mit den Programmen IBM SPSS Statistics 20 und „R“ Version 2.15.0. Die Berechnungsergebnisse werden den Richtlinien der American Psychological Association (APA) entsprechend mit Punkten als Dezimaltrennzeichen angegeben.

4.7.1 χ^2 -Verfahren (Chi²-Test)

Der Chi²-Test ist ein Verfahren zur Analyse von Häufigkeiten. Er dient dazu, Zusammenhänge zwischen nominal skalierten Variablen (kategorialen Variablen) zu untersuchen.

Für die zu untersuchenden Variablen (auch Merkmale) wird in einem ersten Schritt ermittelt, wie häufig die verschiedenen möglichen Merkmalskombinationen in der Stichprobe aufgetreten sind („beobachtete Werte“). Die gemeinsame Häufigkeitsverteilung der kategorialen Variablen wird dabei üblicherweise als Kreuztabelle (auch als Kontingenztafel bezeichnet) dargestellt. Die beobachteten Werte werden mit der (gleichmäßigen) Häufigkeitsverteilung verglichen, die zu erwarten wäre, falls kein Zusammenhang zwischen den Variablen besteht („erwartete Werte“). Mit Hilfe des Chi²-Tests (auch als Chi²-Unabhängigkeitstests bezeichnet) wird ermittelt, ob die beobachteten Werte sich signifikant von den erwarteten Werten unterscheiden. Ein signifikantes Ergebnis bedeutet, dass die Variablen nicht unabhängig sind – man kann annehmen, dass sie abhängig sind.

Die Stärke eines gefundenen Zusammenhangs spiegelt sich im Phi-Koeffizienten wider, der auf dem Chi²-Wert und der Stichprobengröße basiert. Ein Wert über 0,3 zeigt eine Stärke der Abhängigkeit an, die mehr als trivial ist (Backhaus et al., 2011, S. 315). Für Variablen mit mehr als zwei Ausprägungen kann der Phi-Koeffizient Werte über 1 annehmen. Hier dient Cramer's V mit einem Maximalwert von 1 als Maß für die Stärke des Zusammenhangs.

Voraussetzungen für den Chi²-Test sind die Unabhängigkeit der Beobachtungen und eine minimale erwartete Häufigkeit von 5 in jeder Zelle.

Der Chi²-Test kann auch bei ordinal oder metrisch skalierten Daten eingesetzt werden. Die Daten müssen dann auf nominales Skalenniveau transformiert werden, was mit einem Verlust an Information verbunden ist.

Der Chi²-Test wurde in der vorliegenden Untersuchung nur zur Analyse von Häufigkeiten kategorialer Variablen eingesetzt, beispielsweise bei der Analyse, ob die Gründe für einen Nutzereingriff sich je nach Jahreszeit unterscheiden.

4.7.2 Varianzanalyse (Analysis of Variance ANOVA)

Die Varianzanalyse prüft den Einfluss einer oder mehrerer unabhängiger Variablen („Faktoren“) auf eine oder mehrere abhängige Variablen durch den Vergleich von Gruppenmittelwerten. Die unabhängigen Variablen müssen kategorial sein, die abhängigen Variablen müssen metrisch sein.

Bei den zu analysierenden Daten handelt es sich im Allgemeinen um eine Stichprobe, von der auf die Grundgesamtheit – also die gesamte Population – geschlossen werden soll. Daher muss geprüft werden, ob in der Stichprobe vorhandene Unterschiede zufällig sein können oder ob es sich um systematische Unterschiede handelt. Dafür wird die Abweichung jedes Messwertes vom Mittelwert der Stichprobe (auch „Fehler“ genannt) aufgeteilt in die Abweichung des Messwertes vom zugehörigen Gruppenmittelwert und in die Abweichung des Gruppenmittelwertes vom Mittelwert der Stichprobe.

Die Analyse erfolgt anhand der Varianz, also anhand der Summe der quadrierten Abweichungen („Sum of Squares“, SS). Die Varianz der Stichprobe wird dabei wie oben beschrieben aufgeteilt in die vom Faktor verursachte Varianz (SS der Differenz von Gruppenmittelwert und Stichprobenmittelwert) und die Restvarianz (SS der Differenz von Messwert und Gruppenmittelwert).

Die Nullhypothese geht nun davon aus, dass die Gruppen sich nicht unterscheiden und dass die gesamte Varianz der Stichprobe auf zufällige individuelle Unterschiede zurückzuführen ist. Das zu prüfende Alternativmodell geht davon aus, dass für mindestens eine Gruppe ein Teil der Varianz auf Unterschiede zwischen den Gruppen zurückzuführen ist. Wenn die Nullhypothese zutrifft und die Gruppenzugehörigkeit keinen Einfluss auf die Messwerte hat, so basiert der vom Faktor verursachte Anteil der Varianz im Alternativmodell ausschließlich auf Stichprobenfehlern

und ist in der Regel klein. Die Restvarianz des Alternativmodells unterscheidet sich dann nur wenig von der gesamten Varianz der Stichprobe.

Wird dagegen die Restvarianz durch die Berücksichtigung der vom Faktor verursachten Varianz deutlich kleiner, kommt es also zu einer signifikanten Reduktion der Fehlervarianz (signifikanter F -Wert), so muss die Nullhypothese abgelehnt werden – mindestens eine Faktorausprägung beeinflusst den Gruppenmittelwert signifikant.

Aus dem Ergebnis der Varianzanalyse kann nicht geschlossen werden, wie viele der Faktorausprägungen oder welche Faktorausprägungen den Mittelwert signifikant beeinflussen.

Dafür stehen Post-Hoc-Tests zur Verfügung, mit denen untersucht werden kann, welche Gruppenmittelwerte sich unterscheiden. Verwendet wurden der Scheffé-Test, der gegenüber Verletzungen der Voraussetzungen relativ robust ist (Bortz & Schuster, 2010, S. 232), der Test nach Student-Newman-Keuls und der Test Tamhane-T2, der für Stichproben mit ungleichen Varianzen geeignet ist.

Wenn ein Faktor der Varianzanalyse zufolge einen signifikanten Einfluss auf den Mittelwert einer Variablen hat, stellt sich die Frage, ob dieser Einfluss auch von praktischer Relevanz ist. Bei großen Stichproben können auch sehr kleine Mittelwertunterschiede signifikante Ergebnisse liefern.

Ob ein Unterschied bedeutsam ist, hängt von der Streuung der abhängigen Variablen ab: Je größer die Streuung, desto größer muss auch ein Mittelwertunterschied sein, um von praktischer Bedeutung zu sein. Die Effektstärke f nach Cohen setzt daher die Varianz aufgrund von Mittelwertunterschieden zwischen den Gruppen ins Verhältnis zur Varianz der gesamten Stichprobe. Cohen schlägt eine Klassifizierung vor, der zufolge eine Effektstärke von $f=0.1$ auf einen kleinen Effekt hindeutet, $f=0.25$ auf einen mittleren Effekt und $f=0.4$ auf einen großen Effekt.

Völkle und Erdfelder weisen darauf hin, dass diese Klassifizierung nur eine Faustformel darstellt und die Bewertung der Effektstärke vor allem vom Untersuchungsgegenstand und -kontext abhängt (Völkle & Erdfelder, 2010, S. 473).

Die Durchführung einer Varianzanalyse ist an die Voraussetzung geknüpft, dass die Daten drei zentralen Annahmen entsprechen, auf denen die Varianzanalyse basiert. Diese werden mit „Normalverteilung“, „Homogenität“ und „Unabhängigkeit der Fehler“ beschrieben.

„Normalverteilung“ meint, dass die Abweichungen der Messwerte einer Gruppe von deren Mittelwert normalverteilt sind. Die Verteilung der abhängigen Variablen über alle Gruppen hinweg ist irrelevant, lediglich die Normalverteilung innerhalb der zu vergleichenden Gruppen („Zellen“) ist von Belang (Völkle & Erdfelder, 2010, S. 457). Zur Prüfung der Normalverteilung können grafische Verfahren (QQ- oder PP-Plots) verwendet werden, der Kolmogorov-Smirnov-Test oder der Shapiro-Wilk-Test.

Mit „Homogenität der Fehlervarianzen“ wird beschrieben, dass die Abweichungen zwischen Messwerten und Gruppenmittelwert, also die Fehler, in jeder Gruppe gleich groß sind. Zur Überprüfung steht der Levene-Test zur Verfügung. Bei nicht gegebener Varianzhomogenität wird empfohlen, die Signifikanzschranke nicht bei 0.05 sondern bei 0.01 anzusetzen (Bühl, 2008, S. 447).

„Unabhängigkeit der Fehler“ bedeutet, dass Abweichungen der Messwerte vom Mittelwert weder innerhalb einer Gruppe noch über verschiedene Gruppen hinweg zusammenhängen dürfen. Das tritt vor allem bei Mehrfachbefragungen derselben Probanden auf, oder wenn Gruppierungsvariablen vorliegen, die nicht berücksichtigt wurden. Wenn den Faktorstufen verschiedene Stichproben zugeordnet sind, dürfte die Voraussetzung der Unabhängigkeit der Fehler erfüllt sein.

Bortz und Schuster führen aus, dass diese Voraussetzungen der Varianzanalyse mit zunehmendem Stichprobenumfang an Bedeutung verlieren. Zu den Annahmen der Normalverteilung und der Varianzhomogenität schreiben sie: „Abweichungen von der Normalverteilung sind zu vernachlässigen, wenn die Populationsverteilungen schief sind. [...] Die Teststärke wird durch

schmalgipflige Verteilungen vergrößert und durch breitgipflige Verteilungen verkleinert. Dies gilt vor allem für kleine Stichproben.

Heterogene Varianzen beeinflussen den F -Test nur unerheblich, wenn die untersuchten Stichproben gleich groß sind.“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 214)

Von gleich großen Stichproben („gleichbesetzten Zellen“, „balanciertem Versuchsplan“, „orthogonalem Design“) kann man sprechen, wenn das Verhältnis der größten zur kleinsten Stichprobe 1,5 unterschreitet ($n_{max} / n_{min} < 1,5$).

Vom Einsatz der Varianzanalyse wird abgeraten, wenn bei kleinen Stichproben ($n_i < 10$) und ungleich besetzten Zellen („unbalancierter Versuchsplan“, „nicht-orthogonales Design“) eine oder mehrere Voraussetzungen verletzt sein könnten.

Die Varianzanalyse wurde in der vorliegenden Untersuchung unter anderem für die Analyse der Nutzereingriffe verwendet. Dabei sollte ermittelt werden, ob Faktoren wie die Jahreszeit, der Fensterflächenanteil eines Raumes oder die Steuerung des Kunstlichts sich auf das Nutzerverhalten auswirkten, das sich in den Messwerten widerspiegelt.

Die Gleichbesetzung der Zellen ist bei einigen Analysen nicht gegeben. Aufgrund der Stichprobengröße weisen alle Zellen auch bei unbalancierten Versuchsplänen und mehrfaktoriellen Analysen regelmäßig eine große Anzahl Beobachtungen auf, so dass Bortz und Schuster zufolge nicht vom Einsatz der Varianzanalyse abzusehen ist.

Bei Varianzanalysen, in denen es sich bei der abhängigen Variable um Messwerte der Beleuchtungsstärke handelt, wurden diese Messwerte für die Varianzanalyse logarithmiert, da die Messwerte innerhalb der zu vergleichenden Gruppen regelmäßig nicht normalverteilt sind. Die logarithmierten Werte entsprechen der Normalverteilung deutlich besser, jedoch nicht perfekt.

4.7.3 Korrelationsanalyse

Mit Korrelation wird der Zusammenhang (die Assoziation) zwischen zwei Variablen beschrieben. Der Korrelationskoeffizient r ist ein Maß für die Stärke des linearen Zusammenhangs zweier Variablen. Welche der beiden Variablen die andere beeinflusst oder ob beide durch eine dritte Variable beeinflusst werden, kann mit Hilfe der Korrelationsanalyse nicht ermittelt werden.

Abhängig vom Skalenniveau der Daten stehen verschiedene Korrelationskoeffizienten zur Verfügung. Für bivariat normalverteilte, metrisch skalierte Variablenpaare kann der Korrelationskoeffizient nach Pearson berechnet werden. Sofern mindestens eine der Variablen ordinalskaliert oder nicht normalverteilt ist, können eine Rangkorrelation nach Spearman oder Kendalls Tau berechnet werden.

Grundlage für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten ist die Kovarianz. Bei der Berechnung dieses nicht-standardisierten Zusammenhangsmaßes wird zunächst für jeden Messwert (intervallskalierte Variablen) bzw. Rangplatz (ordinalskalierte Variablen) die Differenz zum Mittelwert der Stichprobe berechnet, die Differenzen jedes Wertepaars werden multipliziert. Dieses Abweichungsprodukt wird umso größer, je stärker beide Werte eines Wertepaares vom Mittelwert abweichen. Die Kovarianz zweier Variablen wird berechnet, indem die Summe der Abweichungsprodukte ins Verhältnis zur Stichprobengröße gesetzt wird.

Durch Standardisierung der Kovarianz erhält man den Korrelationskoeffizienten r , der Werte zwischen +1 (perfekt positive Korrelation) und -1 (perfekt negative Korrelation) annehmen kann. Ist $r=0$, besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen.

Die mögliche Klassifizierung der Stärke des Zusammenhangs gibt Weins (2010) folgendermaßen an (Tabelle 2):

Korrelationskoeffizient r	Stärke des Zusammenhangs
$0,00 < r < 0,05$	kein Zusammenhang
$0,05 < r < 0,20$	geringer Zusammenhang
$0,20 < r < 0,50$	mittlerer Zusammenhang
$0,50 < r < 0,70$	hoher Zusammenhang
$0,70 < r $	sehr hoher Zusammenhang

Tabelle 2 Betrag des Korrelationskoeffizienten und Vorschlag einer Klassifizierung der Stärke des Zusammenhangs

Sie weist darauf hin, dass Werte über 0,7 bei Individualdaten eher selten auftreten (Weins, 2010, S. 87).

Voraussetzungen für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson sind die bivariate Normalverteilung und das Intervallskalenniveau beider Variablen. Bortz und Schuster führen aus, dass der Signifikanztest für Korrelationskoeffizienten robust sowohl gegenüber Verletzungen der Verteilungsannahme als auch gegenüber Verletzungen des vorausgesetzten Intervallskalenniveaus ist (Bortz & Schuster, 2010, S. 162).

Ergänzend kann der quadrierte Korrelationskoeffizient r^2 berechnet werden, der prozentual interpretiert werden kann: Aus z. B. $r=0,25$ folgt $r^2=0,0625$ – der entdeckte lineare Zusammenhang kann 6 % der Abweichungen erklären (Weins, 2010, S. 87).

Korrelationen wurden berechnet, um Zusammenhänge zwischen Messwerten und Nutzerbewertungen oder zwischen verschiedenen Bewertungen eines Nutzers aufzudecken. Dabei wurde für die fünfstufigen Skalen der Nutzerbewertung Intervallskalenniveau unterstellt.

4.7.4 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse dient dazu, den Einfluss einer oder mehrerer unabhängiger Variablen (Prädiktorvariablen, Regressoren) auf eine abhängige Variable (Kriteriumsvariable) zu schätzen. Dabei wird eine Regressionsgleichung aufgestellt, die den Gesamttrend aller Wertepaare bzw. Wertesätze der Stichprobe am besten wiedergibt. Anhand dieser Gleichung können die Werte der abhängigen Variablen für beliebige Werte der Regressoren geschätzt, „vorhergesagt“ werden.

Die Regressionsanalyse von Variablen, zwischen denen ein linearer Zusammenhang besteht, wird als lineare Regression bezeichnet. Die Regressionsgleichung definiert eine Gerade. Die Regressionsparameter einer linearen Regression können berechnet werden, während die Parameter nichtlinearer Regressionsgleichungen geschätzt werden müssen. Daher sollten nicht-lineare Zusammenhänge möglichst in lineare Zusammenhänge überführt werden (siehe z. B. Bühl, 2008, S.372), was durch Transformation einer Variablen erfolgen kann.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden keine nichtlinearen Regressionsanalysen durchgeführt, daher wird im Folgenden nur auf die lineare Regression eingegangen.

Eine exakte Vorhersage der Ausprägung eines Merkmals auf Basis der Ausprägung eines anderen Merkmals ist bei human- und sozialwissenschaftlichen Zusammenhängen in der Regel nicht möglich (Bortz & Schuster, 2010, S. 183).

Unsystematische Abweichungen zwischen einer deterministischen Funktion und den beobachteten Werten ergeben sich aus unberücksichtigten Einflussgrößen, Messfehlern (begrenzte

Messgenauigkeit) und Auswahlfehlern. Backhaus et al. bewerten diese Fehler folgendermaßen: „Der Wert eines Modells resultiert daraus, dass es einfacher ist als die Realität und sich auf die Wiedergabe wichtiger struktureller Aspekte begrenzt. [...] Ein zufälliger Auswahlfehler ist bei Stichproben unvermeidbar.“ (Backhaus et al., 2011, S. 85)

Die Differenz zwischen vorhergesagtem und beobachtetem Wert wird mit Residuum bezeichnet (auch „Fehlerterm“, „residual“, „error of estimate“). Die Residuen werden über die Aufstellung der Regressionsgleichung hinaus auch zur Überprüfung des Regressionsmodells genutzt: Wenn die Residuen nicht zufällig auftreten und keiner Normalverteilung folgen, deutet dies darauf hin, dass das Regressionsmodell falsch ist (Brosius, 2004, S. 580).

Das Standardverfahren zur Ermittlung der Regressionsparameter einer linearen Regression ist die „Methode der kleinsten Quadrate“ (Wolf & Best, 2010b, S. 646). Die in diesem Verfahren ermittelte Regressionsgerade ist diejenige, für die die Summe der quadrierten Residuen minimal ist („method of least squares“, „ordinary least squares“, OLS).

Als Maß für die Güte eines Regressionsmodells dient der Determinationskoeffizient R^2 , der auch als Bestimmtheitsmaß bezeichnet wird. Er ist ein normiertes Maß für die Abweichungen der beobachteten Werte von der Regressionsgeraden. R^2 entspricht dem Anteil der Varianz, die mit dem Prädiktor verbunden ist – der erklärten Varianz. $R^2=0$ bedeutet, dass kein linearer Zusammenhang besteht, $R^2=1$ bedeutet, dass ein perfekter linearer Zusammenhang besteht.

Ab welcher Höhe ein R^2 als gut zu bezeichnen ist, hängt von der jeweiligen Problemstellung ab. Bei stark zufallsbehafteten Prozessen kann Backhaus zufolge ein R^2 von 0,1 akzeptabel sein (Backhaus et al., 2011, S. 100).

In der Literatur wird empfohlen, für Schätzungen des Determinationskoeffizienten in der Population den korrigierten Determinationskoeffizienten $R^2_{\text{kor}} zu verwenden, da R^2 zur Überschätzung tendiert (Bortz & Schuster, 2010, S. 192).$

Bortz und Schuster ergänzen, dass die Schätzung der Steigung der Regressionsgeraden mit zunehmender Unterschiedlichkeit der Prädiktorwerte präziser wird (ebd., S. 195).

Aus der Vorgehensweise beim Ermitteln einer Regressionsgleichung ergibt sich, dass Kriteriums- und Prädiktorvariablen mindestens Intervallskalenniveau aufweisen müssen. Nominalskalierte Prädiktorvariablen können mit Hilfe sogenannter Dummy-Variablen berücksichtigt werden. Dabei werden normalskalierte Variablen in (intervallskalierte) Variablen mit jeweils zwei Ausprägungen überführt.

Die abhängige Variable sollte idealerweise metrisch, kontinuierlich und in ihrem Wertebereich nicht beschränkt sein. Ohr zufolge kann dieses Ideal in der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse, insbesondere bei mittels Umfragen erhobenen Daten, in der Regel nicht erfüllt werden (Ohr, 2010, S. 646). Je größer die Anzahl Ausprägungen ist, desto mehr entspricht die Variable dem Ideal. Variablen mit fünf Ausprägungen werden in dieser Untersuchung trotz der Abweichung von diesem Ideal als abhängige Variablen berücksichtigt.

Neben dem Skalenniveau der abhängigen und unabhängigen Variablen basiert die Regressionsanalyse auf weiteren Voraussetzungen und Annahmen, die in der Literatur unterschiedlich zusammengefasst werden. Die folgende Auflistung orientiert sich an Backhaus et al. (2011).

Annahme 1: Der Zusammenhang zwischen den Variablen ist linear und das Modell ist richtig spezifiziert, es enthält die relevanten erklärenden Parameter und die Zahl der Regressoren ist kleiner als der Stichprobenumfang.

Eine Verletzung der Voraussetzung der Linearität führt zu einer Verzerrung der Schätzwerte der Parameter. Die Anforderung, dass alle relevanten Parameter enthalten sein müssen, lässt sich nicht immer realisieren – u.U. sind gar nicht alle relevanten Einflussgrößen bekannt. Werden zu viele erklärende Variablen berücksichtigt, so steigt die Gefahr, dass ein tatsächlicher Einfluss-

faktor nicht signifikant erscheint, weil seine Wirkung nicht mehr hinreichend präzise ermittelt werden kann, so Backhaus et al. (2011, S. 89). Auch in diesen Fällen kann eine Verzerrung der Schätzwerte die Folge sein.

Die Prüfung der Linearität kann mit Hilfe von Streudiagrammen der unabhängigen über der abhängigen Variablen erfolgen und mit Hilfe von „partial residual plots“, Streudiagrammen der partiellen Residuen (Ohr, 2010, S. 654). LOWESS-Kurven der Werte zeigen grafisch, ob Linearität vorliegt (Wolf & Best, 2010b, S. 635).

Besonders bei kleinen Stichproben besteht die Gefahr, dass die Regressionsanalyse von wenigen sogenannten „einflussreichen Beobachtungen“ beeinflusst wird (Ohr, 2010, S. 659). Das sind Wertepaare, bei denen sowohl die abhängige als auch die unabhängige Variable einen Wert aufweist, der weit vom Mittelwert entfernt ist. Aufgrund der Stichprobengröße dieser Untersuchung und der Verteilung der Nutzerbewertungen, die in der Regel als abhängige Variablen in die Regressionsanalysen eingegangen sind, wird dieses Risiko für die vorliegende Untersuchung als eher gering eingeschätzt. In der grafischen Untersuchung der Normalverteilungsannahme können Ausreißer identifiziert werden, die die Regressionsanalyse als „einflussreiche Beobachtungen“ verzerren würden.

Die grafische Untersuchung mittels Streudiagrammen der unabhängigen über der abhängigen Variablen und mit Hilfe von „partial residual plots“ wurde bei allen Regressionsanalysen durchgeführt. Auf weitere Tests der Linearität wurde verzichtet.

Annahme 2: Die Störgrößen, die sich in den Residuen widerspiegeln, haben den Erwartungswert Null.

Wenn die Störgrößen nur zufällige Effekte umfassen, ist davon auszugehen, dass Abweichungen sich gegenseitig ausgleichen und der Mittelwert der Abweichungen Null beträgt. Eine Verletzung dieser Annahme kann bei Regressionsmodellen, die eine Konstante enthalten, nicht zu Fehlern bei den Schätzwerten der Parameter führen, sondern lediglich zu einem Fehler bei der Schätzung der Konstanten.

Die Konstante entspricht dem Erwartungswert der abhängigen Variablen beim Wert null der Regressoren. Wenn die Skalen der Regressoren beliebig festgelegt wurden (beispielsweise bei Nutzerbewertungen), ist die Konstante nicht sinnvoll interpretierbar und Bortz und Schuster zufolge äußerst selten mit einer inhaltlichen Forschungsfrage verknüpft (Bortz & Schuster, 2010, S. 188). Diese Annahme ist daher für die vorliegende Untersuchung, bei der Regressionsmodelle mit einer Konstanten verwendet wurden, nicht von Bedeutung.

Annahme 3: Keine Kovarianz – Es besteht keine Korrelation zwischen den erklärenden Variablen und der Störgröße.

Falls die Störgröße eine nicht berücksichtigte relevante Variable enthält (Annahme 1 verletzt), schlägt sich dieses lediglich in einem Fehler beim konstanten Term nieder, sofern Annahme 3 erfüllt ist. Sind Störgröße und Regressoren korreliert, können Schätzfehler die Folge sein. Diese Annahme ist, so Ohr, „ganz wesentlich eine Frage der korrekten und vollständigen Modellspezifikation. Die Annahme selbst kann im Allgemeinen nicht direkt mittels Stichprobenresiduen geprüft werden.“ (Ohr, 2010, S. 654)

Annahme 4: Homoskedastizität – Die Störgrößen haben eine konstante Varianz.

Die Varianz der Residuen darf nicht von der unabhängigen Variablen abhängig sein. Heteroskedastizität ist oft ein Problem von Nichtlinearität und führt zu Ineffizienz der Schätzung (Backhaus et al., 2011, S. 92), sie kann mit dem Goldfeld/Quandt-Test überprüft werden.

Ohr empfiehlt, auch diese Annahme grafisch zu überprüfen: In einem Streudiagramm der studentisierten (oder standardisierten) Residuen über den Vorhersagewerten ist Heteroskedastizität gegebenenfalls leicht zu erkennen (Ohr, 2010, S. 658). Vergrößert sich die Varianz der beobachteten Residuen um weniger als Faktor drei, so sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich (ebd., S. 667).

Die grafische Prüfung auf Homoskedastizität wurde bei allen Regressionsanalysen durchgeführt.

Annahme 5: Keine perfekte Multikollinearität – Zwischen den erklärenden Variablen besteht keine lineare Abhängigkeit.

Eine weitere Voraussetzung der Regressionsanalyse ist, dass zwischen den erklärenden Variablen keine deutliche Korrelation bestehen darf (Multikollinearität der Variablen). Backhaus et al. schreiben dazu: „Bei empirischen Daten besteht immer ein gewisser Grad an Multikollinearität, der nicht störend sein muss.“ (Backhaus et al., 2011, S. 93)

Bei perfekter Kollinearität kann die Regressionsanalyse nicht berechnet werden. Bei einer nicht perfekten Kollinearität erklärender Variablen wird der Determinationskoeffizient korrekt berechnet, die einzelnen Parameter der korrelierten Variablen sind aber mit hoher Wahrscheinlichkeit verzerrt – ein Parameter wird möglicherweise über-, der andere unterschätzt.

Multikollinearität kann anhand des Toleranzindex überprüft werden. Der Toleranzindex ist der Anteil der Varianz einer unabhängigen Variablen, der nicht von den übrigen unabhängigen Variablen erklärt wird, er kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Bei Toleranzwerten unter 0,1 besteht der Verdacht, dass Kollinearität vorliegen könnte (Brosius, 2004, S. 589). Der „Variance Inflation Faktor“ VIF ist der Kehrwert der Toleranz, dementsprechend deuten Werte ab 10 auf Kollinearität hin.

Der Toleranzindex wurde für alle Regressionsanalysen überprüft.

Annahme 6: Die Störgrößen sind normalverteilt.

Eine Nicht-Normalverteilung der Störgrößen hat keine Auswirkungen auf die berechneten Schätzer. Die Signifikanztests für das Regressionsmodell und für die Schätzer werden ungültig, wenn die Stichprobe klein ist. Backhaus et al. führen aus, dass die Signifikanztests bei Stichprobenumfängen über 40 unabhängig von der Verteilung der Störgrößen gültig sind.

Die Verteilung der Prädiktorwerte hat keine Auswirkungen auf die Gültigkeit des Regressionsmodells.

Da der Stichprobenumfang in der vorliegenden Untersuchung 40 regelmäßig deutlich überschreitet, ist die Einhaltung dieser Voraussetzung hier von untergeordneter Bedeutung.

Ohr empfiehlt die Normalverteilungsannahme grafisch zu überprüfen anhand von Diagrammen der bei Normalverteilung erwarteten Werte über den Residuen.

Die Regressionsanalyse ist recht unempfindlich gegenüber kleineren Verletzungen dieser Annahmen (Backhaus et al., 2011, S. 97), die in einer empirischen Analyse „meist nur mehr oder weniger gut erfüllt sein“ werden (Wolf & Best, 2010b, S. 616). Von besonderer Bedeutung für die Reliabilität der Ergebnisse ist die Spezifikation des Modells (Annahme 1). Annahmeverletzungen sind Ohr zufolge meist ein Indiz für ein unvollständiges Erklärungsmodell (Ohr, 2010, S. 641).

Mit Hilfe der Regressionsanalyse (OLS) wurden in dieser Untersuchung Faktoren ermittelt, die dazu beigetragen haben, dass Nutzer wahrgenommene Blendung nicht als störend empfunden haben.

Alle Regressionsanalysen wurden mit „R“ berechnet, die Regressionsdiagnostik (Prüfung von Linearität, Homoskedastizität, Multikollinearität und Normalverteilung der Residuen) wurde für alle Regressionsanalysen durchgeführt. Um Fehler bei der umfangreichen Regressionsdiagnostik zu vermeiden, wurden von der Autorin Prozeduren für „R“ implementiert, die die erforderlichen Diagramme erzeugen und die oben beschriebenen Tests aufrufen.

4.7.5 Regressionsanalyse von Paneldaten

Zu den Voraussetzungen der Regressionsanalyse gehört die Unabhängigkeit der Stichproben. Durch die im Versuchsplan vorgesehene Mehrfachbefragung derselben Probanden ist diese Voraussetzung nicht für alle Daten dieser Untersuchung gegeben.

Diese Daten sind sogenannte „Paneldaten“, bei denen dieselben Variablen mehrfach an denselben „Untersuchungseinheiten“ (Probanden) gemessen wurden. Engel und Reinecke beschreiben als typisches Merkmal des Paneldesigns „dass es gerade aus einer größeren Zahl von Fällen besteht, für die Informationen zu relativ wenigen Messzeitpunkten ($t \geq 2$) erhoben werden“ (Engel & Reinecke, 1994, S. 3). Die Anzahl der Datenerhebungen wird als „Wellen“ bezeichnet.

Bei Querschnittsdaten wird der Einfluss einer unabhängigen Variablen auf die abhängige anhand der Daten verschiedener Personen ermittelt („Between-Schätzer“). Dahinter steht die Annahme, dass sich die Personen nur hinsichtlich der beobachteten Variablen unterscheiden und keine unbeobachtete interindividuelle Heterogenität die Schätzung verzerrt. Wenn relevante Unterschiede unbeobachtet geblieben sind, sind die aus Querschnittsdaten gezogenen Kausalschlüsse unsicher.

Brüderl nennt als gewichtige Vorteile von Paneldaten die Beobachtung der individuellen Dynamik („intraindividuelle Veränderung“) und die Reduktion des Problems der unbeobachteten individuellen Heterogenität, das bei Querschnittsdaten auftritt. Der Fehlerterm des linearen Regressionsmodells wird bei der Paneldatenanalyse in einen „idiosynkratischen Fehler“ und einen personenspezifischen, zeitkonstanten Fehler aufgeteilt.

Der Einfluss einer Variablen auf eine andere kann aus dem Vergleich derselben Person zu verschiedenen Zeitpunkten abgeleitet werden („Within-Schätzer“). Für unverzerrte Within-Schätzer muss nur die Annahme erfüllt sein, dass ein und dieselbe Person sich zu den verschiedenen Zeitpunkten nur hinsichtlich der beobachteten Variablen unterscheidet, und keine unbeobachtete intraindividuelle Heterogenität vorliegt – die idiosynkratische Fehlerkomponente muss „strikt exogen“ sein (Brüderl, 2010, S. 972).

Modelle, die nur intraindividuelle Veränderungen berücksichtigen, gehen somit von der Annahme aus, dass der in diesen Modellen eliminierte personenspezifische Fehlerterm zeitlich konstant ist. Deshalb spricht man von „fixen Effekten“ und einem „Fixed-Effects-Modell“ oder FE-Modell. Unterschiede zwischen den Personen werden bei diesen Modellen nicht berücksichtigt. Auch die Koeffizienten zeitkonstanter Variablen (z. B. Geschlecht, Fensterflächenanteil der Fassade) können in FE-Modellen nicht geschätzt werden.

Das „Random-Effects-Modell“ oder RE-Modell geht davon aus, dass auch die personenspezifische Fehlerkomponente unabhängig von den erklärenden Variablen ist, und berücksichtigt auch die Varianz zwischen den Personen bei der Schätzung der Regressionsparameter. Wenn diese Annahme nicht gerechtfertigt ist, sind die RE-Schätzer verzerrt. Brüderl empfiehlt den Hausman-Test zur Überprüfung, ob die RE-Schätzer durch unbeobachtete Heterogenität verzerrt sind.

Wenn im FE-Modell nicht alle Variablen berücksichtigt werden können, die von inhaltlicher Bedeutung sind, und das RE-Modell wegen Verzerrung der Schätzer nicht verwendet werden darf, kann ein Hybrid-Modell berechnet werden. Das Hybrid-Modell ist ein RE-Modell, bei dem „die zeitveränderlichen Variablen in zweifacher Form aufgenommen werden: mittelwertsbereinigt (Within-Transformation) und als Personenmittel (Between-Transformation).“ (Brüderl, 2010, S. 976) Die Schätzer der Between-Komponente sind verzerrt, wenn unbeobachtete Heterogenität vorliegt, und „normalerweise nicht von inhaltlichem Interesse“ (ebd., S. 977).

Die Felduntersuchung war so angelegt, dass jeder Proband viermal (in jeder Jahreszeit einmal) befragt werden sollte. Aufgrund von Urlaub, Krankheit, Dienstreisen u.ä. haben nur 15 % der Probanden ($n=71$) an allen vier Befragungen teilgenommen, durchschnittlich wurden 2,1 Fragebögen pro Proband ausgefüllt.

Auch innerhalb vorliegender Fragebögen weisen die Datensätze häufig Lücken auf – beispielsweise wurden einzelne Fragen nicht beantwortet oder die Uhrzeit nicht angegeben, so dass manchen Fragebögen keine Messwerte zugeordnet werden können.

Würden nur Probanden berücksichtigt, die an allen vier Befragungen teilgenommen haben, so könnten nur 284 der 977 Fragebögen berücksichtigt werden. Wenn darüber hinaus alle unvollständigen Datensätze ausgeschlossen werden müssten, würde – je nach Anzahl der zu berücksichtigenden Variablen – nur ein Bruchteil der vorhandenen Daten in die Analyse eingehen. Die gewählte Untersuchungsmethode muss daher lückenhafte Daten („unbalanced panels“) berücksichtigen können.

Das ist beim PLM-Paket der Statistik-Software „R“ der Fall, die für die Paneldatenanalysen (OLS-Regression) verwendet wurde. Funktionen zur Erzeugung von Hybrid-Modellen und Methoden der Regressionsdiagnostik, die im PLM-Paket nicht enthalten waren, wurden von der Autorin implementiert.

Die Regressionsanalyse von Paneldaten wurde eingesetzt, um Faktoren zu ermitteln, die die Nutzerurteile beeinflussen, und um den Einfluss der verschiedenen Faktoren zu quantifizieren. Auch hier wurde für die fünfstufigen Skalen der Nutzerbewertung Intervallskalenniveau unterstellt.

4.7.6 Darstellung der Ergebnisse

Die Daten wurden überwiegend als Histogramm, als Diagramm der Mittelwerte mit Fehlerbalken oder als Boxplot dargestellt.

Die Fehlerbalken der Mittelwertdiagramme zeigen die Streuung der Ergebnisse, sie umfassen eine Standardabweichung (SD).

Ein Boxplot zeigt den Medianwert der dargestellten Werte als schwarze Linie innerhalb einer Box. Das untere Ende der Box entspricht dem 25. Perzentil, das obere Ende dem 75. Perzentil. Die Box umfasst somit 50 % der Werte. Die T-Balken (Whiskers) umfassen die Werte unter- bzw. oberhalb des 25. bzw. 75. Perzentils. Die Länge der T-Balken beträgt maximal das 1,5-fache der Höhe der Box. Werte, die außerhalb des Bereichs der T-Balken liegen, werden als Ausreißer oder Extremwerte bezeichnet und beeinflussen die T-Balken nicht. In den Diagrammen wurden Ausreißer und Extremwerte nicht dargestellt, um das Lesen der Diagramme zu erleichtern. Bei der Ermittlung des Medianwertes wurden Ausreißer und Extremwerte berücksichtigt.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird zunächst die Stichprobe beschrieben, also die berücksichtigten Gebäude und die teilnehmenden Nutzer.

Anschließend werden die Ergebnisse der Auswertung der Befragungen dargestellt, die Ergebnisse der Analyse der Nutzereingriffe und die Auswertung der Messung des Lichtspektrums und der Tageslichtversorgung.

5.1 Beschreibung der Stichprobe

Entsprechend dem in Abschnitt „4 Methodik“ beschriebenen Untersuchungsdesign wurden Gebäude gesucht, die den dort genannten Anforderungen an die Stichprobe möglichst entsprechen. Die für die Untersuchung gewonnenen Gebäude werden auf den folgenden Seiten kurz beschrieben und die Verteilung der Räume auf die verschiedenen Büroformen und Veränderungen im Untersuchungszeitraum angegeben. Abschließend werden Geschlecht und Alter der Probanden angegeben sowie einige Daten, die Rückschlüsse auf den Umfang ihrer Erfahrung mit dem Gebäude und ihrem Arbeitsplatz zulassen.

5.1.1 Kurzbeschreibung der Gebäude

Es ist gelungen, bei der Auswahl der neun Gebäude eine hinreichend ausgewogene Verteilung auf Alt- und Neubau sowie auf unterschiedliche Verglasungsanteile der Fassade (Loch-, Band- und Ganzglasfassade) zu erreichen, wie Tabelle 3 zeigt.

	Lochfassade	Bandfassade	Ganzglasfassade
Bestandsgebäude	1 (1836), 1 teilweise (1911)	1 (1997), 1 teilweise (1980er)	
Neubau	1 (2005), 1 teilweise (2007)	2 (2001, 2003), 1 teilweise (2007)	2 (2000, 2004)

Tabelle 3 Anzahl der untersuchten Gebäude mit den jeweiligen Gebäudemerkmalen (in Klammern das Baujahr)

Im Folgenden werden die neun Bürogebäude vorgestellt, in denen die Felduntersuchung durchgeführt wurde. Die Reihenfolge wurde dem Baujahr der Gebäude entsprechend gewählt.

Verwaltung der Universität Karlsruhe (heute: Karlsruher Institut für Technologie)

Gebäude der Universitätsverwaltung, Kaiserstraße 12, Karlsruhe

- Baujahr: 1836, Architektur: Heinrich Hübsch (Hoepke, 2007, S. 180)
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 27 % bis 45 %
- Sonnen-/Blendschutz: teilweise Holzrollläden, teilweise Jalousien (innenliegend), teilweise Vertikallamellen (innenliegend), teilweise Vorhänge, Nordbüros ohne Sonnen-/Blendschutz
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: manuell
- Kunstlicht: teilweise direkte Beleuchtung, teilweise direkt-indirekte Beleuchtung mit Langfeldleuchten
- Kunstlichtsteuerung: manuell schaltbar
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): 11,3 W/m² bis 30,3 W/m²
- Klimatisierung: Heizkörper mit Thermostatventil, ein Raum mit Umluftkühlgerät



Abbildung 21 Verwaltungsgebäude der Universität Karlsruhe/Karlsruher Institut für Technologie

Die Räume, in denen Messungen und Befragungen durchgeführt wurden, sind auf alle Geschosse des Gebäudes verteilt (Erdgeschoss, 1. und 2. Obergeschoss). Bei der Auswahl der Räume konnten alle Himmelsrichtungen berücksichtigt werden.

LBBW Mannheim

Altbau und Erweiterungsbau des Gebäudes Augustaanlage 33, Mannheim

Altbau:

- Baujahr: 1911, Architektur: Josef Durm
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 21 % bis 54 %
- Sonnen-/Blendschutz: Vertikallamellen (innenliegend), teilweise zusätzlich Jalousien (außenliegend)
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: manuell
- Kunstlicht: teilweise direkte Beleuchtung, teilweise direkt-indirekte Beleuchtung mit Langfeldleuchten
- Kunstlichtsteuerung: manuell schaltbar
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): 10,5 W/m² bis 17,6 W/m²
- Klimatisierung: Zuluftheizung/-kühlung mit Thermostatventil

Erweiterungsbau:

- Baujahr: 1980er Jahre
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 55 % bis 67 %
- Sonnen-/Blendschutz: Rollo (außenliegend) außer Nordbüros, teilweise zusätzlich Rollo (innenliegend), Nordbüros ohne Sonnen-/Blendschutz
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: außenliegende Rollos automatisch (GLT), überstimmbare, innenliegende Rollos manuell
- Kunstlicht: direkte Beleuchtung mit Langfeldleuchten
- Kunstlichtsteuerung: manuell schaltbar
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): 10,7 W/m² bis 14,4 W/m²
- Klimatisierung: Heizkörper mit Thermostatventil, Lüftungsanlage mit Heiz- und Kühlfunktion



Abbildung 22 *Altbau der LBBW Mannheim*

Die Messungen und Befragungen haben in je zwei Geschossen der beiden Bauteile stattgefunden (2. und 4. Obergeschoss des Altbaus; 2. und 3. Obergeschoss des Erweiterungsbaus). Bei der Auswahl der Räume konnten alle Himmelsrichtungen berücksichtigt werden.

DB Netz AG, Karlsruhe

Verwaltungsgebäude Schwarzwaldstraße 86, Karlsruhe

- Baujahr: 1997, Architektur: FKP Freitag, Kaltenbach und Partner
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 47 % bis 71 %
- Sonnen-/Blendschutz: Jalousien (außenliegend) außer Nordbüros, Nordbüros Rollos (innenliegend)
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: außenliegende Jalousien automatisch (GLT), überstimmbare Rollos manuell
- Kunstlicht: teilweise direkte Beleuchtung, teilweise direkt-indirekte Beleuchtung mit Langfeldleuchten
- Kunstlichtsteuerung: manuell schaltbar
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): $14,4 \text{ W/m}^2$ bis $23,5 \text{ W/m}^2$, teilweise von den Nutzern reduziert auf $4,8 \text{ W/m}^2$ bis $12,0 \text{ W/m}^2$
- Klimatisierung: Zuluftheizung/-kühlung mit Thermostatventil



Abbildung 23 Verwaltungsgebäude der DB Netz AG

Die Räume, in denen Messungen und Befragungen durchgeführt wurden, sind auf vier Geschosse des Gebäudes verteilt (Erdgeschoss und 2. bis 4. Obergeschoss), sie befinden sich in den Gebäudeteilen A bis D. Bei der Auswahl der Räume konnten alle Himmelsrichtungen berücksichtigt werden.

Braun GmbH, Kronberg

Verwaltungsgebäude der Braun GmbH, Frankfurter Straße 145, Kronberg im Taunus

- Baujahr: 2000, Architektur: Schneider + Schumacher
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 100 %
- Sonnen-/Blendschutz: Jalousien (außenliegend außer am Atrium, am Atrium innenliegend)
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: außenliegende Jalousien tagsüber manuell, Öffnen abends automatisch (GLT), innenliegende Jalousien manuell
- Kunstlicht: direkte Beleuchtung mit Einbau-Downlights
- Kunstlichtsteuerung: manuell schaltbar
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): $8,7 \text{ W/m}^2$ bis $10,0 \text{ W/m}^2$
- Klimatisierung: Betonkerntemperierung (Heiz-/Kühlfunktion), Lüftungsanlage (Heiz-/Kühlfunktion)



Abbildung 24 Atrium des Verwaltungsgebäudes der Braun GmbH

Die Räume, in denen Messungen und Befragungen durchgeführt wurden, sind auf die drei Geschosse des Gebäudes verteilt (Erdgeschoss, 1. und 2. Obergeschoss). Bei der Auswahl der Räume konnten alle Himmelsrichtungen und das Atrium berücksichtigt werden. Einige der untersuchten Arbeitsplätze befinden sich in Großraumbüros, einige in Zellenbüros.

Fraunhofer ISE, Freiburg

Büroräume im Institutsgebäude des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme, Heidenhofstraße 2, Freiburg

- Baujahr: 2001, Architektur: Dissing + Weitling
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 39 % bis 59 %
- Sonnen-/Blendschutz: Jalousien (außenliegend), teilweise zusätzlich Rollos (innenliegend)
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: außenliegende Jalousien automatisch (GLT), überstimbar, innenliegende Jalousien manuell
- Kunstlicht: indirekte Grundbeleuchtung mit Stehleuchten, direktstrahlende Schreibtischleuchten für Arbeitsplatzbeleuchtung
- Kunstlichtsteuerung: tageslicht- und präsenzabhängig ausschaltend
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): 3,6 W/m² bis 9,6 W/m²
- Klimatisierung: Heizkörper (Thermostatventil), Abluftanlage



Abbildung 25 Labor- und Bürogebäude des Fraunhofer ISE

Die Räume, in denen Messungen und Befragungen durchgeführt wurden, befinden sich in den Bauteilen B und D und sind auf drei Geschosse des Gebäudes verteilt (1. bis 3. Obergeschoss). Alle Räume sind nach Süden orientiert, Laborräume wurden nicht untersucht.

Solar Info Center, Freiburg

Büroräume verschiedener Unternehmen und des Fraunhofer ISE im „Solar Info Center“ (SIC), Emmy-Noether-Straße 2, Freiburg

- Baujahr: 2003, Architektur: Architekturbüro Epp
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 34 % bis 56 %
- Sonnen-/Blendschutz: Jalousien (außenliegend), teilweise zusätzlich Rollos (innenliegend)
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: außenliegende Jalousien automatisch (GLT), überstimbar, innenliegende Jalousien manuell
- Kunstlicht: direkt-indirekte Beleuchtung mit Stehleuchten
- Kunstlichtsteuerung: tageslicht- und präsenzabhängig geregelt
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): 7,4 W/m² bis 28,5 W/m²
- Klimatisierung: Heizkörper (Thermostatventil), Abluftanlage



Abbildung 26 Bürogebäude „Solar Info Center“

Die Räume, in denen Messungen und Befragungen durchgeführt wurden, wurden vom Fraunhofer ISE, der PSE AG und dem Steuerberatungsbüro Zwick genutzt. Sie befinden sich in vier Geschossen des Bauteils „West“ (2. bis 5. Obergeschoss) und im 3. Obergeschoss des Bauteils „Nord“.

Bei der Auswahl der Räume konnten alle Himmelsrichtungen berücksichtigt werden.

LBBW Stuttgart

Hochhaus am Pariser Platz, Heilbronner Straße 28, Stuttgart

- Baujahr: 2004, Architektur: Wolfram Wöhr Architekten + Partner, Wöhr Mieslinger Architekten
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 100 %
- Sonnen-/Blendschutz: Jalousien (außenliegend), zusätzlich Rollos (innenliegend)
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: außenliegende Jalousien automatisch (GLT), überstimbar, innenliegende Rollos manuell
- Kunstlicht: direkt-indirekte Beleuchtung mit Stehleuchten
- Kunstlichtsteuerung: tageslichtabhängig gedimmt
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): 8,0 W/m² bis 22,6 W/m²
- Klimatisierung: BKT, Lüftungsanlage/Klimaanlage



Abbildung 27 Hochhaus der LBBW Stuttgart

Die Räume, in denen Messungen und Befragungen durchgeführt wurden, sind auf acht Geschosse des Gebäudes verteilt (7., 9., 11. bis 15. und 17. Obergeschoss). Bei der Auswahl der Räume bzw. Arbeitsplatzgruppen konnten alle Himmelsrichtungen berücksichtigt werden, die meisten untersuchten Arbeitsplätze sind nach Südosten orientiert. Alle untersuchten Arbeitsplätze befinden sich in Großraumbüros.

UBA Dessau

Standort Dessau des Umweltbundesamtes, Wörlitzer Platz 1, Dessau

- Baujahr: 2005, Architektur: Sauerbruch Hutton
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 39 % bis 78 %
- Sonnen-/Blendschutz: Jalousien (außenliegend außer am Atrium, am Atrium innenliegend)
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: manuell
- Kunstlicht: direkte Beleuchtung mit Langfeldleuchten
- Kunstlichtsteuerung: tageslicht- und präsenzabhängig geregelt
- Installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): 8,7 W/m² bis 11,4 W/m²
- Klimatisierung: Heizkörper (Thermostatventil), Lüftungsanlage



Abbildung 28 Atrium des Umweltbundesamtes

Die Räume, in denen Messungen und Befragungen durchgeführt wurden, sind auf alle vier Geschosse des Gebäudes verteilt (Erdgeschoss und 1. bis 3. Obergeschoss).

Einige der untersuchten Räume liegen am Forum oder am Atrium, einige sind außenliegend.

Bei der Auswahl der außenliegenden Räume konnten nicht alle Himmelsrichtungen berücksichtigt werden, sie sind südost- oder ostorientiert. Bei der Auswahl der Räume am Atrium oder Forum konnten alle Himmelsrichtungen berücksichtigt werden.

LBBW Karlsruhe

Neubau der LBBW Karlsruhe, Ludwig-Erhard-Allee 4, Karlsruhe

- Baujahr: 2007, Architektur: Wilford Schupp Architekten
- Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) an der Nettofassadenfläche der untersuchten Räume: 44 % (Lochfassade) bis 71 % (Bandfassade)
- Sonnen-/Blendschutz: Jalousien (außenliegend), zusätzlich Rollos (innenliegend)
- Steuerung Sonnen-/Blendschutz: außenliegende Jalousien automatisch (GLT), überstimbar, innenliegende Rollos manuell
- Kunstlicht: direkt-indirekte Beleuchtung mit Stehleuchten
- Kunstlichtsteuerung: tageslicht- und präsenzabhängig geregelt
- installierte Leistung Kunstlicht (Grundbeleuchtung, ohne Schreibtischleuchten): 7,3 W/m² bis 13,1 W/m²
- Klimatisierung: Heizkörper (Thermostatventil), Lüftungsanlage/Klimaanlage



Abbildung 29 Bürogebäude der LBBW Karlsruhe

Die Räume, in denen Messungen und Befragungen durchgeführt wurden, sind auf drei Geschosse des Gebäudes verteilt (1., 3. und 4. Obergeschoss). Bei der Auswahl der Räume bzw. Arbeitsplatzgruppen konnten nicht alle Himmelsrichtungen berücksichtigt werden, die untersuchten Räume sind nach Süden oder nach Norden orientiert. Etwa die Hälfte der untersuchten Arbeitsplätze befindet sich in Großraumbüros, die andere Hälfte in Zellenbüros.

5.1.2 Räume

Alle vier Messungen und Befragungen eines Gebäudes wurden möglichst in denselben Räumen und mit denselben Probanden durchgeführt.

Teilweise wurden Räume zwischen zwei Untersuchungszeiträumen umgenutzt. Bei der Folgebefragung waren dann Räume (oder Arbeitsbereiche in Großraumbüros) nicht belegt, die in der vorhergehenden Befragung berücksichtigt worden waren. In diesen Fällen wurde am Tag des Messaufbaus versucht, adäquate Ersatzräume zu finden, deren Nutzer ebenfalls bereit waren, an der Untersuchung teilzunehmen. Wegen dieser notwendigen Ersatzräume hat die Untersuchung in einigen Gebäuden in mehr als 15 verschiedenen Räumen stattgefunden (siehe Tabelle 5).

In jedem Untersuchungszeitraum wurden 15 Räume parallel untersucht. Ausnahme ist ein Gebäude, in dem mehrere von der Untersuchung betroffene Räume überraschend umgenutzt wurden. Am Tag des Messaufbaus wurde für einen der weggefallenen Räume kein Ersatz gefunden, daher wurden in diesem Gebäude im betroffenen Messzeitraum nur vierzehn Räume untersucht.

Insgesamt wurden Messungen und Befragungen in 161 verschiedenen Räumen durchgeführt. In 21 Räumen hat sich die Anzahl genutzter Arbeitsplätze im Lauf der Untersuchung geändert, in allen 21 Fällen ist 1 Nutzer hinzugekommen oder weggefallen.

Die folgende Tabelle 4 gibt die Nutzung an, die während der überwiegenden Anzahl der Messzeiträume vorlag.

Büroform (Nutzung)	Anzahl Räume
Einzelbüro	6
Zweipersonenbüro	70
Dreipersonenbüro	17
Vierpersonenbüro	18
Fünfpersonenbüro	3
Sechspersonenbüro	5
Großraumbüro mit mindestens sieben Nutzern	42

Tabelle 4 Anzahl der untersuchten Räume verschiedener Büroformen. Die Zuordnung zu einer Büroform erfolgt entsprechend der Anzahl der im Büro tatsächlich genutzten Arbeitsplätze.

Pro Raum und Messdatensatz wurden durchschnittlich 1,8 Fragebögen ausgefüllt. In 26 Fällen (4,8 %) wurde am Ende einer Messperiode für einen Messdatensatz kein Fragebogen ausgefüllt, in der Regel wegen Krankheit oder einer unerwarteten Dienstreise der Nutzer. Das Maximum lag bei fünf Fragebögen, die am Ende einer Messperiode für einen Raum ausgefüllt wurden, was vier Mal der Fall war.

5.1.3 Probanden

An der Untersuchung haben 461 Probanden teilgenommen.

Die Rücklaufquote wurde nicht erfasst. An allen Arbeitsplätzen, die bei der Untersuchung berücksichtigt wurden, wurde an jedem Befragungstag ein Fragebogen ausgegeben und in der Regel auch ausgefüllt, sofern die Probanden am Arbeitsplatz waren. Die Probanden hatten bei der Festlegung der Räume im Vorfeld der Untersuchung sowie beim Auf- und Abbau aller vier Messungen Kontakt zur Autorin und einer studentischen Hilfskraft. Dieser Kontakt und die persönliche Bitte um die Mitarbeit trugen zu einer hohen Rücklaufquote von schätzungsweise über 90 % bei. Nur wenige Fragebögen wurden wegen zu großer Arbeitsbelastung der Probanden nicht ausgefüllt, obwohl die Probanden am Arbeitsplatz waren.

Gebäude	Anzahl Räume	Anzahl Probanden	Anzahl Fragebögen	Anzahl Fragebögen je Proband (Mittelwert)
Uni Karlsruhe	16	44	102	2,3
LBBW Mannheim	15	41	107	2,6
DB Netz AG, Karlsruhe	17	40	85	2,1
Braun GmbH, Kronberg	21	41	81	2,0
ISE, Freiburg	15	84	162	1,9
SIC, Freiburg	15	45	108	2,4
LBBW Stuttgart	25	71	123	1,7
UBA Dessau	21	47	88	1,9
LBBW Karlsruhe	16	48	121	2,5
insgesamt	161	461	977	2,1

Tabelle 5 Anzahl der untersuchten Räume, der beteiligten Probanden, der ausgefüllten Fragebögen und der durchschnittlichen Anzahl ausgefüllter Fragebögen pro Proband für die verschiedenen Gebäude und die gesamte Stichprobe

Idealerweise läge von jedem Probanden eine Beurteilung seines Arbeitsplatzes in jeder Jahreszeit vor, also vier Fragebögen pro Proband. Tatsächlich wurden durchschnittlich nur 2,1 Fragebögen pro Proband ausgefüllt, weil die Nutzer im Untersuchungszeitraum beispielsweise im Urlaub, auf Dienstreise oder krank waren oder im Laufe des Jahres, in dem die Untersuchung stattgefunden hat, den Raum gewechselt haben. 71 Probanden (15 %) haben vier Fragebögen ausgefüllt. Insgesamt liegen 977 ausgefüllte Fragebögen vor.

Alter und Geschlecht der Teilnehmer - Mittelwert aller Gebäude

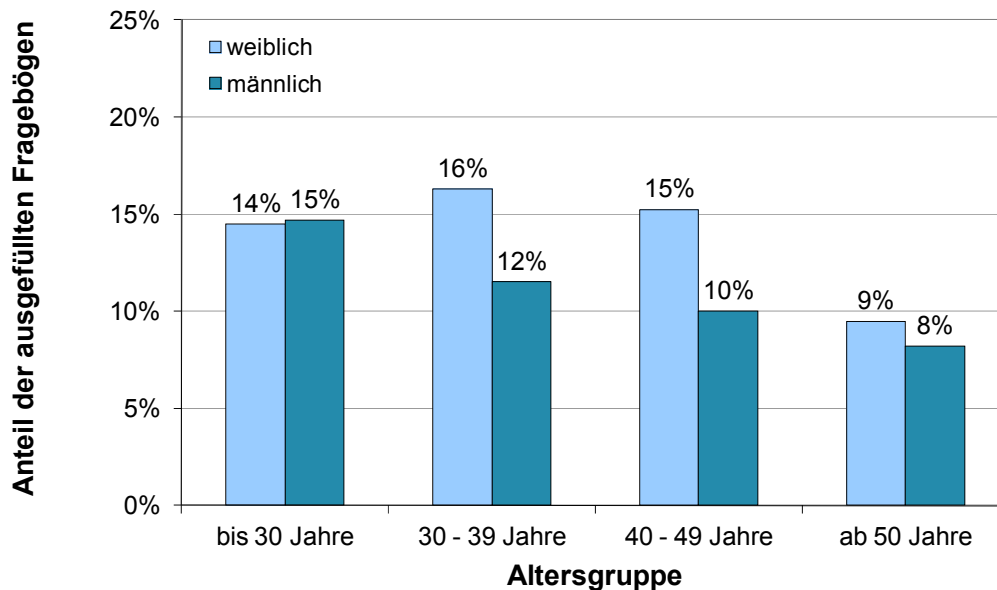


Abbildung 30 Anteil ausgefüllter Fragebögen in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht der Probanden

540 Fragebögen (55,3 %) wurden von Frauen ausgefüllt, 429 (43,9 %) von Männern. Bei 8 Fragebögen (0,8 %) liegt keine Angabe zum Geschlecht des Probanden vor.

Bei 39 Fragebögen (4,0 %) ist das Alter der Probanden nicht bekannt. Die Verteilung auf die Altersklassen ist insgesamt recht ausgewogen (siehe Abbildung 30). Dabei gibt es jedoch deutliche Unterschiede zwischen den neun Gebäuden (siehe Anhang A4).

Die Nutzer waren zum Zeitpunkt der Befragung durchschnittlich 4,6 Jahre im jeweiligen Gebäude beschäftigt (min. 1 Woche, max. 29,0 Jahre, $N=936$) und durchschnittlich seit 2,4 Jahren an dem Arbeitsplatz, zu dem sie befragt wurden (min. 1 Woche, max. 13,8 Jahre, $N=923$).

917 Nutzer gaben an, zu welchen Zeiten sie üblicherweise arbeiten. 788 Nutzer (86 %) gaben ca. 8 Stunden tägliche Arbeitszeit an, 129 Nutzer (14 %) arbeiteten nicht an allen Tagen oder Teilzeit (überwiegend vormittags).

Die meisten Probanden verfügten zum Zeitpunkt der Befragung also bereits über mehrere Jahre Erfahrung mit dem Gebäude und auch mit ihrem Arbeitsplatz, und die meisten Probanden konnten auch Auskunft über die gesamte Arbeitszeit des Messzeitraums geben.

5.2 Ergebnisse der Nutzerbefragung

Die Befragung der Nutzer diente dazu, Bewertungen der aktuellen Situation zu erfassen und die Zufriedenheit mit der Beleuchtung und mit verschiedenen anderen Aspekten des Raumklimas wie Temperatur und Luftqualität zu ermitteln. Anhand dieser Angaben, der vorliegenden Messwerte und der erfassten Gebäudeparameter wurde mit Hilfe der vorgestellten statistischen Methoden analysiert, welche Parameter die Bewertung der momentan vorhandenen Bedingungen und die Zufriedenheit der Nutzer mit verschiedenen Aspekten der Beleuchtung und des Raumklimas in der vorliegenden Stichprobe beeinflussen. Die Bewertung von Sonnen- und Blendschutz und der Kunstlichtanlage wurden dabei berücksichtigt, ebenso architektonische Parameter wie die Fenstergröße (Rohbauöffnung), Atrien und die Büroform (Zellenbüro/Großraumbüro).

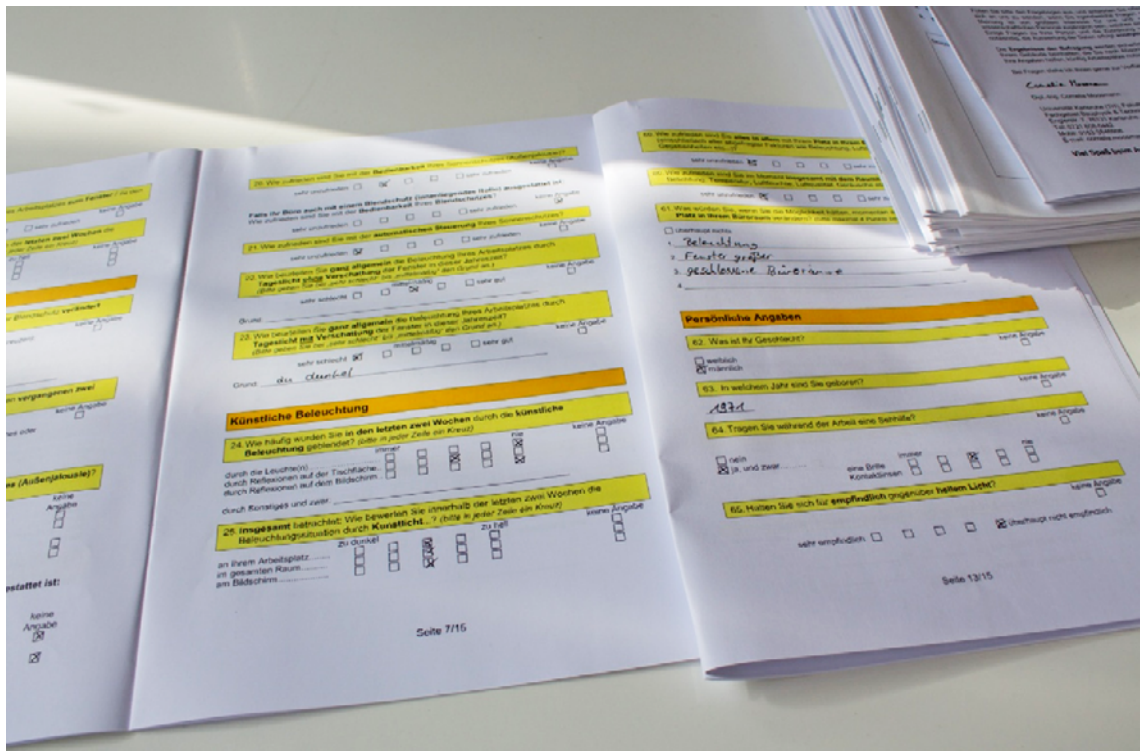


Abbildung 31 Ausgefüllte Fragebögen

Mit den aus den Messdaten ermittelten Nutzereingriffen liegen weitere Informationen vor, unter welchen Bedingungen Nutzer ihre Situation ändern – also mit der zuvor vorhandenen Situation nicht zufrieden waren – und welche Bedingungen sie herstellen. Die Auswertung der identifizierten Nutzereingriffe bildet den dritten Teil des Kapitels „Ergebnisse“.

Messwerte der spektralen Verteilung des Lichts an den untersuchten Arbeitsplätzen, der Einfluss des Sonnen- und Blendschutzes auf die spektrale Verteilung des Tageslichts und die gemessenen Tageslichtquotienten werden im vierten Teil dieses Kapitels vorgestellt.

5.2.1 Beeinträchtigung durch das Raumklima

Die Nutzer geben – bei großer Streuung – mehrheitlich an, durch Aspekte des Raumklimas wie Geräusche, Temperatur und Luftqualität während des Messzeitraums wenig in ihrer Leistungsfähigkeit beeinträchtigt gewesen zu sein. Die Beleuchtung wird im Mittel als „kaum beeinträchtigend“ und damit positiver bewertet als die übrigen abgefragten Aspekte (Abbildung 32).

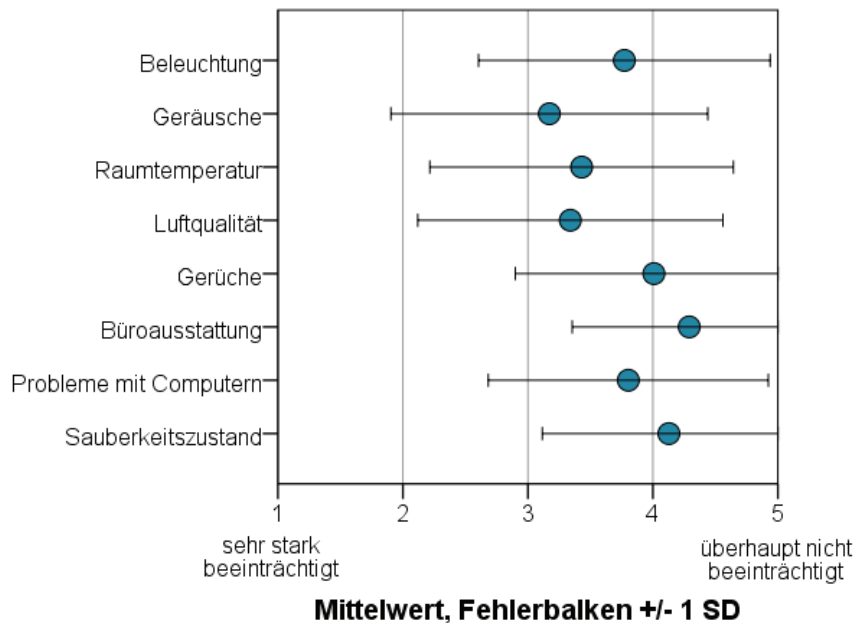


Abbildung 32 Mittelwerte und Standardabweichungen der empfundenen Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit durch Beleuchtung, durch verschiedene Aspekte des Raumklimas, Ausstattung und Sauberkeit des Arbeitsplatzes

Die Bewertung der Beeinträchtigung durch die Raumtemperatur ist stark abhängig von der Jahreszeit. Sie liegt im Sommer bei durchschnittlich 2,86, in den übrigen Jahreszeiten wird sie mit 3,46 bis 3,63 signifikant positiver bewertet („sehr stark beeinträchtigt“=1 ... „überhaupt nicht beeinträchtigt“=5; ANOVA: $F=22.1$, $p<0.001$, $N=956$, Effektstärke $f=0.26$).

Die Bewertung der Beeinträchtigung durch Geräusche hängt von der Büroform ab: Sie liegt in Großraumbüros im Mittel bei 2,52, in Zellenbüros ist die Bewertung signifikant besser mit durchschnittlich 3,35 (ANOVA: $F=82.3$, $p<0.001$, $N=954$, Effektstärke $f=0.29$).

Die Bewertung der momentanen Beeinträchtigung durch das Raumklima insgesamt entspricht der Bewertung der Einzelaspekte im Messzeitraum. Auch die momentane Beeinträchtigung durch das Raumklima wird im Mittel als „wenig beeinträchtigend“ bewertet (Mittelwert 3,65; „sehr stark beeinträchtigt“=1 ... „überhaupt nicht beeinträchtigt“=5, $N=965$).

Aus der Beobachtung, dass die Nutzer sich mehrheitlich kaum von der Beleuchtung beeinträchtigt fühlen, kann nicht geschlossen werden, dass die Beleuchtung keine große Bedeutung für die (empfundene) Leistungsfähigkeit der Nutzer hat.

Die empfundene momentane Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit wird stärker von der Zufriedenheit mit der momentanen Helligkeit am Arbeitsplatz beeinflusst als von der Zufriedenheit mit der momentanen Temperatur, die die beiden wichtigsten Einflussgrößen sind. Zusammen mit dem Geschlecht und der Bewertung von Geräuschpegel und Luftqualität erklären diese beiden Bewertungen 39 % der Streuung (Regressionsanalyse, Hybridmodell, unbalanced panel: $R^2=0.386$, $R^2_{korr}=0.379$, $F=42.4$, $N=620$; Details siehe Anhang A5).

5.2.2 Beleuchtung

Der große Einfluss der Zufriedenheit mit der Helligkeit auf die empfundene Beeinträchtigung der Arbeitsleistung durch das Raumklima bestätigt die Bedeutung der Beleuchtung für die Nutzer. Damit stellt sich die Frage, welche Anforderungen die Nutzer an die Beleuchtung ihres Arbeitsplatzes haben, ob diese der aktuellen Normung entsprechen und welche Faktoren die Zufriedenheit beeinflussen.

Die Befragungen haben überwiegend vormittags stattgefunden, an den Arbeitsplätzen stand daher in der Regel Tageslicht zur Verfügung. Bei 27,5 % der Befragungen ($N=677$) war (ergänzend zum Tageslicht) das Kunstlicht eingeschaltet. Abbildung 33 zeigt die horizontale Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz in Abhängigkeit vom Schaltzustand des Kunstlichts und der Helligkeitsbewertung der Nutzer.

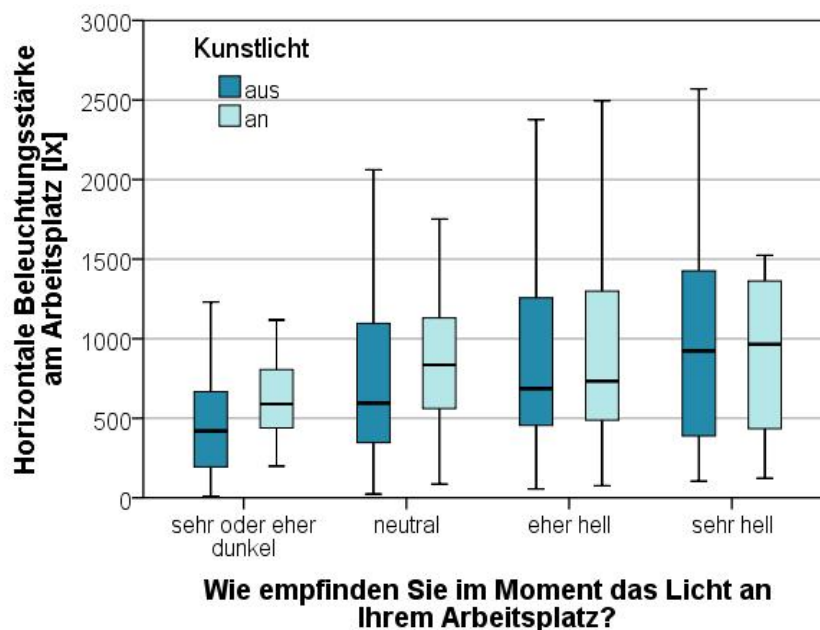


Abbildung 33 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz während der Befragung über der Nutzerbewertung der Helligkeit in Abhängigkeit vom Schaltzustand des Kunstlichts

Die Varianzanalyse zeigt den signifikanten Einfluss der horizontalen Beleuchtungsstärke auf die Helligkeitsbewertung („sehr oder eher dunkel“=2 ... „sehr hell“=5; ANOVA: $F=31.8$, $p<0.001$, $N=758$, Effektstärke $f=0.20$). Der Schaltzustand des Kunstlichts beeinflusst die Bewertung nicht signifikant.

Die Mehrheit der Nutzer empfindet das Licht an ihrem Arbeitsplatz zum Zeitpunkt der Befragung als weder hell noch dunkel. Dabei bestehen signifikante Unterschiede zwischen den Jahreszeiten: Im Frühling und Sommer wird der Arbeitsplatz als weniger hell empfunden als im Herbst und Winter (Frühling 3,23, Sommer 3,17, Herbst 3,46, Winter 3,43 bei „sehr dunkel“=1 ... „sehr hell“=5; ANOVA: $F=7.42$, $p<0.001$, $N=942$, Effektstärke $f=0.15$).

Das entspricht nicht den gemessenen Beleuchtungsstärkewerten zum Zeitpunkt der Befragung. Die Mittelwerte der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz während der Befragung liegen im Frühling (1046 lx) und Sommer (927 lx) höher als im Herbst (875 lx) und Winter (787 lx). Der Wertebereich, der im Sommer als weder hell noch dunkel empfunden wird, wird im Winter als sehr hell bewertet, wie in Abbildung 34 zu sehen ist. Möglicherweise hat hier – wie auch beim thermischen Komfort – die Adaptation der Nutzer oder ihre Erwartung einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Helligkeit.

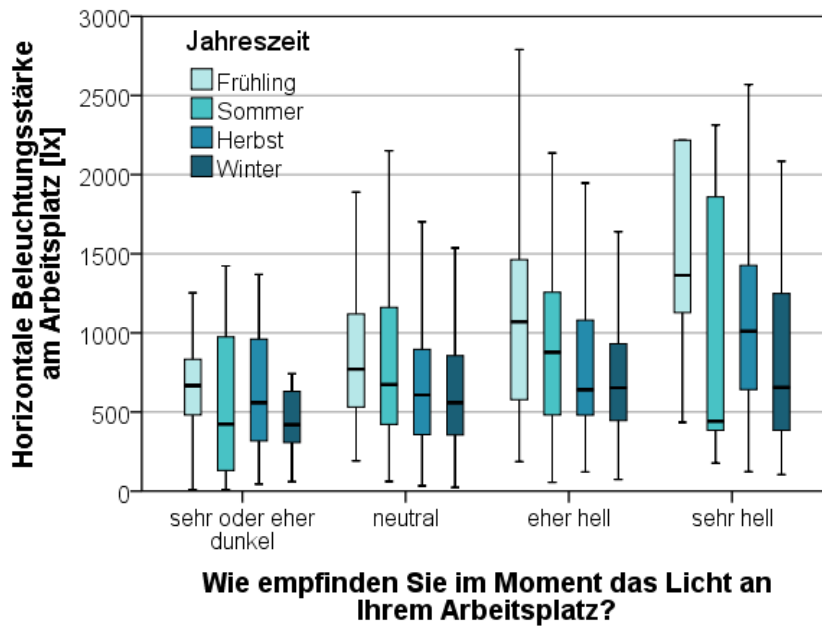


Abbildung 34 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz während der Befragung über der Nutzerbewertung der Helligkeit in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Das Urteil „sehr dunkel“ wurde nur bei acht der 977 Befragungen abgegeben (0,8 %). Für zwei dieser Nutzerurteile liegen keine Beleuchtungsstärkemesswerte vor, so dass bei der Auswertung nur sechs Fälle mit dem Nutzerurteil „sehr dunkel“ berücksichtigt werden können. Zwei dieser sechs Nutzerbewertungen wurden bei Beleuchtungsstärken abgegeben, die höher liegen als der Mittelwert des Nutzerurteils „eher dunkel“. Aufgrund der geringen Anzahl Fälle in der Kategorie „sehr dunkel“ haben diese beiden Fälle einen großen Einfluss bei der statistischen Auswertung (sogenannte „einflussreiche Beobachtungen“). Um eine Verzerrung der Ergebnisse durch diese beiden Fälle zu verhindern, müssten sie von der Auswertung ausgeschlossen werden. Dann stünden in der Kategorie nur noch vier Fälle zur Verfügung, weshalb die Kategorie „sehr dunkel“ für die weitere Auswertung mit der Kategorie „eher dunkel“ zusammengefasst wurde.

Trotz der unterschiedlichen Bewertung ähnlicher Messwerte in verschiedenen Jahreszeiten besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Bewertung der Helligkeit und der horizontalen Beleuchtungsstärke (*Pearson's $r=0.20$, $p<0.001$, $N=758$*).

Die logarithmierte horizontale Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz (natürlicher Logarithmus) und die Jahreszeit können jedoch nur 21 % der großen Streuung der Nutzerbewertung der Helligkeit erklären, die Helligkeitsbewertung wird von weiteren Faktoren beeinflusst.

Um Arbeitsplätze planen zu können, die den Anforderungen der Nutzer entsprechen, ist die Zufriedenheit der Nutzer mit der Lichtsituation von größerer Bedeutung als die Helligkeitsbewertung dieser Situation. Daher wurden auch Wünsche zur Änderung der Helligkeit erfragt. Wenn keine Veränderung der Helligkeit gewünscht wird, wird davon ausgegangen, dass der befragte Nutzer mit der vorhandenen Helligkeit zufrieden ist.

Bei 67 % der Befragungen gaben die Nutzer an, keine Änderung des Helligkeitsniveaus zu wünschen ($N=833$). Mit der – im Rahmen der Möglichkeiten des jeweiligen Gebäudes und in Abstimmung mit den Kollegen – selbst gewählten Helligkeit sind die Nutzer also überwiegend zufrieden. Der Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz bei diesem Nutzerurteil liegt bei 966 lx.

Nur 9 % der Probanden gaben an, sie würden ein „eher dunkleres“ oder „deutlich dunkleres“ Helligkeitsniveau bevorzugen (Mittelwert 992 lx horizontal). Der Anteil Nutzer, der seinen Arbeitsplatz „eher heller“ oder „deutlich heller“ wünscht, ist mit 24 % deutlich größer. Der Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke, die den befragten Nutzern zu dunkel ist, liegt mit 705 lx deutlich über dem für die künstliche Beleuchtung von Büroarbeitsplätzen mindestens einzuhaltenden Wartungswert der Beleuchtungsstärke von 500 lx nach DIN EN 12464-1:2011-08 (Tabelle 5.26 – Büros, S. 34).

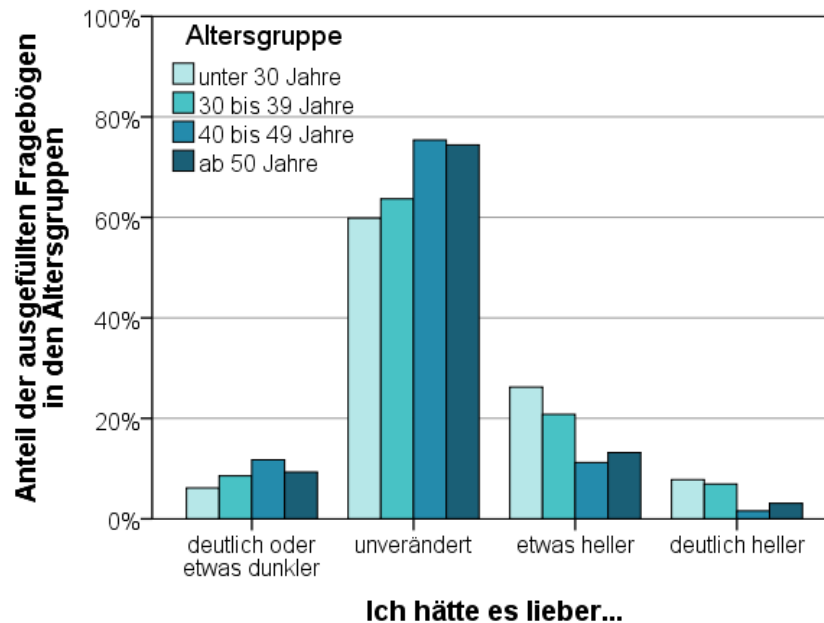


Abbildung 35 Häufigkeit der Nennung von Änderungswünschen der Helligkeit am Arbeitsplatz in Abhängigkeit vom Alter der Befragten

Die Änderungswünsche der Nutzer bezüglich der Helligkeit werden vom Alter der Befragten beeinflusst (Abbildung 35). Bei 7 % der Befragungen von Nutzern unter 40 Jahren ($N=489$) wird der Wunsch nach weniger Helligkeit geäußert, bei 31 % der Befragungen wünscht der Nutzer mehr Licht. Der Wunsch nach mehr Helligkeit tritt damit bei jüngeren Probanden deutlich häufiger auf als bei älteren: Bei 11 % der Befragungen von Nutzern über 40 Jahren ($N=316$) wird eine geringere Helligkeit gewünscht und nur bei 14 % eine größere Helligkeit.

Auch die Lichtsituationen, bei denen die Nutzer keine Änderung der Helligkeit wünschen, unterscheiden sich je nach Alter der Nutzer (Abbildung 36). Die horizontale Beleuchtungsstärke, bei der die Nutzer mit der Helligkeit zufrieden sind, liegt bei Nutzern unter 30 Jahren im Mittel bei 1168 lx, bei Nutzern über 50 Jahren im Mittel bei 834 lx (Mittelwert 30 bis 39 Jahre 1006 lx, 40 bis 49 Jahre 883 lx; ANOVA: $F=2.80$, $p=0.040$, $N=433$, Effektstärke $f=0.14$).

Diese Beobachtung steht im Widerspruch zu dem Umstand, dass ältere Menschen wegen der Trübung der Augenlinsen für die gleiche Sehaufgabe eine höhere Beleuchtungsstärke benötigen als jüngere Menschen (Schierz, 2008). Möglicherweise ist die mit dem Alter zunehmende Blendempfindlichkeit der Grund für den Wunsch nach weniger Licht.

In der vorliegenden Stichprobe korreliert die von den Probanden selbst eingeschätzte Blendempfindlichkeit erwartungsgemäß mit dem Alter (Pearson's $r=-0.19$, $p<0.001$, $N=922$). Der Zusammenhang zwischen Blendempfindlichkeit und Änderungswunsch ist stärker (Pearson's $r=0.19$, $p<0.001$, $N=816$) als der zwischen Alter und Änderungswunsch (Pearson's $r=0.17$, $p<0.001$, $N=805$).

Da das Alter der Nutzer im Gegensatz zur Blendempfindlichkeit objektiv ermittelt werden konnte und auch bei der Planung von Lichtlösungen eher Angaben über die Altersstruktur der Nutzer vorliegen als über deren Blendempfindlichkeit, wurde bei der weiteren Auswertung der Wünsche zur Helligkeit am Arbeitsplatz trotz der stärkeren Korrelation der Blendempfindlichkeit das Alter und nicht die Blendempfindlichkeit der Nutzer berücksichtigt.

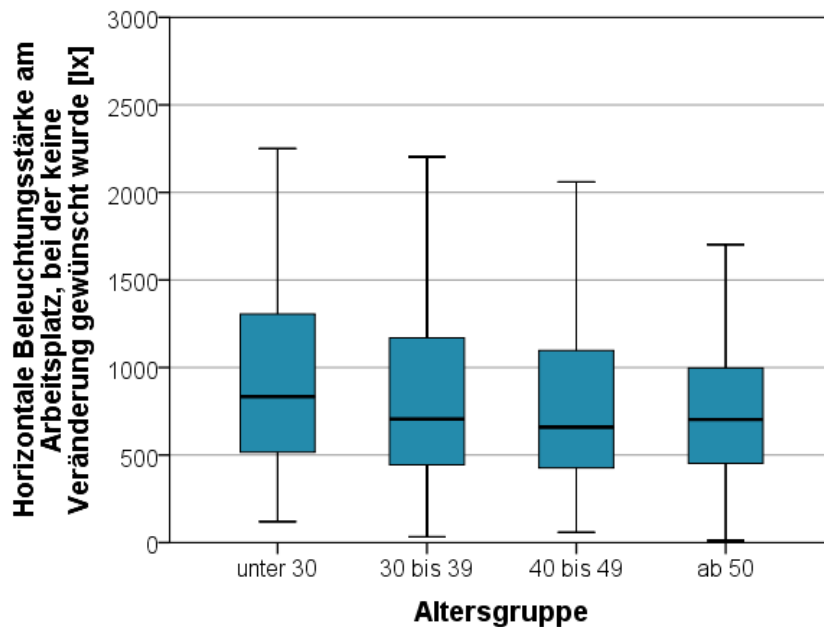


Abbildung 36 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz, bei der keine Veränderung gewünscht wurde, über dem Alter der Befragten

Neben der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz wurde auch die zylindrische Beleuchtungsstärke 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 DIN EN 12464-1 vergleichbar, die sich auf den „Tätigkeitsbereich“ beziehen.

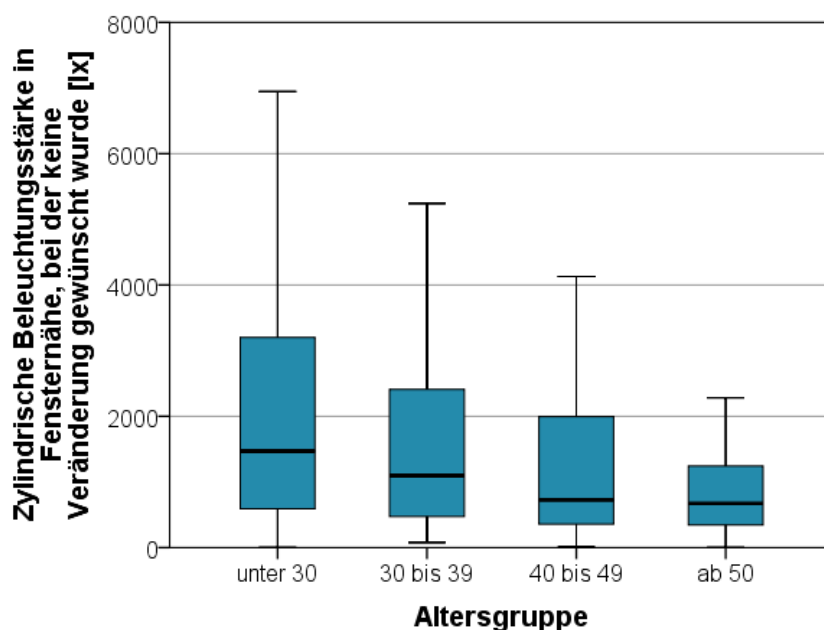


Abbildung 37 Boxplot der zylindrischen Beleuchtungsstärke in Fensternähe, bei der keine Veränderung gewünscht wurde, über dem Alter der Befragten

Der Mittelwert der zylindrischen Beleuchtungsstärke während der Befragungen, bei denen die Nutzer keine Änderung der Helligkeit wünschen, liegt bei 1727 lx in Fensternähe, und damit deutlich über dem in der Norm angegebenen Mindestwert von 150 lx im Tätigkeitsbereich, der in Büros nicht unterschritten werden soll (DIN EN 12464-1:2011-08, S. 16).

Die zylindrische Beleuchtungsstärke, bei der die Nutzer keine Veränderung wünschen, unterscheidet sich – wie die präferierte horizontale Beleuchtungsstärke – signifikant in Abhängigkeit vom Alter der Nutzer (Mittelwert unter 30 Jahre 2341 lx, 30 bis 39 Jahre 1893 lx, 40 bis 49 Jahre 1415 lx, ab 50 Jahre 1081 lx; ANOVA: $F=8.65$, $p<0.001$, $N=500$, Effektstärke $f=0.23$). Die altersabhängigen Unterschiede sind deutlicher als bei der horizontalen Beleuchtungsstärke (Abbildung 37).

Auch das deutet darauf hin, dass die zunehmende Blendempfindlichkeit Grund für den Wunsch älterer Probanden nach geringerer Helligkeit im Raum ist. Während eine höhere horizontale Beleuchtungsstärke in erster Linie zu einer höheren Leuchtdichte von (Papier-)Unterlagen führt und damit zu einer besseren Lesbarkeit, kann eine hohe zylindrische Beleuchtungsstärke in Fensternähe mit Direktblendung oder (störenden) Reflexen auf dem Monitor einhergehen.

Da die untersuchten Arbeitsplätze Tageslicht versorgt sind und die Befragungen fast ausschließlich unter Tageslichtbedingungen stattgefunden haben, sind die horizontale und die zylindrische Beleuchtungsstärke nicht unabhängig voneinander – schräg einfallendes Tageslicht beeinflusst beide Messwerte. In der weiteren Auswertung wurde die horizontale Beleuchtungsstärke berücksichtigt, weil dieser Größe aktuell bei der Planung von Arbeitsplätzen die größere Rolle beigemessen wird (Mindestanforderungen an die zylindrische Beleuchtungsstärke wurden erst 2011 in DIN EN 12464-1 aufgenommen, ebd., S. 2), und weil für diese Größe arbeitsplatzbezogene Messwerte vorliegen, während die zylindrische Beleuchtungsstärke nur raumweise in Fensternähe gemessen werden konnte.

Das *gewünschte* horizontale Beleuchtungsstärkeniveau am Arbeitsplatz wird neben dem Alter (bzw. der Blendempfindlichkeit) von weiteren Faktoren beeinflusst:

- der Außenbeleuchtungsstärke als wichtigste Einflussgröße (je höher die Außenbeleuchtungsstärke, desto höher die gewünschte Helligkeit am Arbeitsplatz),
- der Jahreszeit (im Frühling werden – zusätzlich zur Abhängigkeit von der Außenbeleuchtungsstärke – höhere Beleuchtungsstärken gewünscht als im Sommer oder Herbst),
- der vom Nutzer angegebenen Häufigkeit der Abstimmung mit Kollegen bezüglich des Kunstlichts, die mit der Anzahl Mitarbeiter im Raum zunimmt (je weniger Abstimmung desto höhere Beleuchtungsstärke, desto eher also wird das Kunstlicht eingeschaltet),
- der vom Nutzer angegebenen Häufigkeit der Abstimmung mit Kollegen bezüglich des Sonnenschutzes (je weniger Abstimmung desto niedrigere Beleuchtungsstärke, desto eher also wird der Sonnenschutz geschlossen),
- der Nutzerbewertung des Ausblicks aus dem Fenster (je angenehmer der Ausblick desto höher die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz),
- dem Fensterflächenanteil des Raumes (je größer der Anteil Fensterfläche bezogen auf die Innenfassadenfläche desto höher die Beleuchtungsstärke).

Diese Faktoren können der Regressionsanalyse zufolge 48 % der großen Streuung erklären (RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.481$, $R^2_{korr}=0.467$, $F=34.0$, $N=342$; Details siehe Anhang A6).

Räume, deren Fenster zu einem Atrium orientiert sind, wurden bei dieser Analyse ausgeschlossen. Während die Beleuchtungsstärke, bei der Nutzer keine Veränderung wünschen, bei außenliegenden Räumen im Mittel 999 lx beträgt, ist der entsprechende Wert bei Räumen an Atrien mit 560 lx nur wenig mehr als halb so hoch. Dieser Unterschied ist signifikant (ANOVA: $F=7.78$, $p=0.006$, $N=454$, Effektstärke $f=0.13$).

Nutzer von Räumen an Atrien wünschen sich mit 28,6 % ($N=63$) etwas häufiger mehr Licht am Arbeitsplatz als Nutzer außenliegender Räume (23,7 %, $N=770$).

Die Einflussfaktoren zeigen, dass die Erwartungen an die Helligkeit im Raum von den Außenbedingungen und auch von der Architektur beeinflusst werden. In Räumen an Atrien erwarten die Nutzer weniger Helligkeit und akzeptieren niedrigere Beleuchtungsstärken, große Fensterflächen nach außen dagegen wecken den Wunsch nach hohen Beleuchtungsstärken.

Dementsprechend ist der Wertebereich der Beleuchtungsstärken, die den Wünschen der Nutzer entsprechen, in Gebäuden mit Lochfassaden (Fassaden mit einzelnen Fenstern) niedriger als in Gebäuden mit Bandfassaden (Fensterbänder, moderate Fensterflächenanteile), und in diesen – im Frühling und Winter – niedriger als bei Gebäuden mit Ganzglasfassaden (Abbildung 38).

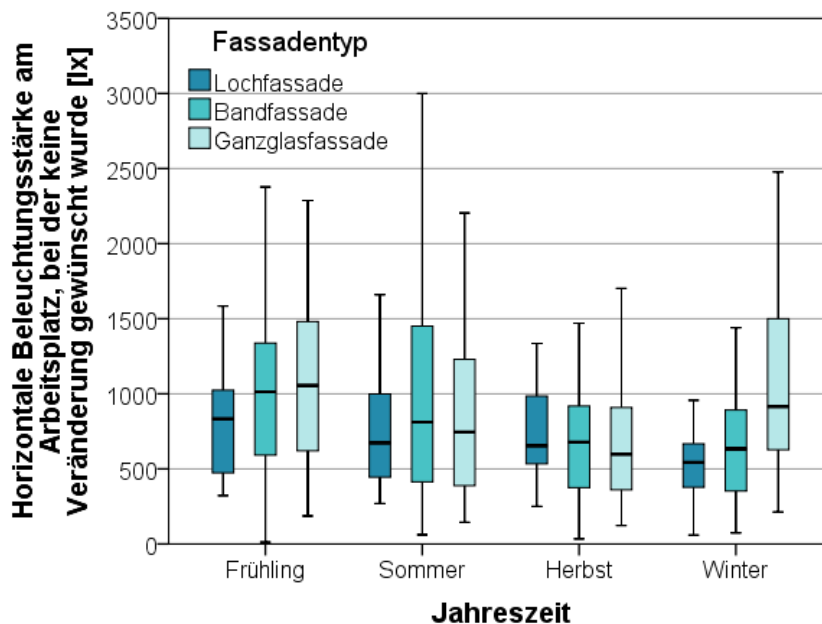


Abbildung 38 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz, bei der keine Veränderung gewünscht wurde, über der Jahreszeit in Abhängigkeit vom Fassadentyp

Im Sommer und Herbst (Kühlperiode) werden in Gebäuden mit Ganzglasfassaden niedrigere Beleuchtungsstärkewerte gewünscht als in Gebäuden mit Bandfassaden. Der neutrale Wertebereich ist in Gebäuden mit Ganzglasfassaden damit niedriger als aufgrund des Fensterflächenanteils zu erwarten wäre.

Hier spielt der regelmäßige Einsatz des Sonnenschutzes (potentiell hohe thermische Solarlast, Blendung durch Tageslicht) eine entscheidende Rolle. Der Umgang mit dem Sonnenschutz unterscheidet sich in Abhängigkeit vom Fassadentyp. Betrachtet man die Nutzer, die mit der Helligkeit an ihrem Arbeitsplatz zufrieden sind, ergeben sich folgende Häufigkeiten (Tabelle 6):

	Anteil der individuellen Arbeitszeit mit geschlossenem Sonnenschutz (mindestens 80 % der Fensterfläche verschattet)
Lochfassade	9,2 % (Sommer: 8,6 %, Herbst 9,1 %)
Bandfassade	8,6 % (Sommer: 16,5 %, Herbst 5,1 %)
Ganzglasfassade	16,7 % (Sommer: 27,1 %, Herbst 13,6 %)

Tabelle 6 Anteil der individuellen Arbeitszeit mit geschlossenem Sonnenschutz für die untersuchten Fassadentypologien

Der Sonnenschutz wird von Nutzern mit Ganzglasfassade insgesamt signifikant häufiger bzw. länger geschlossen (ANOVA: $F=8.94$, $p<0.001$, $N=515$, Effektstärke $f=0.19$). Besonders groß ist der Unterschied im Sommer, wo der thermische Komfort beim Einsatz des Sonnenschutzes eine große Rolle spielt.

Nutzer, die den Sonnenschutz einsetzen, weil ihnen zu warm ist, wünschen bei einem Mittelwert von 922 lx am Arbeitsplatz keine Veränderung, während Nutzer, die diesen Grund nicht angegeben haben, bei durchschnittlich 1084 lx keine Veränderung wünschen ($N=329$).

Nutzer in Gebäuden mit Ganzglasfassaden verbinden das Tageslicht im Sommer offenbar stärker mit unerwünschten Wärmeeinträgen als die Nutzer anderer Gebäude, schützen sich stärker vor diesen und bevorzugen dementsprechend auch ein etwas niedrigeres Helligkeitsniveau.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Mehrheit der Probanden bei Messwerten der horizontalen und zylindrischen Beleuchtungsstärke zufrieden ist, die deutlich über den normativen Mindestanforderungen für Büroarbeitsplätze liegen. Jüngere Nutzer bevorzugen sehr hohe Beleuchtungsstärken, während ältere Nutzer etwas geringere Helligkeitsniveaus präferieren, vermutlich weil hohe vertikale Beleuchtungsstärken bei älteren Nutzern häufiger störende Blendung verursachen.

Besonders im Frühling und bei großen Fensterflächenanteilen werden hohe Beleuchtungsstärkewerte geschätzt, im Sommer wird die gewünschte Helligkeit vom thermischen Komfort und dem Schutz vor hohen Wärmeeinträgen beeinflusst.

Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass die Nutzerbewertung der Helligkeit von der horizontalen bzw. zylindrischen Beleuchtungsstärke beeinflusst wird, und dass die von den Nutzern präferierte Beleuchtungsstärke von der Jahreszeit, dem Alter der Nutzer und dem Ausblick beeinflusst wird.

Als weitere Faktoren konnten die architektonischen Parameter Fensterflächenanteil und Atrium identifiziert werden, sowie die von den Nutzern angegebene Häufigkeit der Abstimmung mit Kollegen bezüglich des Kunstlichts und bezüglich des Sonnenschutzes, die mit der Anzahl Mitarbeiter im Raum zunimmt.

Die Hypothese, dass die Zufriedenheit mit der Temperatur den visuellen Komfort beeinflusst, wird von den Ergebnissen gestützt, dass Nutzer in Gebäuden mit Ganzglasfassaden den Sonnenschutz insbesondere im Sommer signifikant häufiger bzw. länger schließen als die Nutzer anderer Gebäude, und dass Nutzer, die sich mit dem Sonnenschutz vor Wärmeeinträgen schützen möchten, eine geringere Beleuchtungsstärke bevorzugen.

5.2.3 Tageslichtversorgung

Die Zufriedenheit der Nutzer mit der Tageslichtversorgung ist ein Aspekt der Zufriedenheit mit der Beleuchtung. Sie korreliert mit der Zufriedenheit mit der momentanen Helligkeit am Arbeitsplatz (*Pearson's* $r=0.23$, $p<0.001$, $N=734$), der Mittelwert beträgt 3,47 („sehr schlecht“=1 ... „sehr gut“=5, $N=854$).

Die wichtigsten Einflussfaktoren der Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung (*ohne* Sonnenschutz) sind

- der Ausblick (je angenehmer desto besser die Tageslichtversorgung),
- die Häufigkeit von Reflexionen auf dem Bildschirm im Messzeitraum (je seltener desto besser die Tageslichtversorgung),
- die Zufriedenheit mit der Größe der Fensterfläche,
- die Blendempfindlichkeit der Nutzer (je weniger blendempfindlich desto besser die Tageslichtversorgung),
- der Abstand des Arbeitsplatzes von der Fensterfassade (je kleiner desto besser die Tageslichtversorgung).

Diese fünf Variablen erklären bei Räumen, die nicht an einem Atrium liegen, 27 % der Streuung (Regressionsanalyse, Hybrid-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.271$, $R^2_{\text{korrr}}=0.267$, $F=26.4$, $N=648$; Details siehe Anhang A7) – offenbar spielen weitere Faktoren eine Rolle, die von dem Modell nicht erfasst werden.

Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung oder die Jahreszeit beeinflussen die Bewertung nicht signifikant – die Nutzer bewerten die Tageslichtversorgung ihres Arbeitsplatzes in allen Jahreszeiten ähnlich.

Der Logarithmus des gemessenen Tageslichtquotienten am Arbeitsplatz korreliert ebenfalls mit der Nutzerbewertung der Tageslichtversorgung (*Pearson's* $r=0.12$, $p=0.002$, $N=732$). Der Zusammenhang ist jedoch nur gering.

Einige Faktoren, die den Tageslichtquotienten beeinflussen, zeigen auch einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Tageslichtversorgung:

Dem Einfluss der Zufriedenheit mit der Fenstergröße entsprechend unterscheidet sich die Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung je nach Fassadentyp. Sie wird bei Lochfassaden mit durchschnittlich 3,3 tendenziell schlechter bewertet als bei Band- und Ganzglasfassaden (Mittelwert 3,5; „sehr schlecht“=1 ... „sehr gut“=5).

Arbeitsplätze, die zu einem Atrium orientiert sind, werden mit durchschnittlich 3,46 tendenziell als schlechter tageslichtversorgt bewertet als außenliegende Räume (Mittelwert 3,77; ANOVA: $F=2.95$, $p=0.088$, $N=161$, Effektstärke $f=0.14$).

Und auch die Verbauung/Verschattung des Fensters beeinflusst die Bewertung, was sich am Einfluss der Bewertung des Ausblicks zeigt. Ist der Ausblick aus dem Fenster durch Gebäude oder Gebäudeteile eingeschränkt, wird die Tageslichtversorgung mit durchschnittlich 3,26 schlechter bewertet als bei einer Einschränkung der Aussicht durch Bäume (Mittelwert 3,43) oder einer Aussicht, die gar nicht oder nur wenig eingeschränkt ist (Mittelwert 3,64).

Da die Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung im vorliegenden Regressionsmodell stark von der Bewertung des Ausblicks beeinflusst wird, wurden auch die Faktoren analysiert, die diese Bewertung beeinflussen.

Die Bewertung des Ausblicks hängt stark davon ab, ob der Ausblick von Gebäuden oder Gebäudeteilen eingeschränkt wird oder nicht (Abbildung 39).

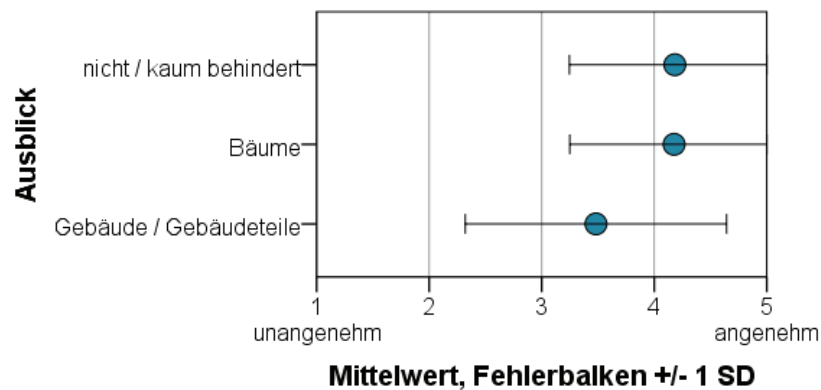


Abbildung 39 Mittelwerte und Standardabweichungen der Bewertung des Ausblicks in Abhängigkeit davon, ob und gegebenenfalls wovon der Ausblick eingeschränkt ist

Der Mittelwert der Bewertung der Aussicht von Nutzern mit nicht oder kaum behinderter Aussicht liegt ebenso wie die Bewertung von Nutzern, deren Aussicht durch Bäume eingeschränkt wird, bei 4,18 („unangenehm“=1 ... „angenehm“=5). Die Bewertung von Nutzern, die auf Gebäude oder Gebäudeteile blicken, ist mit durchschnittlich 3,48 signifikant schlechter (ANOVA: $F=51.85$, $p<0.001$, $N=934$, Effektstärke $f=0.33$).

Ebenfalls von großer Bedeutung für die Bewertung des Ausblicks ist die Einschränkung des Ausblicks durch die Fenstergröße: Die Aussicht wird bei Räumen mit Lochfassade signifikant schlechter bewertet als bei Räumen mit Ganzglasfassade (+0.44 im Regressionsmodell) oder Bandfassade (+0.47). Der Blick aus dem Fenster in ein Atrium führt – zusätzlich zur schlechteren Bewertung wegen des Ausblicks auf Gebäudeteile – zu einer um 0.6 Punkte schlechteren Bewertung im Regressionsmodell.

Weitere Einflussgrößen sind die Befindlichkeit der Nutzer (glückliche Nutzer bewerten den Ausblick als angenehmer) und die Jahreszeit (im Frühling wird der Ausblick am schlechtesten bewertet, im Sommer am besten).

Diese Faktoren erklären 29 % der Streuung (Regressionsanalyse, Hybrid-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.294$, $R^2_{\text{kor}}=0.290$, $F=37.2$, $N=905$; Details siehe Anhang A8).

Ein „angenehmer“ Ausblick ist demzufolge der Blick aus einer Band- oder Ganzglasfassade, der freien Ausblick bietet ist oder auf Bäume gerichtet ist.

Neben Ausblick und Blendfreiheit ist auch die Zufriedenheit mit der Größe der Fensterfläche von Bedeutung für die Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung, wie die Regressionsanalyse gezeigt hat.

Der Anteil der Fensterfläche (Rohbauöffnung) an der Innenfassadenfläche liegt in den untersuchten Räumen zwischen 21 % und 100 %, der Mittelwert liegt bei 62 %. Die Nutzer sind mit der Fensterfläche ihres Büros überwiegend zufrieden – bei 74 % der Befragungen ($N=955$) wurde die Größe der Fensterfläche als weder zu klein noch zu groß bewertet.

Der Mittelwert des Fensterflächenanteils an der Innenfassadenfläche bei dieser Bewertung liegt bei 60 % (Abbildung 40).

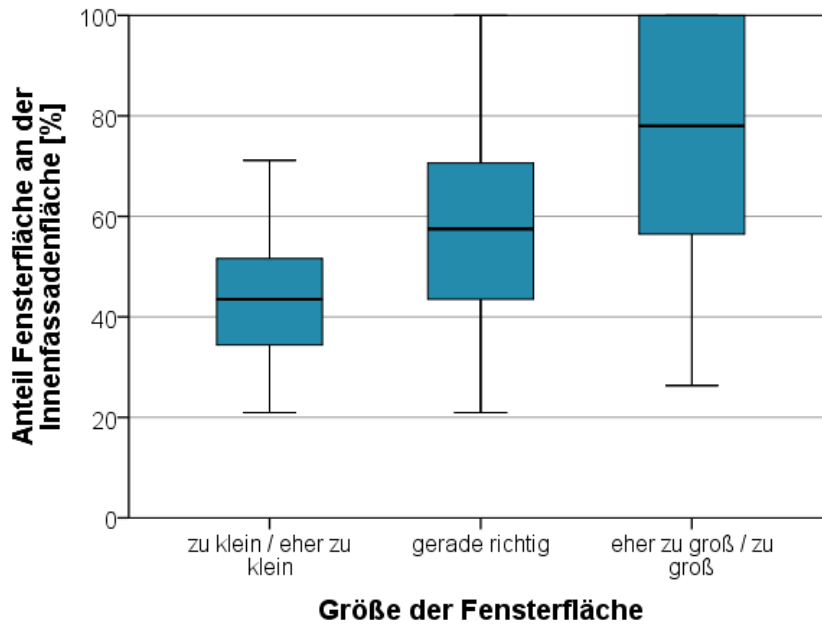


Abbildung 40 Boxplot des Fensterflächenanteils (Rohbauöffnung) bezogen auf die Innenfassadenfläche über der Nutzerbewertung der Größe der Fensterfläche

Die Bewertung, die Fensterfläche sei „zu klein“ oder „eher zu klein“, wurde bei 7 % der Befragungen abgegeben, der durchschnittliche Fensterflächenanteil bei dieser Bewertung liegt bei 43 %. Bei 20 % der Befragungen wurde das Fenster als „eher zu groß“ oder „zu groß“ bewertet, der durchschnittliche Fensterflächenanteil bei dieser Bewertung liegt bei 76 %.

Betrachtet man die 955 Nutzerurteile, die für verschiedene Fensterflächenanteile abgegeben wurden, ergibt sich ebenfalls ein deutliches Bild: Fensterflächenanteile unter 30 % (bezogen auf die Nettofassadenfläche) werden mit einem Mittelwert von 2,76 als „eher klein“ bewertet („zu klein“=1 ... „zu groß“=5; $N=29$), Fensterflächenanteile zwischen 30 % und 75 % empfinden die Nutzer mehrheitlich als „gerade richtig“ (Mittelwert 3,05, $N=697$) und Fensterflächenanteile über 75 % werden als „eher zu groß“ bewertet (Mittelwert 3,41, $N=229$).

Eine „gute Tageslichtversorgung“ wird demzufolge aus Nutzersicht am ehesten erreicht bei fensternahen Arbeitsplätzen mit Fensterflächenanteilen um 60 %, einem uneingeschränkten Ausblick oder einem Ausblick auf Bäume, sofern keine störende Blendung auftritt.

Die Hypothese, dass der visuelle Komfort von architektonischen Merkmalen wie der Fassade (Fenstergröße/Fensterflächenanteil), dem Abstand des Arbeitsplatzes zur Fassade und dem Ausblick beeinflusst wird, kann damit bestätigt werden.

Der Einfluss der Proportion der Räume konnte nicht untersucht werden, da nur in den Altbauten (Lochfassaden, relativ geringe Fensterflächenanteile) größere Raumhöhen auftraten. Eine unabhängige Betrachtung dieser Einflussgröße war daher nicht möglich.

5.2.4 Blendung durch Tageslicht

Blendung ist – wie eben gezeigt – neben einer als angenehm empfundenen Aussicht und ausreichend großen Fensterflächen ein wichtiger Einflussfaktor der Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung. Damit stellt sich die Frage, welche Lichtsituationen von den Nutzern als blendend empfunden werden.

Da die Befragung während des Büroalltags erfolgte und die Nutzer den Sonnen- oder Blendenschutz – soweit vorhanden, und in Abstimmung mit den Kollegen – an die eigenen Bedürfnisse anpassen konnten, war zu erwarten, dass nur wenige Nutzer Blendung durch das Fenster empfinden. Dem entsprechen die Nutzerbewertungen: Nur bei 118 Befragungen (12,3 %, $N=957$) gaben die Nutzer an, im Moment störende oder nicht tolerierbare Blendung durch das Fenster zu empfinden (Abbildung 41). Diese beiden Bewertungskategorien wurden zusammengefasst, da nur bei 10 Befragungen (1 %) „nicht tolerierbare“ Blendung angegeben wurde.

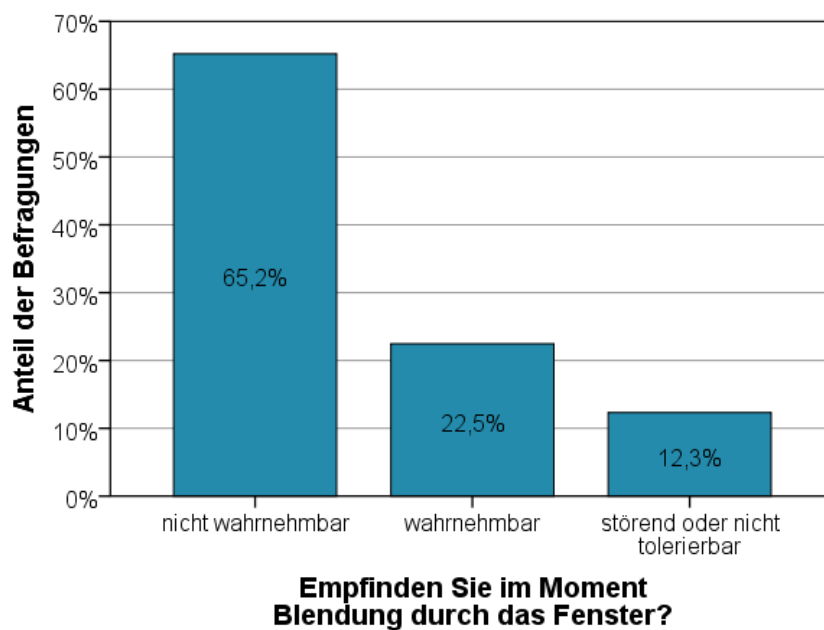


Abbildung 41 Häufigkeit der Nennung von Blendungsgraden für Blendung durch das Fenster während der Befragung

Ein Zusammenhang zwischen wahrgenommener Blendung durch das Fenster und der Art des Sonnen- oder Blendschutzsystems konnte in der vorliegenden Stichprobe nicht festgestellt werden.

Störende oder nicht tolerierbare Reflexionen auf dem Bildschirm nahmen 10,3 % der Nutzer wahr, die Bewertung korreliert signifikant mit der Bewertung von Blendung durch das Fenster (*Pearson's* $r=0.64$, $p<0.001$, $N=952$). Störende Reflexionen auf dem Tisch wurden bei 4,3 % der Befragungen angegeben, Reflexionen auf den Wänden störten nur bei 1,9 % der Befragungen – diese Störungen spielen in der vorliegenden Stichprobe somit keine große Rolle.

Bei 824 Befragungen liegt neben der Nutzerbewertung auch ein Leuchtdichtebild der Fensterfassade vor. Da die Leuchtdichtemessung aus Gründen des Datenschutzes grundsätzlich in Fensternähe und orthogonal zur Fassade erfolgte, bestehen Unterschiede zwischen der von den Probanden erlebten und bewerteten Situation am jeweiligen Arbeitsplatz und der Messung. Die Blickrichtung der Probanden bei der Beantwortung der Frage „Empfinden Sie im Moment Blendung durch das Fenster?“ ist nicht bekannt. Vermutlich blicken die meisten Nutzer üblicherweise auf ihren Monitor. Möglicherweise bewerten die Probanden daher die Blendung beim

Blick in Richtung Monitor. Möglicherweise veranlasst die Frage die Probanden, in Fenster-richtung zu blicken – in diesem Fall entspräche das Leuchtdichtebild der bewerteten Situation besser, als bei Bewertung der Fensterblendung mit Blick in Richtung Monitor.

Um die mögliche Blickrichtung der Probanden zu berücksichtigen, wurde ergänzend zu den DGP-Werten der Leuchtdichtebilder für jede Blendungsbewertung ein DGP-Wert „mit Blick zum Monitor“ abgeschätzt.

Diese DGP-Werte wurden vereinfachend ermittelt, indem aus den Werten der vertikalen Beleuchtungsstärke, die direkt oberhalb der Leuchtdichtekamera gemessen wurden, die vertikale Beleuchtungsstärke bei Blickrichtung des Probanden orthogonal zum Monitor abgeleitet wurde. Dieser Wert wurde als Beleuchtungsstärke am Auge angenommen, während die übrigen Einflussgrößen des DGP (Leuchtdichte der Blendquelle, Raumwinkel der Blendquelle, Positionsindex) dem (unveränderten) Leuchtdichtebild entnommen wurden, ohne die mögliche Blickrichtung des Probanden zu berücksichtigen.

Da der DGP-Wert stark von der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge beeinflusst wird, stellt der so ermittelte DGP-Wert eine Annäherung an den tatsächlichen DGP-Wert beim Blick zum Monitor dar.

Der erklärte Anteil der Varianz (das „Bestimmtheitsmaß“) dieser abgeschätzten DGP-Werte mit Blick zum Monitor beträgt 24 % (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.236$, $R^2_{korr}=0.235$, $F=196.7$, $N=645$). Das Bestimmtheitsmaß der DGP-Werte ohne Berücksichtigung der Blickrichtung beträgt ebenfalls 24 % (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.237$, $R^2_{korr}=0.236$, $F=196.4$, $N=637$).

Wegen der Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Blickrichtung der Probanden bei der Beantwortung der Blendungsfragen und wegen des minimalen Effekts auf das Bestimmtheitsmaß wird die Blickrichtung in den weiteren Analysen nicht berücksichtigt.

Der Abstand zwischen dem Arbeitsplatz des Probanden und der Position der Leuchtdichtekamera beeinflusst die Blendungsbewertung ebenfalls nicht signifikant ($t=0.4$, $p=0.664$), der Anteil der erklärten Varianz bleibt nahezu unverändert (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.240$, $R^2_{korr}=0.239$, $F=99.1$, $N=634$). Die Distanz zwischen Messgerät und Arbeitsplatz wird daher im Weiteren ebenfalls nicht berücksichtigt.

Im Abschlussbericht des DFG-Projektes „Quanta“ wurden 2012, wie in Abschnitt „2.3 Blendung durch Tageslicht“ beschrieben, mehrere Erweiterungen des DGP-Index veröffentlicht, deren Einfluss auf das Bestimmtheitsmaß im Folgenden dargestellt wird.

Wird die Erweiterung der Daylight Glare Probability für Situationen mit geringem Blendrisiko und niedrigen Beleuchtungsstärken $DGP_{lowlight}$ angewandt, erhöht sich das Bestimmtheitsmaß auf 26 % (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.259$, $R^2_{korr}=0.259$, $F=284.0$, $N=824$).

Als „störend“ oder „nicht tolerierbar“ wurden dabei Situationen mit $DGP_{lowlight}$ -Werten zwischen 0,08 und 0,95 bewertet, der Mittelwert der $DGP_{lowlight}$ -Werte lag bei 0,42 (Abbildung 42 links).

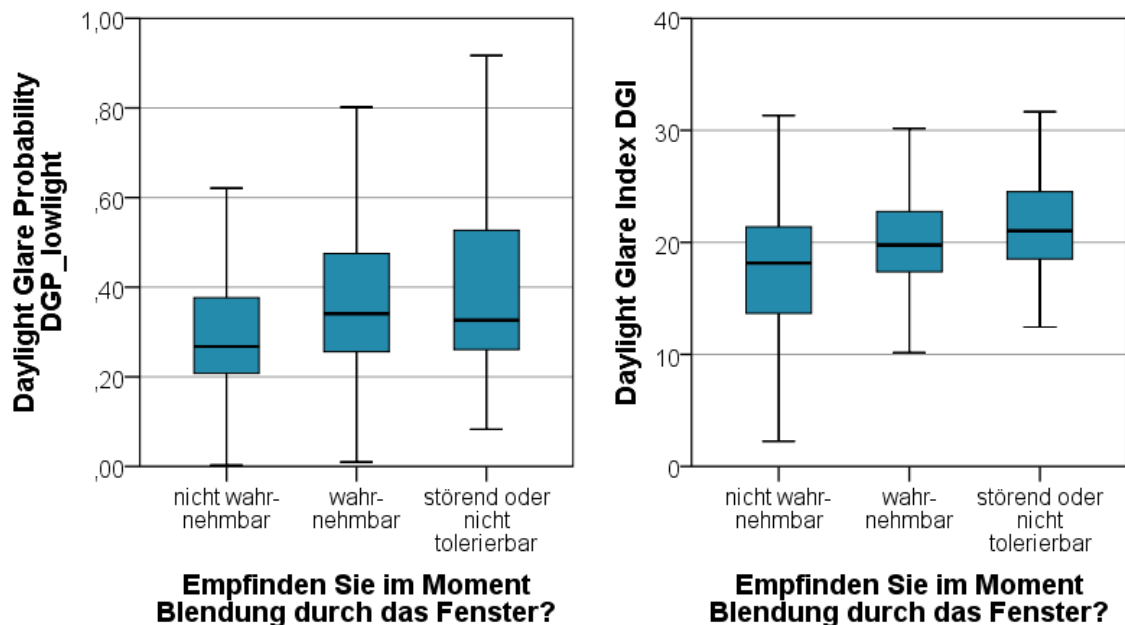


Abbildung 42 Boxplots der Daylight Glare Probability und des Daylight Glare Index über der Blendungsbewertung

Bei der Berechnung des Daylight Glare Index DGI nach Chauvel et al. (1982) wird die Leuchtdichte aller Flächen als Blendquelle berücksichtigt, die durch das Fenster gesehen werden, unabhängig von ihrer Blendwirkung.

Bei den hier angegebenen und in Abbildung 42 (rechts) dargestellten DGI-Werten wurden davon abweichend dieselben Blendquellen berücksichtigt wie bei der Berechnung der DGP-Werte. Nichtblendende Flächen wie z. B. dunkle Rasenflächen, die durch das Fenster gesehen werden, wurden nicht berücksichtigt. Diese DGI-Werte korrelieren dadurch stärker mit der Blendungsbewertung als der Original-DGI. Das Bestimmtheitsmaß für diesen DGI-Wert ist trotzdem etwas geringer als das des DGP_{lowlight} -Wertes (DGI: Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.254$, $R^2_{\text{kor}}=0.254$, $F=275.2$, $N=824$).

Eine zweite Erweiterung des DGP-Index, die ebenfalls im oben genannten Abschlussbericht veröffentlicht wurde, berücksichtigt die Einschränkung der Durchsicht durch das Fenster durch (teilweise) geschlossene Sonnen- oder Blendschutzsysteme. Die Kenngröße der Durchsicht, die als „viewratio“ bezeichnet wurde, ist definiert als Anteil des sichtbaren Fensterflächenanteils am vorhandenen Fensterflächenanteil. Viewratio beträgt 1 bei komplett offenem Sonnenschutzsystem und 0 bei ganz geschlossenem System.

Der Mittelwert von „viewratio“ ist bei „störender oder nicht tolerierbarer Blendung“ nur wenig niedriger als bei „nicht wahrnehmbarer Blendung“, wie Tabelle 7 zeigt:

Bewertung der Blendung	Mittelwert von viewratio
Blendung nicht wahrnehmbar	0,86
Blendung wahrnehmbar	0,81
Blendung störend oder nicht tolerierbar	0,79

Tabelle 7 Mittelwerte des Maßes „viewratio“ für die Einschränkung der Durchsicht durch ein Sonnenschutzsystem in Abhängigkeit vom Maß der wahrgenommenen Blendung

Als dritte Erweiterung wurde im Abschlussbericht des Projektes „Quanta“ eine Ergänzung für den Einfluss des Alters veröffentlicht. Auch in der vorliegenden Stichprobe wird die Blendungsbewertung vom Alter beeinflusst: Während Probanden unter 30 Jahren die Bewertung „wahrnehmbare Blendung“ bei einem mittleren $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wert von 0,35 abgeben, bewerten Nutzer ab 50 Jahren Blendung in Situationen mit einem mittleren $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wert von 0,22 als „wahrnehmbar“ (Abbildung 43).

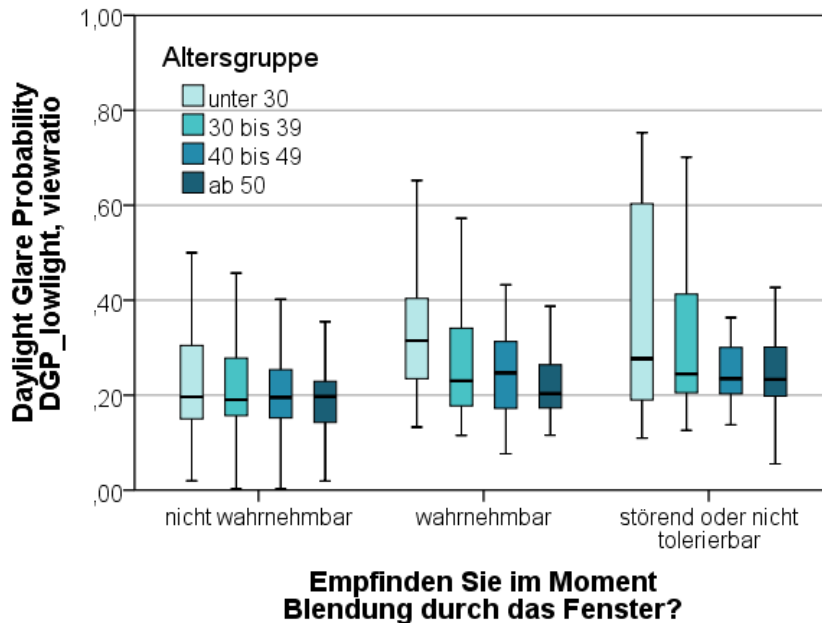


Abbildung 43 Boxplot der Daylight Glare Probability über der Blendungsbewertung in Abhängigkeit vom Alter der Befragten

Werden die Erweiterungen für Fälle mit geringem Blendrisiko (DGP_{lowlight}), die Durchsicht ($DGP_{\text{viewratio}}$) und das Alter (DGP_{age}) berücksichtigt, so erhöht sich das Bestimmtheitsmaß des $DGP_{\text{lowlight, viewratio, age}}$ -Wertes im Vergleich zum DGP_{lowlight} -Wert nur geringfügig auf 27 % (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.270$, $R^2_{\text{korrr}}=0.269$, $F=274.7$, $N=751$; Details siehe Anhang A9) – ein großer Anteil der Varianz bleibt damit weiter unerklärt.

Trotz dieses geringen Einflusses der Erweiterungen, die in einer Testraum-Studie des Projektes „Quanta“ am Fraunhofer ISE ermittelten wurden (Moosmann et al., 2012), werden sie durch die vorliegende Stichprobe bestätigt: Werden die Faktoren Alter (age) und Durchsicht (viewratio) als Regressoren in das Regressionsmodell aufgenommen, ist das Bestimmtheitsmaß mit 27,4 % nur wenig höher (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.274$, $R^2_{\text{korrr}}=0.273$, $F=93.3$, $N=751$; Details siehe Anhang A10) als bei Verwendung der Erweiterungen. Die am Fraunhofer ISE ermittelten Faktoren für diese beiden Einflussgrößen stimmen also mit den Ergebnissen der Felduntersuchung gut überein.

Abbildung 43 zeigt neben den altersabhängigen Unterschieden, dass sich die DGP-Wertebereiche der verschiedenen Nutzerurteile stark überschneiden – die empfundene Blendung durch das Fenster wird offenbar durch den Blendungsindex allein unter Alltagsbedingungen nicht sicher vorhergesagt.

Um genauer ermitteln zu können, welche weiteren Faktoren die Blendungsbewertung beeinflussen, wurden die Situationen analysiert, in denen die Nutzer Blendung wahrgenommen haben, diese aber nicht als störend empfunden haben. Diese Blendung ist für die Nutzer demzufolge akzeptabel. Als Blendungsmaß wurden $DGP_{\text{lowlight, viewratio, age}}$ -Werte verwendet.

Folgende Faktoren beeinflussen, welche $DGP_{\text{lowlight, viewratio, age}}$ -Werte akzeptiert werden, also die Blendungstoleranz der Nutzer:

- Die Orientierung der Fenster zu einem Atrium (bei Fenstern nach außen werden höhere DGP-Werte akzeptiert als bei Fenstern am Atrium),
- der Fassadentyp (höhere DGP-Werte bei Bandfassade als bei Loch- und Ganzglasfassade),
- die Bedienbarkeit des Sonnenschutzes (höhere DGP-Werte bei größerer Zufriedenheit mit der Bedienbarkeit),
- die Jahreszeit (höhere DGP-Werte im Frühling, niedrigere DGP-Werte im Sommer),
- der Ausblick (höhere DGP-Werte je angenehmer der Ausblick).

Der erklärte Anteil der Varianz ist in diesem linearen Regressionsmodell mit 17 % allerdings sehr gering (Regressionsanalyse, OLS: $R^2=0.166$, $R^2_{\text{corr}}=0.124$, $F=4.0$, $N=171$; Details siehe Anhang A11).

Die größere Toleranz bei mittleren Fensterflächenanteilen zeigt sich auch, wenn nicht nur die Fälle mit dem Nutzerurteil „Blendung ist wahrnehmbar“ betrachtet werden, sondern alle Blendungsbewertungen. Bei mittleren Fensterflächenanteilen werden in der vorliegenden Stichprobe höhere DGP-Werte akzeptiert als bei Lochfassaden oder Ganzglasfassaden (Abbildung 44).

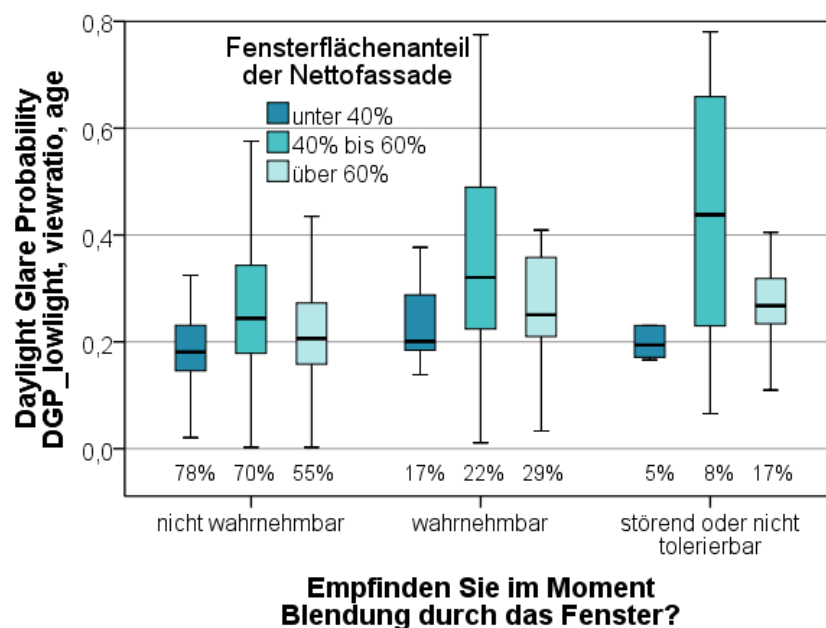


Abbildung 44 Boxplot der Daylight Glare Probability über der Blendungsbewertung in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil (Rohbauöffnung) der Innenfassadenfläche

Die Wahrscheinlichkeit, Blendung durch das Fenster wahrzunehmen oder als störend zu empfinden, hängt nicht nur von den akzeptierten DGP-Werten ab. Sie steigt mit zunehmendem Fensterflächenanteil der Fassade. Bei Fensterflächenanteilen (Rohbauöffnung) unter 40 % bezogen auf die Nettofassade haben 22 % der Probanden zum Zeitpunkt der Befragung Blendung wahrgenommen oder als störend empfunden. Bei Fensterflächenanteilen über 60 % war der Anteil mit 46 % deutlich größer.

Auch bei anderen Faktoren zeigt sich, dass der Einfluss auf die akzeptierten DGP-Werte und die Blendungswahrscheinlichkeit nicht identisch sind.

Neben einem hohen $DGP_{\text{lowlight, viewratio, age}}$ -Wert konnten folgende Faktoren identifiziert werden, die die Wahrscheinlichkeit, dass Nutzer sich geblendet fühlen, beeinflussen:

- Fensterflächenanteil der Fassade (je größer desto eher Blendung),
- die subjektive Blendempfindlichkeit der Nutzer (je blendempfindlicher desto eher Blendung),
- der Ausblick (je unangenehmer desto eher Blendung),
- das Tragen einer Brille oder von Kontaktlinsen (eher Blendung ohne Brille/Kontaktlinsen),
- die Jahreszeit (eher Blendung im Herbst und Winter).

Der jahreszeitliche Einfluss ist unabhängig von der Sonnenhöhe, die die Blendungsbewertung nicht signifikant beeinflusst.

Der erklärte Anteil der Varianz der Blendungsbewertung kann mit diesem Regressionsmodell auf 33 % erhöht werden. Damit bleiben 67 % der Streuung unerklärt. Die vom Nutzer empfundene Blendung lässt sich – zumindest in dieser Stichprobe und bei der Ungenauigkeit der vorliegenden Messwerte – nicht „fehlerfrei“ vorhersagen (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.327$, $R^2_{\text{korrr}}=0.323$, $F=42.7$, $N=713$; Details siehe Anhang A12).

Zwar erreicht der Blendungsindex DGP_{lowlight} ein etwas höheres Bestimmtheitsmaß als der DGI und eignet sich damit besser, Blendung vorherzusagen. Auch die Erweiterungen der Daylight Glare Probability um Faktoren, die die Durchsicht und das Alter der Nutzer berücksichtigen, konnten bestätigt werden.

Damit konnte auch die Hypothese, dass die Nutzerbewertung der Blendung vom DGP-Messwert, dem Alter des Nutzers, der Jahreszeit und der Nutzerbewertung des Ausblicks abhängt, bestätigt werden.

Dennoch bleibt – vermutlich neben den Messfehlern, die sich aus dem Aufstellungsort der Leuchtdichtekameras in Fensternähe und der Unsicherheit hinsichtlich der Blickrichtung der Probanden in dieser Untersuchung ergeben, auch aufgrund großer individueller Unterschiede – eine große Unsicherheit bei der Blendungsvorhersage, die die Planung möglichst „blendungsfreier“ Arbeitsplätze erschwert.

Faktoren wie die Blendempfindlichkeit der Nutzer und das Tragen einer Sehhilfe, die die Vorhersagegüte den durchgeführten statistischen Analysen zufolge erhöhen, können für die Planung nicht herangezogen werden. Auch die Bewertung der Aussicht kann nur auf Basis von gegebenenfalls vorhandener Verbauung abgeschätzt werden.

Daraus folgt, dass die Möglichkeit, individuell Abhilfe bei störender Blendung schaffen zu können, für die Zufriedenheit der Nutzer mit der Tageslichtversorgung ihres Arbeitsplatzes von entscheidender Bedeutung ist.

5.2.5 Sonnen- und Blendschutz

Die Kommentare der Nutzer zur Beleuchtung ihres Arbeitsplatzes mit Tageslicht *ohne* Verschattung machen ebenfalls deutlich, welchen hohen Stellenwert der Sonnen- bzw. Blendschutz für die Nutzer hat. 190 Fragebögen enthalten Kommentare zu dieser Frage (19,4 %, $N=977$).

62 % der Kommentare thematisieren Blendung oder zu große Wärmeeinträge, die ohne den Sonnenschutz auftreten würden. Die zitierten Äußerungen sind eine repräsentative Auswahl:

„Bei Sonnenschein ohne Lamellen regelmäßig zu hell.“

„Sonne steht noch sehr tief und scheint direkt auf Bildschirm.“

„Ohne Verschattung wäre es zu hell und zu heiß.“

32 % der Kommentare beanstanden das zu geringe Tageslichtangebot:

„Mir fehlt Sonne/Licht!“

„Zu wenig Tageslicht.“

„Fenster zu klein.“

„Fenster zum Atrium - zu wenig Tageslicht.“

„Null Ausblick durch Nachbargebäude, sehr dunkel!“

6 % der Kommentare nennen Gründe für die Zufriedenheit des Nutzers mit der Beleuchtung des Arbeitsplatzes:

„Gutes Tageslicht durch die großen Fenster.“

„Große Fenster mit freier Sicht.“

„Nord-West-Ausrichtung“

In den neun Gebäuden wurden in jeweils vier Messzeiträumen insgesamt 539 Messdatensätze aufgezeichnet. Nicht in jedem Gebäude konnten vier Mal dieselben fünfzehn Räume genutzt werden, Messungen und Befragungen haben in insgesamt 161 verschiedenen Räumen stattgefunden.

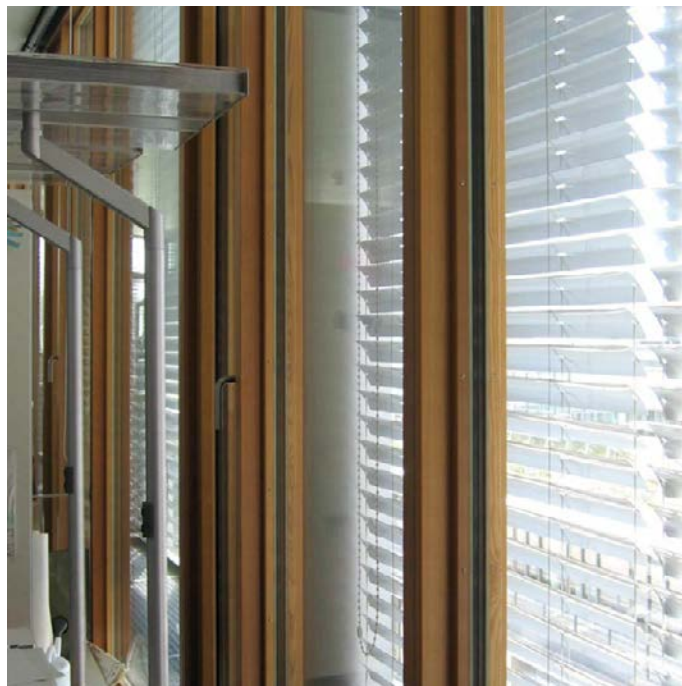


Abbildung 45 Blick auf den teilweise geschlossenen Sonnenschutz in einem der untersuchten Räume

In sechs Gebäuden sind nicht alle Räume mit dem gleichen Sonnen- und Blendschutz ausgestattet (vier Gebäude mit zwei, eines mit fünf, eines mit sechs verschiedenen Sonnen- und Blendschutz-Kombinationen). Nur in drei Gebäuden sind alle untersuchten Räume mit dem gleichen Sonnen- und Blendschutz ausgestattet.

Die folgende Tabelle 8 zeigt die Sonnen- und Blendschutzsysteme, die den Nutzern in den untersuchten Räumen zur Verfügung stehen.

	Raffstores (außenliegend, GLT)	Raffstores (außenliegend, manuell)	Rollläden (außenliegend, manuell)	Rollos (außenliegend, GLT)	Jalousien (innenliegend, manuell)	Vertikal-lamellen (innenliegend, manuell)	Kein Sonnenschutz
Kein Blendschutz	40 (25 %)	29 (18 %)	2 (1 %)	4 (3 %)	16 (10 %)	4 (3 %)	7 (4 %)
Rollos	43 (27 %)			2 (1 %)			5 (3 %)
Vertikal-lamellen		4 (3 %)	3 (2 %)		1 (1 %)		
Vorhänge			1 (1 %)				

Tabelle 8 Anzahl der untersuchten Räume und Anteil der jeweiligen Kombination aus Sonnen- und Blendschutzsystemen an den untersuchten Räumen

72 % der untersuchten Räume sind mit außenliegenden Raffstores ausgestattet. Die Büroräume ohne Sonnenschutz (7 %) sind nordorientiert. 37 % der Räume sind mit einem (zusätzlichen) Blendschutz ausgestattet, in der Regel mit einem textilen innenliegenden Rollo (31 %).

Die Nutzer wurden nach ihren Gründen für eine Veränderung des Sonnenschutzes gefragt (Abbildung 46). Fünf Antwortmöglichkeiten waren vorgegeben, Mehrfachnennung war möglich. Die Möglichkeit einer frei formulierten Antwort bestand ebenfalls (Frage 17 im Fragebogen).

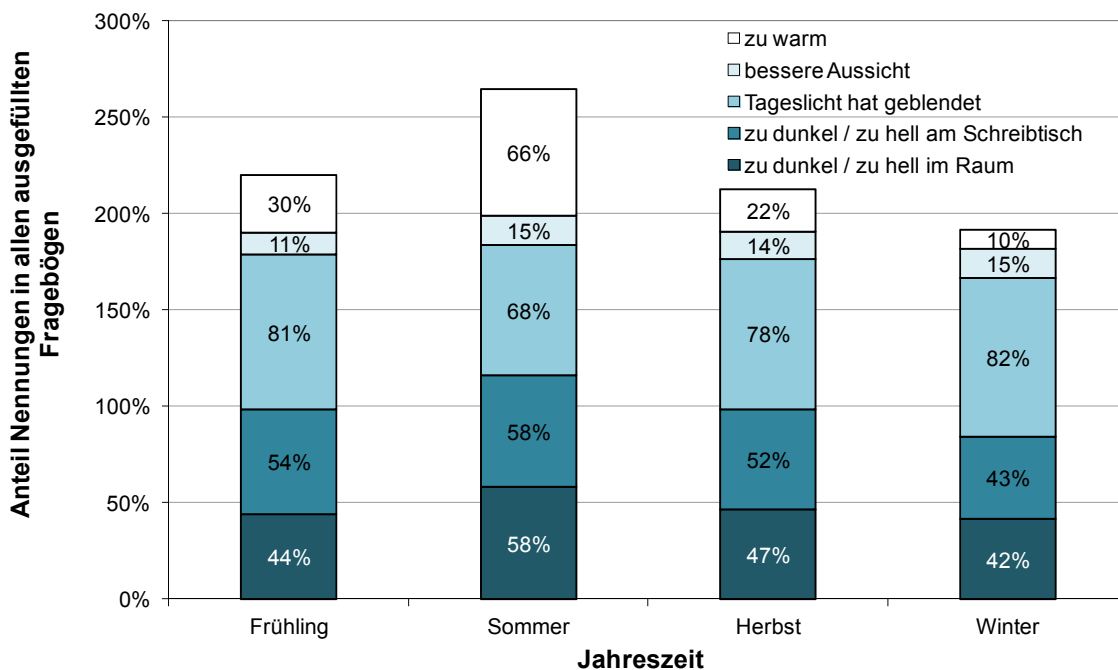


Abbildung 46 Nutzerangaben zum Anlass für eine Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes im Messzeitraum (Mehrfachantworten möglich) in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Bei 524 der 681 Fragebögen, in denen diese Frage beantwortet wurde, wurde „Blendung durch das Tageslicht“ genannt und ist damit der Anlass, der am häufigsten angegeben wurde (77 %). Blendung wurde im Winter mit 82,5 % tendenziell häufiger genannt als im Sommer mit 67,6 % (Chi²-Test: $\chi^2=12.9$, $p=0.005$; $N=681$, $\Phi=0.138$).

Die Anpassung der Helligkeit am Schreibtisch folgt mit 52 %, die Anpassung der Helligkeit im Raum mit 48 %. Der Wunsch nach einer besseren Aussicht wurde in 14 % der Fälle angegeben, in ebenerdigen Räumen und Räumen an einem Atrium wurde auch „Sichtschutz“ genannt.

Die Temperatur („Es war mir zu warm.“) wird erwartungsgemäß je nach Jahreszeit unterschiedlich häufig genannt. Im Sommer wird die Temperatur von 66 % der Nutzer als Anlass für eine Veränderung angegeben, im Winter nur von 10 %. Dieser Unterschied ist signifikant (Chi²-Test: $\chi^2=135.3$, $p<0.001$, $N=681$, $\Phi=0.446$).

Bei den frei formulierten Gründen für eine Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes dominiert ebenfalls das Thema Blendung. Auch das Übersteuern einer unerwünschten automatischen Verfahr-Aktion des Sonnenschutzes wird genannt. Ein Proband formulierte: „Die Automatik des Sonnenschutzes nervt. Das will ich selbst bestimmen.“

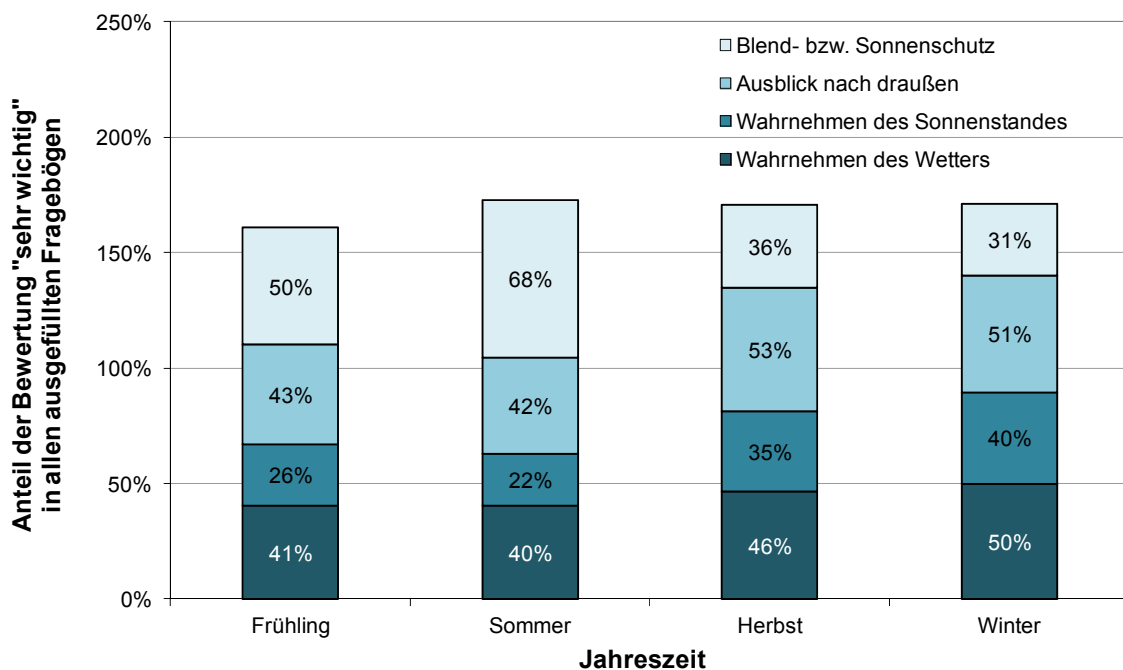


Abbildung 47 Relevanz verschiedener Aspekte des visuellen Komforts – Anteil der Fragebögen mit der Angabe, dass der jeweilige Aspekt „sehr wichtig“ ist (Mehrfachantworten möglich) in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Dem Wunsch nach Schutz vor sommerlichen Wärmeeinträgen entspricht, dass der Sonnen- und Blendschutz für viele Nutzer im Sommer eine signifikant größere Bedeutung hat als in den übrigen Jahreszeiten („gar nicht wichtig“=1 ... „sehr wichtig“=5; Mittelwert Frühling 4,01, Sommer 4,42, Herbst 3,59, Winter 3,28; ANOVA: $F=33.32$, $p<0.001$, $N=958$, Effektstärke $f=0.32$).

Der Ausblick, der den Nutzerangaben zufolge für Veränderungen des Sonnen- oder Blendschutzes von eher untergeordneter Bedeutung ist (siehe Abbildung 46), wird von den Nutzern unter den vier abgefragten Aspekten am häufigsten als „sehr wichtig“ bewertet (Abbildung 47). Unterschiede zwischen den Jahreszeiten sind dabei nicht signifikant („gar nicht wichtig“=1 ... „sehr wichtig“=5; Mittelwert Frühling 4,04, Sommer 3,93, Herbst 4,14, Winter 4,11; ANOVA: $F=1.51$, $p=0.209$, $N=957$, Effektstärke $f=0.07$).

Die Relevanz des Ausblicks korreliert mit der Bewertung des Ausblicks: Je angenehmer der Ausblick, desto wichtiger ist er (Pearson's $r=0.22$, $p<0.001$, $N=925$).

Damit stellt sich die Frage, wie zufrieden die Nutzer mit dem vorhandenen Sonnenschutz sind. Dafür wurden fünf Aspekte der Qualität des Sonnenschutzes von den Nutzern bewertet (Abbildung 48). Der Schutz vor Blendung wird im Mittel mit 3,58 positiv bewertet („sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5; $N=793$), der Ausblick wird mit 2,47 negativ bewertet ($N=745$).

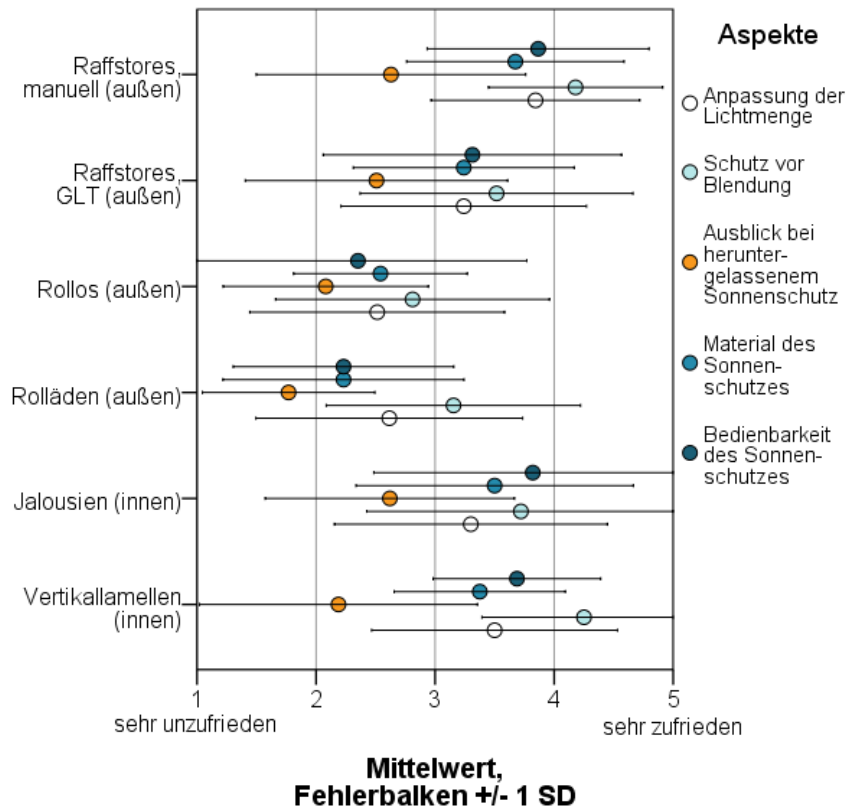


Abbildung 48 Mittelwerte und Standardabweichungen der Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten des Sonnenschutzes für die Sonnenschutzsysteme

Die Bewertungen bei außenliegenden Rollos und Rollläden sind in allen fünf Aspekten schlechter als bei den übrigen Sonnenschutzsystemen, was sich auch im Mittelwert der abgefragten Aspekte widerspiegelt (Abbildung 49).

Da nur ein Teil der Räume über einen zusätzlichen (innenliegenden) Blendschutz verfügt, liegen deutlich weniger Nutzerbewertungen zu den zusätzlichen Blendschutzsystemen vor, die nicht ausführlich in einem Diagramm dargestellt werden. Der Schutz vor Blendung wird bei Vertikallamellen mit durchschnittlich 4,18 besser bewertet als bei den anderen Systemen. Auffallend ist der große Unterschied zu innenliegenden Rollos (Mittelwert 3,14). Die Bewertung korreliert stark mit der Bewertung dieses Aspekts beim Sonnenschutzsystem (*Pearson's* $r=0.56$, $p<0.001$, $N=192$).

Die Bewertung des Ausblicks liegt bei beiden Blendschutzsystemen im Mittel bei 2,64, auch bei diesem Aspekt korrelieren die Bewertungen von Sonnen- und Blendschutz (*Pearson's* $r=0.44$, $p<0.001$, $N=170$).

Die Bedienbarkeit der Sonnenschutzsysteme wird im Mittel mit 3,38 bewertet. Die Systeme, mit denen die Nutzer bei „Schutz vor Blendung“ und „Anpassung der Lichtmenge“ zufriedener sind, werden auch bei der Bedienbarkeit besser bewertet.

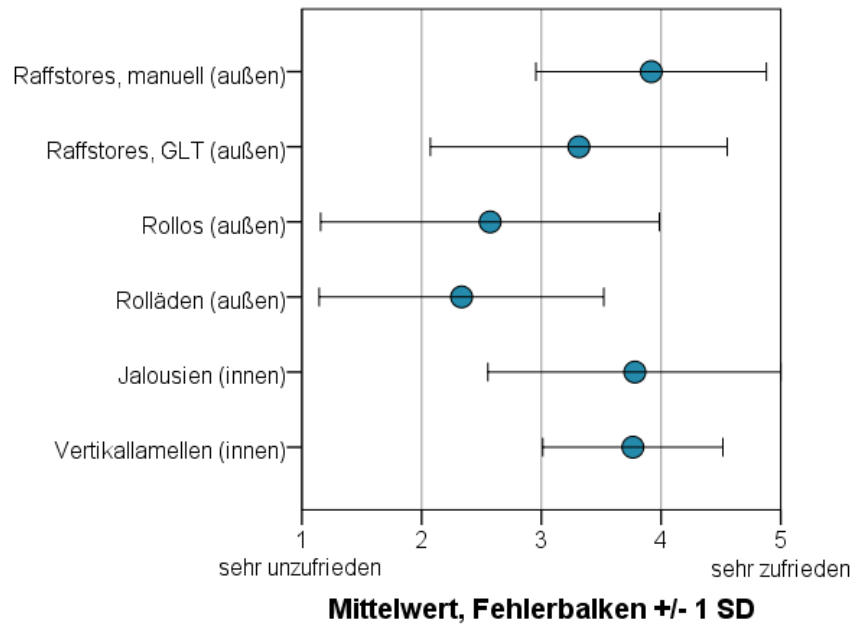


Abbildung 49 Mittelwerte und Standardabweichungen der durchschnittlichen Zufriedenheit mit den fünf abgefragten Aspekten für die verschiedenen Sonnenschutzsysteme

Auffallend ist der signifikante Unterschied in der Bewertung der ausschließlich manuell bedienten Raffstores und der automatisch gesteuerten Raffstores (manuell 3,91, GLT 3,31; ANOVA: $F=25.33$, $p<0.001$, $N=658$, Effektstärke $f=0.20$). Auch die Zufriedenheit mit der Anpassung der Lichtmenge, mit dem Schutz vor Blendung und mit dem Material unterscheidet sich signifikant zwischen manuell bedienten und automatisch gesteuerten Raffstores.

Hier spiegelt sich vermutlich die geringe Zufriedenheit mit der automatischen Steuerung der Sonnenschutzsysteme wider: 26 % der Nutzer sind sehr unzufrieden mit der automatischen Steuerung ihres Sonnenschutzes, nur 7 % sind sehr zufrieden, der Mittelwert ist 2,48 („sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5; $N=495$).

Einige repräsentative Äußerungen zu den Gründen der Nutzer für eigene Veränderungen des Sonnenschutzes vermitteln einen Eindruck, was die Nutzer an der automatischen Steuerung stört:

„Die Jalousieautomatik tut nicht, was wir wollen.“

„Ging automatisch runter, ohne Not.“

„Blendschutz geht automatisch runter, muss sie immer wieder hoch lassen.“

„Automatische Jalousie schlecht, Handrollo ist gut.“

„Lieber Tageslicht als künstliches Licht und Sonnenschutz.“

„Die wenigen Sonnenstrahlen in den letzten Tagen wurden unmittelbar durch die automatische Verschattung ausgesperrt!“

Die Steuerung des Sonnenschutzes entspricht in den untersuchten Gebäuden offenbar nicht immer den Wünschen der Nutzer, und sie ist für die Nutzer auch nicht immer nachvollziehbar.

Bei den 147 Kommentaren zur Beleuchtung des Arbeitsplatzes durch Tageslicht *mit* Verschattung (15 %, $N=977$) ist die aus Nutzersicht zu starke Abdunklung des Sonnenschutzsystems mit einem Anteil von 65 % an den Kommentaren das beherrschende Thema:

„Es ist zu dunkel, wenn Lamellen teilweise geschlossen sind. Dann muss künstliches Deckenlicht eingeschaltet werden.“

„Mit Verschattung bei Sonne ist es dann auch meist zu dunkel.“

„Noch dunkler, man fühlt sich eingesperrt - nutze Verschattung nach Möglichkeit nicht.“

12 % der Kommentare beklagen, dass trotz des Sonnen- der Blendschutzes Blendung auftritt:

„Sonne blendet zwischen den Lamellen.“

„Bei steiler Sonneneinstrahlung ist Schutz zu schwach.“

„Sehr dunkel, man wird trotzdem geblendet.“

Trotz dieser Kritik an den Sonnenschutzsystemen ist die Bewertung der Beleuchtung des Arbeitsplatzes *mit* Verschattung mit einem Mittelwert von 3,36 („sehr schlecht“=1 ... „sehr gut“=5, $N=790$) fast ebenso gut wie die Bewertung der Tageslichtversorgung *ohne* Verschattung (Mittelwert 3,47, $N=854$).

Die Nutzer sehen in ihren Sonnen- und Blendschutzsystemen primär eine Möglichkeit, sich vor Blendung zu schützen. Der Schutz vor unerwünschten Wärmeeinträgen spielt nur im Sommer eine Rolle. Die große Relevanz, die der Ausblick für die Nutzer hat, spiegelt sich in der Unzufriedenheit mit dem Ausblick bei geschlossenem Sonnen- oder Blendschutz wider. Auch die Unzufriedenheit mit der – für Nutzer oft nicht nachvollziehbaren – automatischen Steuerung des Sonnenschutzes ist insgesamt groß.

5.2.6 Künstliche Beleuchtung

Die Zufriedenheit mit der Beleuchtung wird neben dem Tageslicht von der künstlichen Beleuchtung bestimmt.

Die künstliche Beleuchtung der neun Gebäude ist sehr unterschiedlich. Zwei Gebäude sind mit direkt strahlenden Deckenein- oder -anbauleuchten ausgestattet. In drei Gebäuden sind einige der untersuchten Räume mit direkt strahlenden Anbauleuchten ausgestattet, andere mit direkt-indirekt strahlenden Pendelleuchten. In vier Gebäuden werden die Arbeitsplätze mit Stehleuchten beleuchtet (drei Gebäude direkt-indirekt, ein Gebäude indirekt).

In vier Gebäuden wird das Kunstlicht ausschließlich manuell geschaltet und ist nicht dimmbar. In fünf Gebäuden wird das Kunstlicht tageslichtabhängig geschaltet oder gedimmt, in drei Gebäuden zusätzlich präsenzabhängig geschaltet.

Die folgende Tabelle 9 zeigt Leuchtenart, Beleuchtungsart und Lichtmanagement der untersuchten Gebäude.

	Leuchtenart	Beleuchtungsart	Lichtmanagement
1 Gebäude	Einbauleuchten	direkt	manuell
1 Gebäude	Anbauleuchten	direkt	präsenz- und tageslichtabhängig
3 Gebäude teilweise	Anbauleuchten	direkt	manuell
3 Gebäude teilweise	Pendelleuchten	direkt/indirekt	manuell
2 Gebäude	Stehleuchten	direkt/indirekt	präsenz- und tageslichtabhängig
1 Gebäude	Stehleuchten	direkt/indirekt	tageslichtabhängig
1 Gebäude	Stehleuchten	indirekt	tageslichtabhängig

Tabelle 9 Leuchtenart, Beleuchtungsart und Lichtmanagement der untersuchten Gebäude

Die Nutzer fühlen sich mehrheitlich durch die Beleuchtung in ihrer Leistungsfähigkeit kaum beeinträchtigt. Dem entspricht die Zufriedenheit mit der künstlichen Beleuchtung des Arbeitsplatzes von durchschnittlich 3,44 („sehr schlecht“=1 ... „sehr gut“=5).

Blendung durch die Leuchten spielt keine große Rolle: Nur bei 6,7 % der Befragungen wird angegeben, „immer“ oder „oft“ Blendung durch die Leuchten zu empfinden, während 68,9 % der Antworten zufolge „nie“ Blendung durch die Leuchten auftritt ($N=944$). Blendung durch Reflexionen des Kunstlichts auf der Tischfläche oder im Monitor tritt noch seltener auf.

Die Blendungsbewertung wird in der vorliegenden Stichprobe weder vom Alter der Probanden beeinflusst noch davon, ob diese eine Brille oder Kontaktlinsen tragen.

Da Blendung durch die Leuchten von den Nutzern so selten wahrgenommen wird, ist auch ihr Einfluss auf die Zufriedenheit mit der künstlichen Beleuchtung der Regressionsanalyse zufolge eher gering. Diese wird von der Zufriedenheit mit dem Helligkeitsniveau am Arbeitsplatz dominiert. Weitere wichtige Einflussgrößen sind die Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung (mit Sonnenschutz), die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung und der Medianwert der Beleuchtungsstärke im Messzeitraum in der Raumtiefe (Regressionsanalyse, Hybrid-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.515$, $R^2_{\text{kor}}=0.505$, $F=64.4$, $N=557$; Details siehe Anhang A13).

Signifikante Unterschiede zwischen den Jahreszeiten bestehen nicht, Alter und Geschlecht der Probanden sind ebenfalls ohne signifikanten Einfluss.

Ein signifikanter Einfluss der Beleuchtungsart oder der Kunstlichtregelung auf die Zufriedenheit mit der künstlichen Beleuchtung des Arbeitsplatzes insgesamt ist nicht nachweisbar. Da diese Faktoren in der Stichprobe gebäudespezifisch sind, können sie nicht unabhängig von weiteren Faktoren untersucht werden (Kunstlichtangebot, Tageslichtversorgung, Sonnenschutzsystem).

Der signifikante Einfluss der Regelung auf das Kunstlichtangebot zeigt sich, wenn man die Beleuchtungsstärke an den Arbeitsplätzen betrachtet und die Nutzerbewertung der Helligkeit des Kunstlichts.

Grundlage der folgenden Tabelle 10 sind die Medianwerte der Beleuchtungsstärke an den untersuchten Arbeitsplätzen während der Arbeitszeit des Nutzers. Ausgewiesen werden jeweils die Mittelwerte der Medianwerte.

	manuell	geregelt	geregelt, Grundbeleuchtung 75 lx
Kunstlicht an	819 lx	862 lx	416 lx
Kunstlicht aus	603 lx	824 lx	598 lx
Differenz	257 lx	88 lx	-160 lx
Anteil Arbeitszeit mit eingeschaltetem Kunstlicht	30 %	21 %	14 %

Tabelle 10 *Beleuchtungsstärke an den untersuchten Arbeitsplätzen in Abhängigkeit vom Lichtmanagement*

Die mittleren Medianwerte der Beleuchtungsstärke bei eingeschaltetem Kunstlicht unterscheiden sich nicht signifikant. Lediglich das Gebäude, in dem die Grundbeleuchtung nur die Verkehrssicherheit gewährleisten soll, weist erwartungsgemäß eine deutlich geringere Beleuchtungsstärke unterhalb der für Büroarbeitsplätze geforderten Beleuchtungsstärke von 500 lx auf. Der mittlere Medianwert der Beleuchtungsstärke bei ausgeschaltetem Kunstlicht unterscheidet sich dagegen signifikant (603 lx versus 824 lx bei ausgeschaltetem Kunstlicht; ANOVA: $F=13.69$, $p<0.001$, $N=621$, Effektstärke $f=0.21$). Er wird vor allem von der Tageslichtversorgung der Arbeitsplätze beeinflusst.

Bei manuell geschalteten Anlagen unterscheidet sich dementsprechend die Beleuchtungsstärke bei eingeschaltetem von der Beleuchtungsstärke bei ausgeschaltetem Kunstlicht mit einer Differenz von 257 lx für den Mittelwert der Medianwerte sehr deutlich. In den Gebäuden mit automatisch geregelten Kunstlichtanlagen und überwiegend guter Tageslichtversorgung entspricht die Beleuchtungsstärke bei eingeschaltetem nahezu der Beleuchtungsstärke bei ausgeschaltetem Kunstlicht. Der Zugewinn an Helligkeit durch das Kunstlicht ist bei den manuell – den Bedürfnissen der Nutzer entsprechend – geschalteten Anlagen bei großer Streuung deutlich größer als bei (tageslichtabhängig) geregelten Anlagen.

Der Anteil der Arbeitszeit eines Nutzers mit eingeschaltetem Kunstlicht (Grundbeleuchtung) ist bei den manuell geschalteten Anlagen mit 30 % ebenfalls deutlich höher als bei den geregelten Anlagen mit 21 % bzw. 14 % (ANOVA: $F=16.96$, $p<0.001$, $N=700$, Effektstärke $f=0.22$). Es ist davon auszugehen, dass sich dieser große Unterschied im Energieverbrauch der künstlichen Beleuchtung widerspiegelt, der in dieser Untersuchung nicht erfasst wurde.

Bei den folgenden Analysen wurde das Gebäude mit einer Grundbeleuchtung unter 500 lx ausgeschlossen, um die Auswertung der tageslichtabhängig geregelten Anlagen nicht zu verzerren.

Trotz der etwas höheren Medianwerte der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz bei Kunstlichtanlagen mit tageslichtabhängiger Regelung werden diese von den Nutzern als dunkler bewertet als manuell geschaltete Anlagen. Die durchschnittliche Bewertung der künstlichen Beleuchtung im Messzeitraum liegt für die tageslichtabhängig geregelten Anlagen bei 3,0 und für manuell geschaltete Anlagen bei 3,17 („zu dunkel“=1 ... „zu hell“=5). Dieser Unterschied ist signifikant (ANOVA: $F=10.46$, $p=0.001$, $N=743$, Effektstärke $f=0.12$).

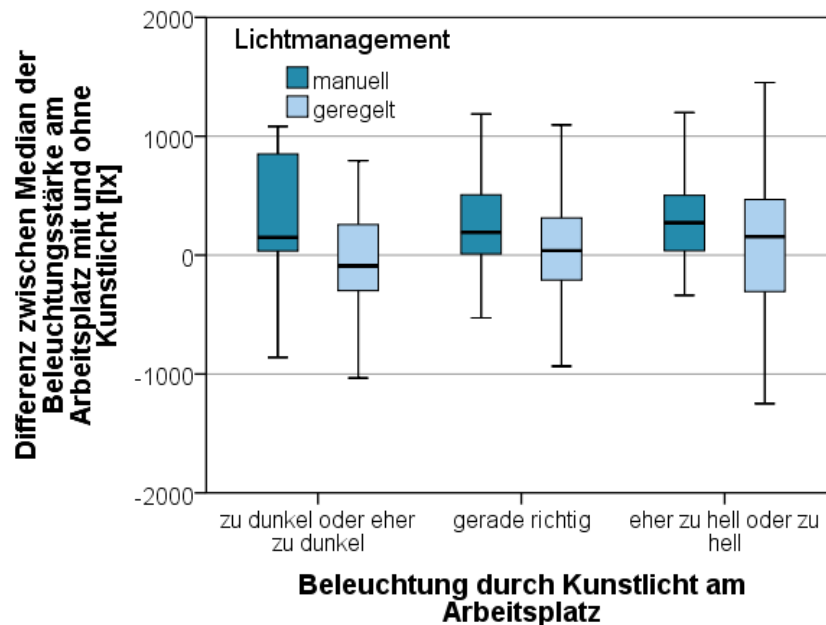


Abbildung 50 Boxplot der Differenz zwischen den Medianwerten der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz mit und ohne Kunstlicht über der Nutzerbewertung der künstlichen Beleuchtung in Abhängigkeit vom Lichtmanagement

Ein möglicher Grund für diese im Mittel „dunklere“ Bewertung trotz etwas höherer Medianwerte der Beleuchtungsstärke bei eingeschaltetem Kunstlicht könnte die tageslichtabhängige Dimmung der Anlagen sein, die den – für den Nutzer erlebbaren – Anstieg der Beleuchtungsstärke beim Einschalten des Kunstlichts begrenzt (Abbildung 50).

Wechselnde Lichtverhältnisse außen, die die Nutzer innen wahrnehmen, werden in Situationen mit geringem Tageslichtangebot (teilweise) von der tageslichtabhängigen Dimmung ausgeglichen, so dass die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz nur eingeschränkt von einem zunehmenden Tageslichtangebot profitiert und die Beleuchtungsstärke innen bei zunehmender Helligkeit außen nicht den Erwartungen entsprechend ansteigt.

Unter Umständen kann die Regelung eine vom Nutzer gewünschte Ergänzung des Tageslichts verhindern – das Kunstlicht bleibt aus, wenn der Sensor Helligkeit oberhalb des Sollwertes misst.

Ergebnisse

168 Fragebögen enthalten Kommentare zur künstlichen Beleuchtung (17,2 %, N=977). Die Gründe für Unzufriedenheit sind sehr vielfältig und zum Teil widersprüchlich.

27 % der Kommentare entfallen auf die aus Nutzersicht zu geringe Helligkeit des Kunstlichts in dem Gebäude mit einer Beleuchtungsstärke der Grundbeleuchtung von 75 lx.

15 % der Anmerkungen kritisieren die Regelung des Kunstlichts:

„Lampe wechselt ständig Helligkeit oder schaltet sich plötzlich ab, obwohl es zu dunkel ist.“

„Automatische Ein/Ausschaltung bzw. Bewegungsmelder nervt.“

„Man muss Diplom machen, um die Automatik der Lampen zu verstehen.“

10 % der Kommentare beklagen eine zu geringe, 9 % eine zu große Helligkeit des Kunstlichts:

„Zu wenig ausgeleuchtet, anstrengend für die Augen.“

„Das Licht ist zu grell und unnatürlich.“

„Helligkeit "beißt" in den Augen.“

Einige Nutzer beklagen die fehlende Dimmung bzw. Anpassbarkeit der Beleuchtung (5 %), einige sind mit der Lichtfarbe unzufrieden (4 %), einige bringen das Kunstlicht mit gesundheitlichen Beschwerden in Verbindung (6 %):

„Ohne Dimmer wäre die Beleuchtung unzumutbar.“

„Licht nicht flexibel regulierbar.“

„Die Lichtfarbe finde ich nicht angenehm.“

„Durch die Lampen entsteht ein Operationsaallicht.“

„Bekomme oft Kopfschmerzen durch Kunstlicht.“

„Ständiges Kunstlicht verursacht Augentrockenheit.“

Andere Nutzer geben an, Tageslicht vorzuziehen (7 %):

„Ich habe nur ungern Kunstlicht.“

„Ich mag lieber Sonnenlicht.“

„Würde lieber mit Tageslicht arbeiten.“

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine möglichst einfach zu bedienende, in ihrer Helligkeit individuell anpassbare Kunstlichtlösung bei gutem Tageslichtangebot eine hohe Akzeptanz unter den Nutzern finden könnte.

Die vorliegenden Daten lassen den Schluss zu, dass die in den Gebäuden vorhandene Regelung des Kunstlichts zur (erwünschten) Energieeinsparung beitragen kann (siehe „Nutzereingriffe Kunstlicht“), in dieser Stichprobe hat die Regelung aber einen negativen Effekt auf die Nutzerzufriedenheit.

5.2.7 Raumtemperatur

Die empfundene momentane Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit wird neben der Zufriedenheit mit der momentanen Helligkeit am Arbeitsplatz stark von der Zufriedenheit mit der momentanen Temperatur beeinflusst. Insbesondere im Sommer fühlen sich einige Nutzer von der Raumtemperatur in ihrer Leistungsfähigkeit beeinträchtigt.

Der thermische Komfort beeinflusst zudem – zumindest im Sommer – das gewünschte Helligkeitsniveau am Arbeitsplatz und ist damit auch für die Zufriedenheit mit der Beleuchtung relevant. Daher ist ein genaueres Verstehen der Einflussgrößen des thermischen Komforts auch für den visuellen Komfort von Interesse.

Zur Einordnung der an den untersuchten Arbeitsplätzen gemessenen Temperaturen wurden diese mit den Anforderungen der DIN EN 15251 „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“ verglichen. Dabei wurden für jeden Arbeitsplatz nur die Temperaturen berücksichtigt, die während der vom jeweiligen Nutzer angegebenen Arbeitszeiten aufgetreten sind.

Die Norm DIN EN 15251 definiert Komfortbereiche für Innentemperaturen abhängig von der Außentemperatur. Die Tagesmittelwerte der Außentemperatur wurden aus eigenen Messwerten berechnet. Bei den Gebäuden in Karlsruhe und Stuttgart wurden die eigenen Messwerte für die Berechnung der gleitenden mittleren Außentemperatur nach DIN EN 15251 mit Daten des Deutschen Wetterdienstes DWD ergänzt, da Daten von Messstationen in diesen Städten frei verfügbar waren.

Beim Gebäude der LBBW Mannheim erfolgte die Messung der Außentemperatur auf dem blechgedeckten Dach des Gebäudes. Die Messwerte liegen in allen Jahreszeiten auffällig hoch und weisen eine deutliche Diskrepanz zu den Werten des DWD auf von bis zu 5 °C bei der gleitenden mittleren Außentemperatur nach DIN EN 15251. Bei diesem Gebäude werden daher die eigenen Messwerte, die möglicherweise durch das dunkle Blechdach des Gebäudes beeinflusst wurden, durch Werte des DWD ersetzt. Auch beim Gebäude der Braun GmbH in Kronberg liegen die eigenen Messwerte deutlich über den Messwerten der Wetterstation des DWD in Frankfurt/Palmengarten. Auch für dieses Gebäude wurden die Messwerte der Außentemperatur durch die Daten des DWD ersetzt.

Die DIN EN 15251 unterscheidet zwischen „maschinell gekühlten Gebäuden“ und „Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage“. Dabei darf ein Gebäude mit maschineller Lüftung mit ungekühlter Luft im Sommer als „Gebäude ohne maschinelle Kühlanlage“ betrachtet werden, sofern in dem Gebäude dem Öffnen und Schließen von Fenstern zur Regelung des Raumklimas der Vorzug gegeben wird (DIN EN 15251:2007-08, S. 28). Drei der untersuchten Gebäude entsprechen dieser Definition „ungekühlter“ Gebäude (Universität Karlsruhe, Fraunhofer ISE und Solar Info Center in Freiburg).

Für maschinell gekühlte Gebäude sind Mindestwerte für die Heizperiode und Höchstwerte für die Kühlperiode angegeben. Als Höchstwerte der Heizperiode und Mindestwerte der Kühlperiode wurden die in Anhang A.3 der Norm „Empfohlene Innentemperaturen für Energieberechnungen“ angegebenen Werte übernommen. Die Unterscheidung zwischen Heiz- und Kühlperiode wurde entsprechend dem Normentwurf prEN 15251:2005-07 bei 12 °C bis 13 °C mittlerer Außentemperatur (Mittelwert der Tageshöchsttemperatur und der nächtlichen Tiefsttemperatur) getroffen.

Für Gebäude ohne maschinelle Kühlanlagen sind für die Kühlperiode obere und untere Temperaturgrenzen in Abhängigkeit von der gleitenden mittleren Außentemperatur festgelegt, für die Heizperiode gelten die Anforderungen für maschinell gekühlte Gebäude.

Die in DIN 15251 angegebenen Temperaturintervalle beruhen „unter Berücksichtigung typischer Aktivitätsniveaus und typischer Wärmedämmwerte der (Winter- und Sommer-) Bekleidung, wie in EN ISO 7730 ausführlich beschrieben, auf Indizes der thermischen Behaglichkeit [dem vorausgesetzten Prozentsatz Unzufriedener (en.: Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD)]“ (DIN EN 15251:2007-08, S. 13). Als typisches Aktivitätsniveau wird in DIN EN 15251 „sitzende Aktivitäten“ mit einem Energieumsatz in metabolischen Einheiten von 1,2 met angenommen und ein Wärmedämmwert der Bekleidung von 0,5 clo im Sommer bzw. 1,0 clo im Winter. DIN EN 15251 geht zudem von einer „niedrigen Luftgeschwindigkeit“ aus (DIN EN 15251:2007-08, S. 25). Das Bekleidungs- und die Aktivitätsrate der Nutzer wurde in der vorliegenden Untersuchung ebenso wenig erfasst wie die Luftgeschwindigkeit. Eine Berechnung des PPD-Wertes nach DIN EN ISO 7730 ist daher nicht möglich.

In der Heizperiode entsprechen Temperaturen zwischen 20 °C und 24 °C der Kategorie II der DIN EN 15251, die für neue und renovierte Gebäude empfohlen wird und von einem „normalen Maß an Erwartungen“ und bis zu 10 % unzufriedener Nutzer ausgeht. Im Sommer sind komfortable Innentemperaturen höher und steigen bei ungekühlten Gebäuden mit der Außentemperatur an. In den Streudiagrammen der Innentemperatur über der Außentemperatur ist der Temperaturbereich der Kategorie II blau hinterlegt.

Raumtemperatur im Messzeitraum

In den drei nicht maschinell gekühlten Gebäuden liegen nur 3,5 % der Messwerte unterhalb des Komfortbereichs und 11,4 % der Messwerte oberhalb. 85,1 % der Messwerte entsprechen dem Komfortbereich der Norm (Abbildung 51).

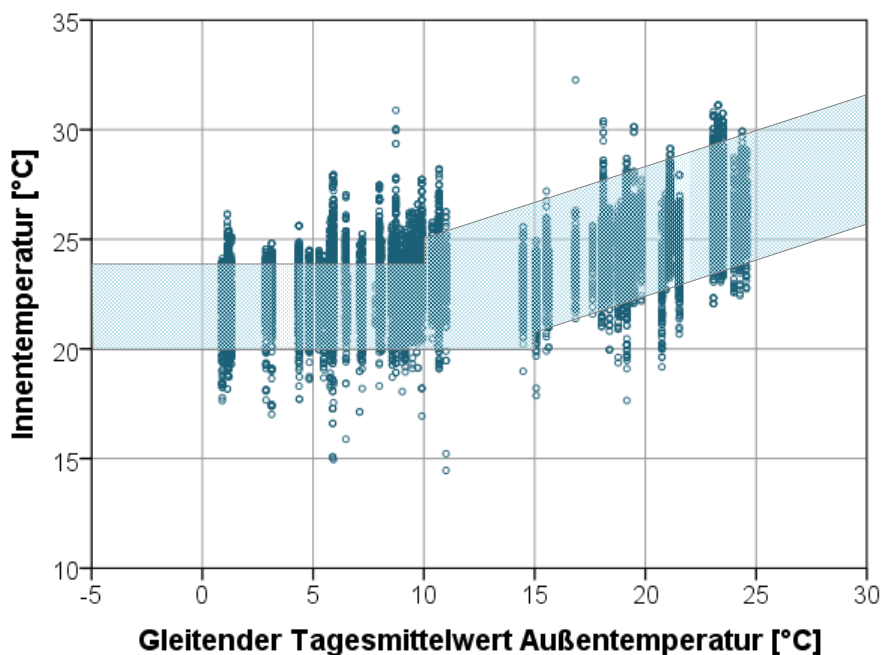


Abbildung 51 Streudiagramm der Stundenmittelwerte der Innentemperatur während der üblichen Arbeitszeit der Nutzer über dem gleitenden Tagesmittelwert der Außentemperatur nach DIN EN 15251 für die drei nicht-maschinell gekühlten Gebäude. Der Temperaturbereich der Kategorie II ist blau hinterlegt.

Die wenigen „zu niedrigen“ Temperaturen traten gleichermaßen in der Heiz- und in der Kühlperiode auf: 51 % der gemessenen Innentemperaturen unterhalb des Komfortbereichs traten bei einem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur unter 15 °C auf (Heizperiode/kalte Jahreszeit), 49 % der „zu kalten“ Innentemperaturen wurden in der warmen Jahreszeit gemessen.

Anders bei den „zu hohen“ Innentemperaturen: 84 % der Innentemperaturen oberhalb des Komfortbereichs traten bei einem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur unter 10 °C auf, nur 16 % der „zu warmen“ Temperaturen traten in der warmen Jahreszeit (Kühlperiode) auf. Die Innentemperaturen der Gebäude waren also in der Heizperiode gelegentlich zu hoch, entsprachen aber insgesamt dem Komfortbereich der Norm sehr gut.

Die Bewertung der Nutzer dieser drei Gebäude entspricht nicht den nach DIN EN 15251 zu erwartenden Bewertungen. Die Temperaturen im Winter wurden trotz vieler „zu warmer“ Messwerte oberhalb des Komfortbereichs überwiegend als weder zu kalt noch zu warm empfunden. Im Sommer dagegen wurden die Temperaturen als eher zu warm empfunden, während die Norm aufgrund der sehr hohen Übereinstimmung mit dem Komfortbereich ein im Mittel neutrales Nutzerurteil erwarten ließe (Abbildung 52).

Mittelwert des Temperaturempfindens am Arbeitsplatz im Messzeitraum

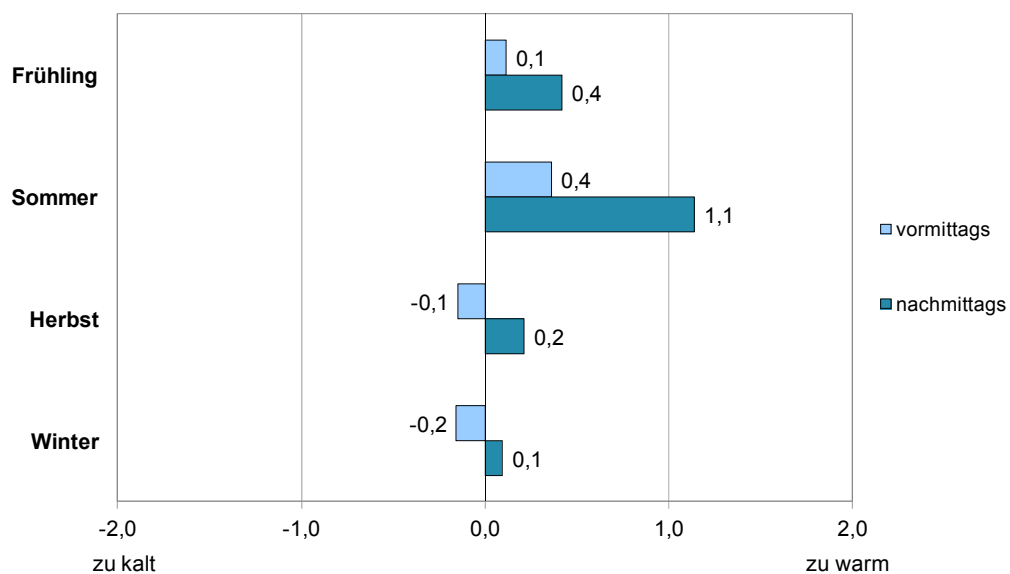


Abbildung 52 Nutzerbewertung der Innentemperatur in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit für die drei nicht-maschinell gekühlten Gebäude (vormittags N=347, nachmittags N=343)

Sechs der Gebäude werden im Sommer maschinell gekühlt oder mit gekühlter Zuluft versorgt. In der Heizperiode entsprechen Temperaturen zwischen 20 °C und 24 °C der Kategorie II nach DIN EN 15251. Der Temperaturbereich der Kategorie II im Sommer (Kühlperiode) ist schmaler als in Gebäuden ohne maschinelle Kühlung, komfortable Innentemperaturen liegen der Norm zufolge zwischen 23 °C und 26 °C.

Die Bandbreite der gemessenen Innentemperaturen ist in allen Jahreszeiten größer als der Komfortbereich (Abbildung 53). 6,9 % der gemessenen Innentemperaturen dieser Gebäude liegen unterhalb des Komfortbereichs, 26,9 % der Messwerte liegen oberhalb.

Die Innentemperaturen der Heizperiode nach prEN 15251 liegen mit durchschnittlich 23,7 °C nur wenig niedriger als die Innentemperaturen der Kühlperiode mit durchschnittlich 24,4 °C. Dementsprechend traten nur 9 % der gemessenen Innentemperaturen unterhalb des Komfortbereichs bei einer mittleren Außentemperatur unter 13 °C auf (Heizperiode/kalte Jahreszeit), 91 % der „zu kalten“ Innentemperaturen wurden in der warmen Jahreszeit gemessen. Ebenso traten 80 % der Innentemperaturen oberhalb des Komfortbereichs bei einer mittleren Außentemperatur unter 12 °C auf, nur 20 % der „zu warmen“ Temperaturen traten in der warmen Jahreszeit (Kühlperiode) auf.

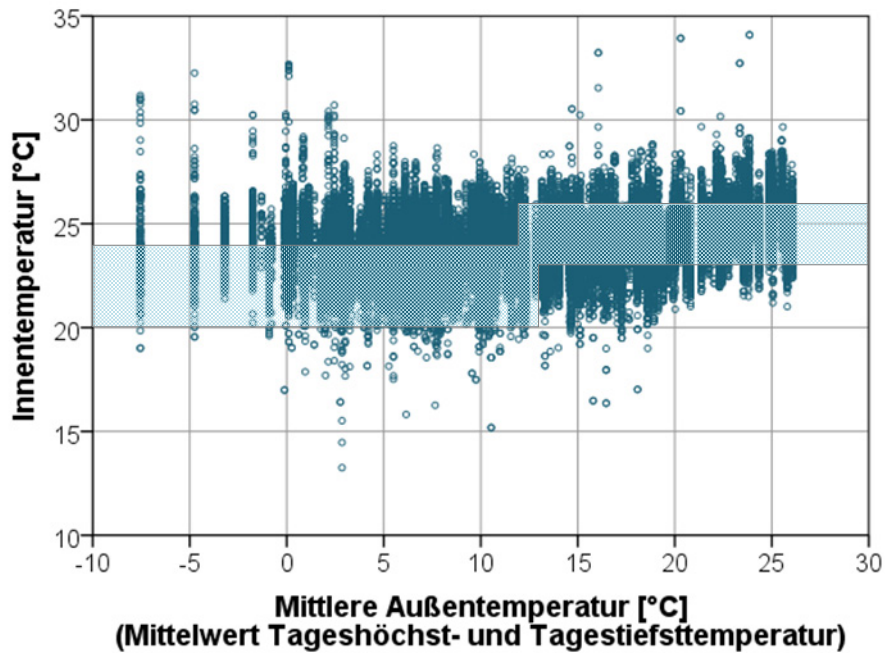


Abbildung 53 Streudiagramm der Stundenmittelwerte der Innentemperatur während der üblichen Arbeitszeit der Nutzer über der mittleren Außentemperatur nach prEN 15251:2005 für die sechs maschinell gekühlten Gebäude. Der Temperaturbereich der Kategorie II nach DIN EN 15251 ist blau hinterlegt.

DIN EN 15251 zufolge liegen die Innentemperaturen in der Heizperiode in diesen sechs Gebäuden also häufig zu hoch, während in der Kühlperiode zahlreiche Nutzungsstunden eine zu niedrige Raumtemperatur aufweisen.

Mittelwert des Temperaturempfindens am Arbeitsplatz im Messzeitraum

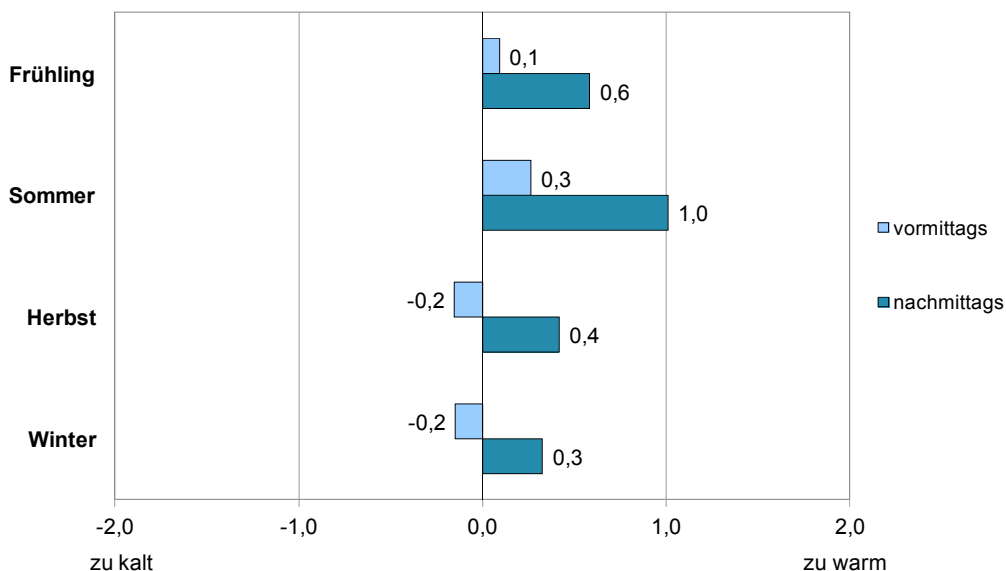


Abbildung 54 Nutzerbewertung der Innentemperatur in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit für die sechs maschinell gekühlten Gebäude (vormittags N=585, nachmittags N=572)

Die Nutzer dagegen empfanden die Innentemperaturen im Winter und Herbst als weder zu warm noch zu kalt und im Frühling und Sommer als eher zu warm (Abbildung 54), obwohl die Temperaturen kaum höher waren als in der Heizperiode. Diese Nutzerbewertung im Sommer trotz vieler „zu kühler“ Temperaturen könnte davon beeinflusst sein, dass die Nutzer in einem gekühlten Gebäude niedrigere Temperaturen erwarten.

Dieser Diskrepanz zwischen den Nutzerbewertungen und den Komfortbereichen der DIN EN 15251 entsprechend, korreliert der Anteil der Arbeitsstunden, zu denen die Innentemperatur dem Komfortbereich II nach DIN EN 15251 entsprochen hat, nicht mit der Zufriedenheit mit der Temperatur am Arbeitsplatz (Pearson's $r=0.02$, $p=0.487$, $N=944$).

Mit der Temperatur an ihrem Arbeitsplatz in der jeweiligen Jahreszeit sind 29 % der Nutzer eher oder sehr unzufrieden, 39 % sind weder zufrieden noch unzufrieden, 32 % sind eher oder sehr zufrieden. Die Zufriedenheit der Nutzer mit der Temperatur an ihrem Arbeitsplatz ist im Sommer mit durchschnittlich 2,77 (bei „sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5) signifikant geringer als in den anderen Jahreszeiten (Frühling 3,04, Herbst 3,19, Winter 3,20; ANOVA: $F=8.72$, $p<0.001$, $N=958$, Effektstärke $f=0.17$).

Die Zufriedenheit mit der Temperatur am Arbeitsplatz in der jeweiligen Jahreszeit wird beeinflusst von

- der Zufriedenheit mit der Wirksamkeit der Temperaturveränderung ($t=16.8$, $p<0.001$),
- der Zufriedenheit mit der Temperatur nachmittags im Messzeitraum ($t=5.5$, $p<0.001$),
- der Häufigkeit störender Zugluft im Messzeitraum ($t=5.1$, $p<0.001$),
- der Zufriedenheit mit der Temperatur vormittags im Messzeitraum ($t=4.1$, $p<0.001$),
- der Zufriedenheit mit der momentanen Temperatur ($t=3.6$, $p<0.001$).

Diese fünf Einflussgrößen erklären 51 % der Varianz der Zufriedenheit mit der Temperatur im Messzeitraum (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.507$, $R^2_{\text{kor}}=0.503$, $F=155.1$, $N=759$; Details siehe Anhang A14).

Die Zufriedenheit mit der Wirksamkeit der Temperaturveränderung ist mit großem Abstand die wichtigste Einflussgröße. Abbildung 55 zeigt, welche Möglichkeiten die Probanden zumeist genutzt haben, wenn sie die Temperatur ändern wollten.

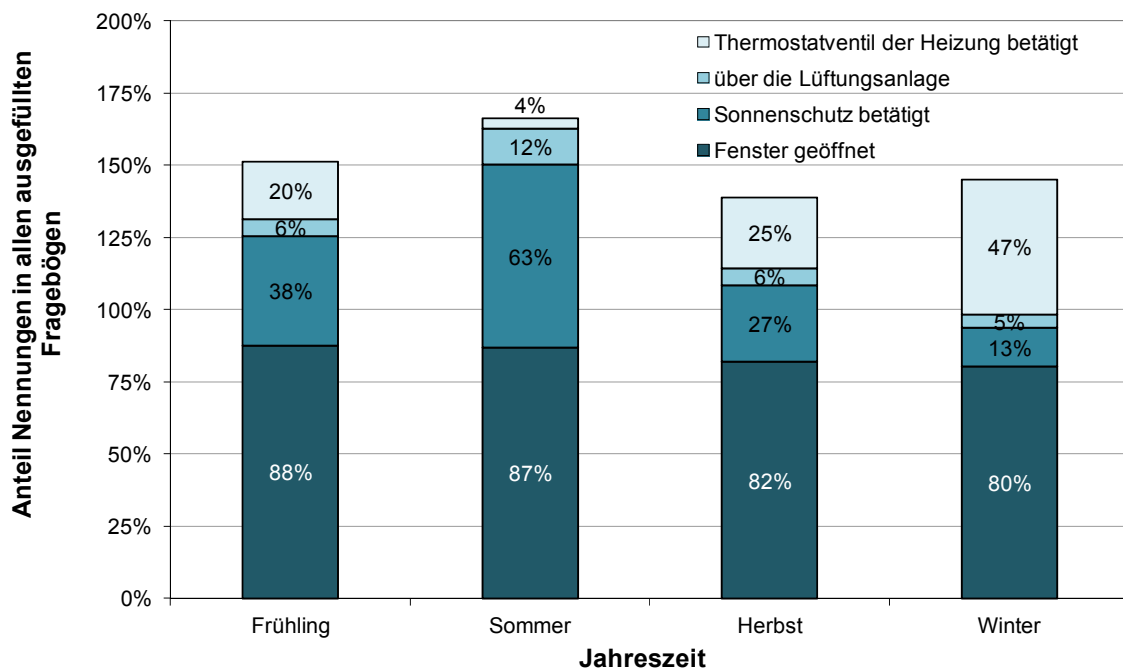


Abbildung 55 Anteil der Fragebögen mit der Angabe, dass die jeweilige Möglichkeit, die Temperatur zu verändern, häufig genutzt wurde (Mehrfachantworten möglich) in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Das Öffnen der Fenster ist in allen Jahreszeiten die meistgenutzte Möglichkeit, auch in Gebäuden mit Lüftungsanlage und in Gebäuden mit maschineller Kühlung. Dem entspricht die

signifikant geringere Zufriedenheit mit der Wirksamkeit der Temperaturveränderung im Sommer (durchschnittlich 2,54 bei „sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5; Frühling 2,95, Herbst 2,91, Winter 3,07; ANOVA: $F=9.60$, $p<0.001$, $N=847$, Effektstärke $f=0.18$): Bei sommerlichen Außentemperaturen führt das Öffnen der Fenster nicht in jedem Fall zur gewünschten Änderung der mehrheitlich als eher zu warm empfundenen Innentemperaturen.

Die Nutzer wurden gefragt, wie oft sie die Fenster zu verschiedenen Tageszeiten im Messzeitraum geöffnet haben. In allen Jahreszeiten gaben die Nutzer für „morgens“ die größte Häufigkeit an (Mittelwert 14 % „nie“, 8 % „selten“, 14 % „gelegentlich“, 18 % „oft“, 46 % „immer“, $N=898$).

Auch die Jahreszeiten unterscheiden sich deutlich: Im Sommer wird für alle Tageszeiten häufiger als in den anderen Jahreszeiten angegeben, dass die Fenster „immer“ geöffnet wurden (Abbildung 56).

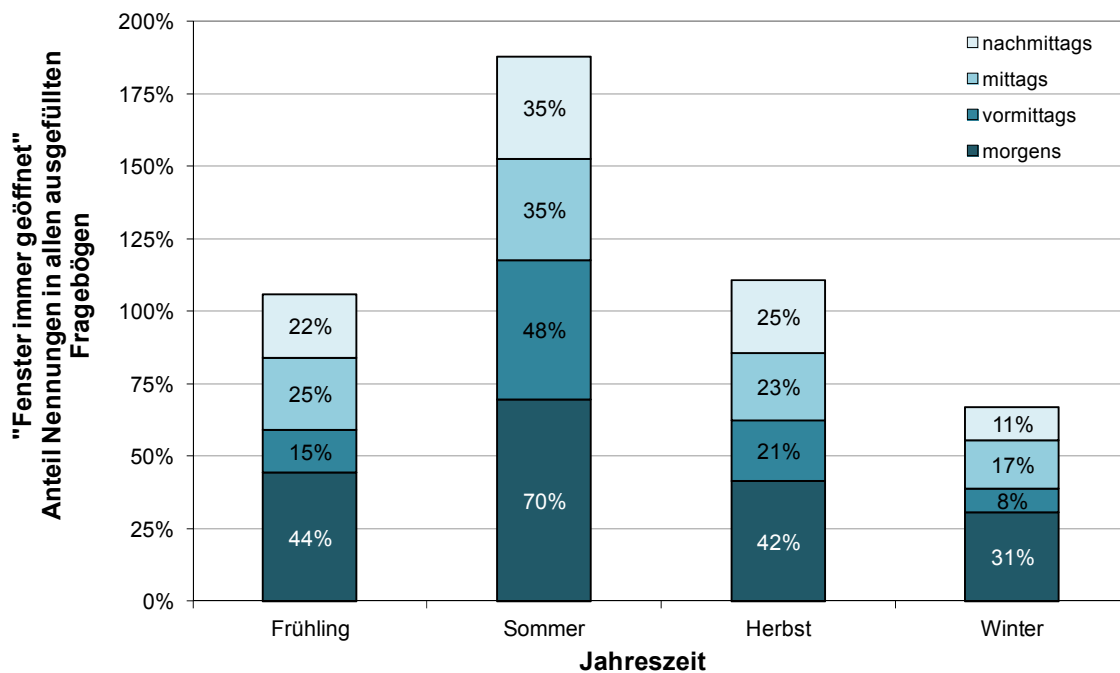


Abbildung 56 Anteil der Fragebögen mit der Angabe, dass das Fenster zur jeweiligen Tageszeit „immer“ geöffnet wurde, in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Die Antworten für Gebäude mit maschineller Kühlung und Gebäude ohne maschinelle Kühlung unterscheiden sich lediglich im Sommer bei den Angaben zum Lüftungsverhalten mittags und nachmittags: 50 % bzw. 49 % der Nutzer ungekühlter Gebäude geben an, das Fenster „immer“ geöffnet zu haben, während nur 25 % bzw. 26 % der Nutzer gekühlter Gebäude das Fenster nach eigenen Angaben im Sommer „immer“ mittags bzw. nachmittags öffnen. Diese Unterschiede sind signifikant (Chi²-Test: „mittags“ $Chi^2=13.6$, $p=0.009$, $N=208$, $Phi=0.256$; „nachmittags“ $Chi^2=12.5$, $p=0.014$, $N=199$, $Phi=0.251$).

Ob die Probanden ihre Fenster nur kurzzeitig und in Abhängigkeit von Innen- und Außentemperatur oder über längere Zeit und auch bei hohen Außentemperaturen geöffnet haben, wurde nicht erfasst.

Die Lage des Arbeitsplatzes an einem Atrium und die Büroform (Zellenbüro/Großraumbüro) weisen keinen signifikanten Einfluss auf die Zufriedenheit mit der Temperatur auf.

Akzeptierte Raumtemperatur

Neben der Frage, wie zufrieden die Nutzer mit den vorhandenen Innentemperaturen sind, ist von Interesse, mit welchem Temperaturniveau die Nutzer zufrieden sind, und wovon das gewünschte Temperaturniveau beeinflusst wird.

64 % der Nutzer, zu deren Temperaturbewertung ein Messwert vorliegt ($N=617$), empfinden die aktuelle Temperatur an ihrem Arbeitsplatz als weder warm noch kalt. Der Anteil neutraler Temperaturbewertungen liegt für Temperaturen der Kategorie I und für Temperaturen der Kategorie III gleichermaßen bei 66 %. Auch der Anteil Nutzer, die die Temperatur als „sehr kalt“ oder „sehr warm“ empfinden („unzufriedene Nutzer“), unterscheidet sich nicht systematisch in Abhängigkeit von der Kategorie nach DIN EN 15251 und deckt sich nicht mit dem zu erwartenden Anteil Unzufriedener (PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied) nach DIN EN 15251 (siehe Tabelle 11).

Kategorie	Anteil unzufriedener Nutzer	
	Befragung	PPD nach DIN EN 15251
Kategorie I	8,6 % ($N=290$)	< 6 %
Kategorie II	9,9 % ($N=151$)	< 10 %
Kategorie III	6,8 % ($N=117$)	< 15 %
außerhalb	10,2 % ($N=59$)	> 15 %

Tabelle 11 Anteil unzufriedener Nutzer in der Stichprobe und Erwartungswert gemäß DIN EN 15251 in Abhängigkeit von der Kategorie des Innenraumklimas nach DIN EN 15251

Die Frage nach den erwünschten Temperaturverhältnissen am Arbeitsplatz wird in Gebäuden mit maschineller Kühlung anders beantwortet als in Gebäuden ohne maschinelle Kühlung. Während in den ungekühlten Gebäuden der Wunsch „Ich hätte es lieber deutlich kälter“ nur von einer Person im Sommer genannt wird (0,2 %, $N=340$), wird der Wunsch nach einer deutlich niedrigeren Temperatur in Gebäuden mit maschineller Kühlung in allen Jahreszeiten von mehreren Personen angegeben (3,7 %, $N=572$). Die Nennung der anderen Kategorien unterscheidet sich nicht auffällig.

71,8 % der Probanden ($N=912$) wünschen zum Zeitpunkt der Befragung weder eine höhere noch eine niedrigere Temperatur, sind also mit der vorhandenen Temperatur zufrieden. Die folgende Abbildung 57 zeigt die Innentemperaturen aller Befragungen, bei denen die Nutzer mit der momentan vorhandenen Temperatur zufrieden waren.

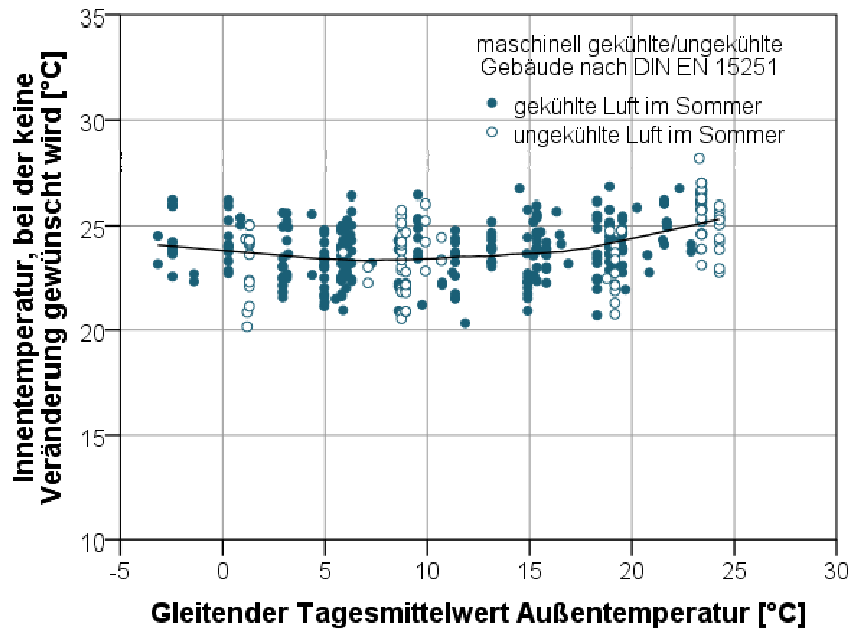


Abbildung 57 Streudiagramm der Innentemperatur während der Befragung über dem gleitenden Tagesmittelwert der Außentemperatur nach DIN EN 15251 für alle Befragungen, bei denen keine Veränderung der Temperatur am Arbeitsplatz gewünscht wurde, für Gebäude mit und ohne maschinelle Kühlung

Trotz des deutlich häufiger geäußerten Wunsches nach niedrigeren Innentemperaturen in gekühlten Gebäuden und im Gegensatz zu DIN EN 15251 bestehen zwischen Gebäuden mit maschineller Kühlung und Gebäuden ohne maschinelle Kühlung in dieser Stichprobe keine signifikanten Unterschiede bei der Temperatur, mit der die Nutzer zufrieden sind.

Die Innentemperaturen, mit der die Nutzer zufrieden sind, liegen zwischen 20,2 °C und 28,2 °C. Die Mittelwerte unterscheiden sich signifikant je nach Jahreszeit (Herbst 23,1 °C, Winter 23,3 °C, Frühling 23,7 °C, Sommer 24,6 °C; ANOVA: $F=31.9$, $p<0.001$, $N=601$, Effektstärke $f=0.40$).

Die als angenehm empfundenen Temperaturen liegen in dieser Stichprobe in der Heizperiode höher als von DIN EN 15251 empfohlen und steigen unterhalb eines gleitenden Tagesmittelwerts der Außentemperatur von ca. 8 °C leicht an: Bei kälteren Außentemperaturen werden wärmere Innentemperaturen bevorzugt.

Die Messwerte der Innentemperatur entsprechen in dieser Untersuchung allerdings eher der Raumlufttemperatur als der operativen Raumtemperatur, auf die sich DIN EN 15251 bezieht. Die Norm legt dazu fest: „In den meisten Fällen kann die mittlere Raumlufttemperatur als Auslegungstemperatur verwendet werden, falls jedoch die Temperaturen von großen Raumbooberflächen signifikant von der Lufttemperatur abweichen, sollte die operative Temperatur verwendet werden.“ (DIN EN 15251:2007-08, S. 25)

Große Unterschiede zwischen Raumlufttemperatur und Raumbooberflächentemperatur sind bei niedrigen Außentemperaturen an Außenwänden mit niedrigem Dämmstandard oder großen Fensterflächen zu erwarten. Besonders niedrige Außentemperaturen traten bei Messungen in einem Gebäude mit Ganzglasfassade auf, die als Doppelfassade mit einem U-Wert von 1,1 W/(m²K) ausgeführt wurde (Plesser, Bremer, Hemminger & Fisch, 2007). Trotz des guten Dämmstandards dieses Gebäudes kann die Oberflächentemperatur der Fensterscheiben unter der Raumlufttemperatur gelegen haben, so dass die operative Temperatur niedriger war als die hier angegebene Innentemperatur.

Stärker als von der Außentemperatur wird die Höhe der Innentemperatur, mit der Nutzer zufrieden sind, in der vorliegenden Stichprobe von der Uhrzeit beeinflusst, zu der die Bewertung der Temperatur abgegeben wurde (Abbildung 58).

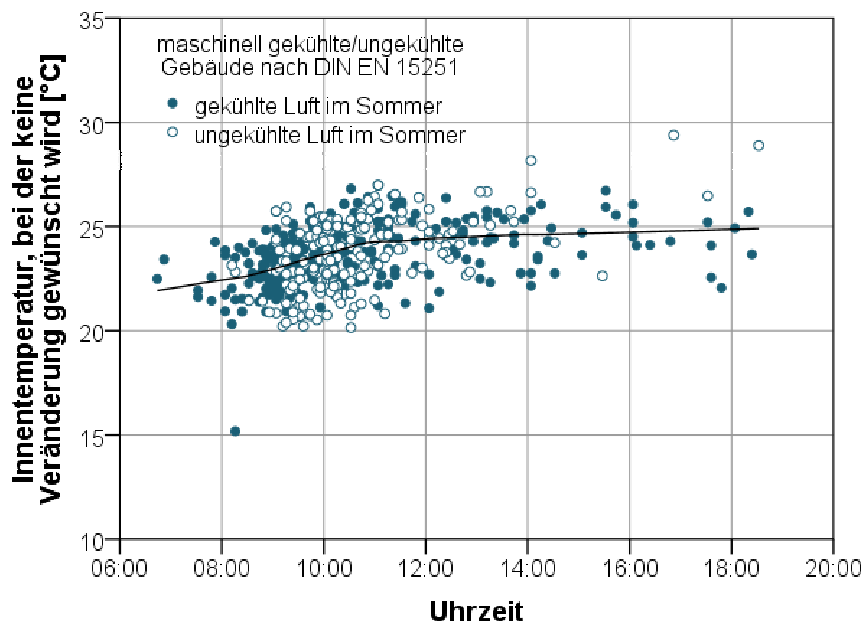


Abbildung 58 Streudiagramm der Innentemperatur während der Befragung über der Uhrzeit, zu der die Befragung stattfand, für alle Befragungen, bei denen keine Veränderung der Temperatur am Arbeitsplatz gewünscht wurde, für Gebäude mit und ohne maschinelle Kühlung

Während der Mittelwert der Temperaturen, mit der Nutzer zufrieden sind, vor 9:00 Uhr morgens bei 22,4 °C liegt, beträgt der Mittelwert dieser Temperaturen zwischen 9:00 Uhr und 11:00 Uhr 23,5 °C und zwischen 11:00 Uhr und 13:00 Uhr 24,4 °C.

Ab 12:00 Uhr wird das akzeptierte Temperaturniveau in der vorliegenden Stichprobe nicht von der Uhrzeit beeinflusst. Da 81,7 % der Befragungen vor 12:00 Uhr stattgefunden haben (N=617), liegen nachmittags zu wenige Daten vor, um Aussagen über den Einfluss der Uhrzeit treffen zu können. Auch in der gesamten Stichprobe (N=923) inklusive der Nutzer, die sich eine Änderung der Innentemperatur wünschen, haben 81,7 % der Befragungen vor 12:00 Uhr stattgefunden, der Anteil zufriedener Nutzer ist also vormittags und nachmittags gleich hoch.

Die Höhe der Innentemperatur, mit der die Nutzer zufrieden sind, wird von folgenden drei Faktoren beeinflusst:

- Uhrzeit bis 12:00 Uhr, nachmittags konstant ($t=9.4$, $p<0.001$),
- gleitender Tagesmittelwert der Außentemperatur entsprechend DIN EN 15251, unter 10 °C konstant ($t=7.8$, $p<0.001$),
- Anteil der Fensterfläche (Rohbauöffnung) an der Nettofassade ($t=4.1$, $p<0.001$).

Auch mit zunehmendem Fensterflächenanteil werden höhere Innentemperaturen akzeptiert: Bei einer Ganzglasfassade (100 % Fensterflächenanteil) liegen die akzeptierten Innentemperaturen ca. 0,5 °C höher als bei einem Fensterflächenanteil von 50 %.

Diese drei Einflussgrößen erklären mit 81 % einen großen Teil der Varianz der akzeptierten Innentemperatur während der Befragung (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.812$, $R^2_{\text{korr}}=0.803$, $F=520.9$, $N=367$; Details siehe Anhang A15).

Eine mögliche Erklärung für den Anstieg der akzeptierten bzw. gewünschten Temperatur im Lauf des Vormittags könnte ein nach dem Weg zum Arbeitsplatz im Lauf des Vormittags sinkender Energieumsatz (met-Wert) der Probanden sein. Der Zusammenhang mit der Uhrzeit, zu der die Temperaturbewertung abgegeben wurde, ist jedoch stärker als der Zusammenhang mit der Anzahl Stunden seit dem üblichen Arbeitsbeginn – damit lassen sich nur 75 % der Varianz erklären.

Der übliche Arbeitsbeginn der Nutzer liegt zwischen 6:00 Uhr und 13:00 Uhr. Bei 30 % der Befragungen wird ein Arbeitsbeginn vor 7:30 Uhr angegeben, bei 20 % der Befragungen ein Arbeitsbeginn nach 8:45 Uhr. Diese – relativ großen – Unterschiede legen nahe, dass der Tagesablauf und damit auch der met-Wert der Nutzer sich vormittags deutlich unterscheiden. Der stärkere Zusammenhang mit der Uhrzeit deutet darauf hin, dass neben dem met-Wert weitere Einflussfaktoren eine Rolle spielen, die von der (absoluten) Uhrzeit abhängen.

Einer dieser Faktoren könnte sein, dass die Nutzer aufgrund ihrer Erfahrung davon ausgehen, dass die Räume im Tagesverlauf wärmer werden und dies auch akzeptieren.

Die akzeptierte Innentemperatur setzt sich in dieser Stichprobe der Regressionsanalyse zufolge folgendermaßen zusammen:

$$\theta_i = 16,56 + 0,505 t + 0,011 f + 0,092 \theta_{rm} \quad (6)$$

mit	θ_i	Innentemperatur, bei der keine Veränderung gewünscht wird [°C]
	t	Uhrzeit [h] für Zeiten zwischen 7:00 und 12:00 Uhr, ab 12:00 Uhr gilt $t=12$
	f	Anteil der Fensterfläche (Rohbauöffnung) an der Nettofassade [%]
	θ_{rm}	gleitender Mittelwert der Außentemperatur nach DIN EN 15251 [°C]

Der starke Zusammenhang zwischen Uhrzeit und akzeptierter Innentemperatur deckt sich mit Ergebnissen einer früheren Untersuchung zum sommerlichen thermischen Komfort (Wagner, Gossauer, Moosmann, Gropp & Leonhart, 2007).

In dieser Untersuchung lag der Mittelwert der operativen Innentemperatur, bei der Nutzer keine Veränderung wünschten, vormittags (Mittelwert 9:08 Uhr) bei 23,78 °C, während er nachmittags (Mittelwert 14:55 Uhr) bei 25,24 °C lag. Der Regressionskoeffizient von 0,505 prognostiziert von 9:08 Uhr bis 12:00 Uhr einen Temperaturanstieg um 1,45 K, die gemessene Temperaturdifferenz lag bei 1,46 K.

Die Lage des Arbeitsplatzes an einem Atrium, die Büroform (Zellenbüro/Großraumbüro) und der Einsatz einer maschinellen Kühlung beeinflussen die Höhe der akzeptierten Innentemperaturen in der vorliegenden Stichprobe nicht signifikant.

Der Vergleich mit den Anforderungen der DIN EN 15251 zeigt, dass die untersuchten Gebäude bei niedrigen Außentemperaturen häufig Werte oberhalb des Komfortbereichs II der Norm aufwiesen und bei hohen Außentemperaturen häufig Werte unterhalb des Komfortbereichs II aufwiesen.

Die Nutzer empfanden die Innentemperaturen trotz der relativ hohen gemessenen Innentemperaturen im Winter teilweise als zu niedrig. Im Sommer wurden die Gebäude mehrheitlich als eher zu warm bewertet, obwohl die gemessenen Werte häufig unterhalb des Komfortbereichs lagen und nur wenige Überschreitungen des Komfortbereichs gemessen wurden. Die Bewertung der Innentemperatur nach DIN EN 15251 deckt sich nicht mit der von den Nutzern empfundenen Beeinträchtigung ihrer Leistungsfähigkeit durch die sommerlichen Innentemperaturen.

Auch die Analyse der Innentemperaturen, mit denen die Nutzer zufrieden waren, zeigt deutliche Abweichungen vom Komfortbereich der DIN EN 15251. Die akzeptierten Innentemperaturen liegen im Winter deutlich höher als nach DIN EN 15251 und steigen im Sommer sowohl für gekühlte als auch für nicht gekühlte Gebäude weniger stark an. Die Beeinflussung der akzeptierten Innentemperaturen durch die Außentemperatur ist in dieser Stichprobe deutlich geringer als in der Norm. Diese Unterschiede können zum Teil in der Diskrepanz zwischen der gemessenen Lufttemperatur (unbesonnt) und der operativen Temperatur, auf die die Norm sich bezieht, begründet sein.

Ein signifikanter Einfluss von Aspekten des visuellen Komforts wie Zufriedenheit mit der Helligkeit oder Blendungsbewertung auf den thermischen Komfort wurde in der vorliegenden Stichprobe nicht beobachtet.

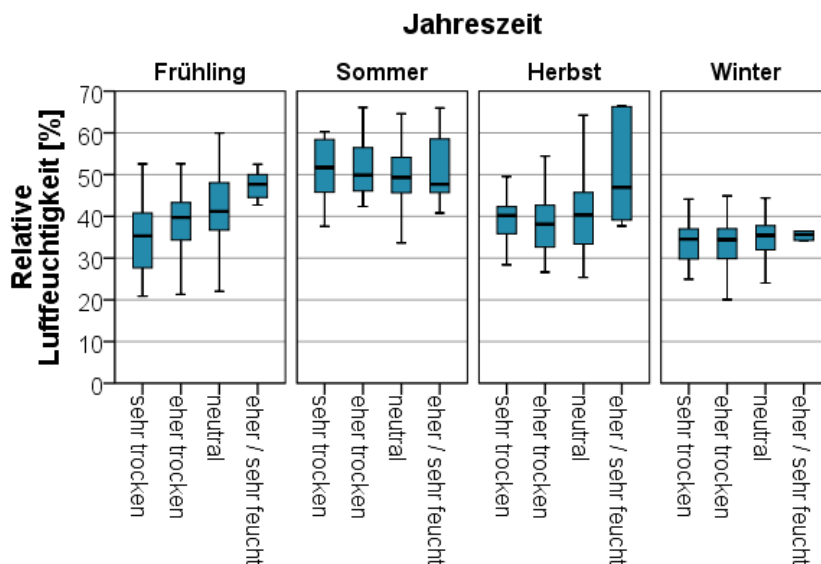
5.2.8 Weitere Aspekte des Raumklimas

Als weitere Aspekte des Raumklimas, die auf die Zufriedenheit der Nutzer und damit potenziell auch auf den visuellen Komfort Einfluss nehmen könnten, wurden Luftqualität und Gerüche sowie der Geräuschpegel untersucht. Während die Luftqualität und der Geräuschpegel die Nutzer nach eigener Angabe in ihrer Leistungsfähigkeit einschränken, sind Gerüche aus Sicht der Nutzer weniger problematisch.

Luftqualität und Gerüche

Die relative Luftfeuchtigkeit während der Arbeitszeit der Nutzer liegt im Winter bei 31 %, im Frühling bei 38 %, im Herbst bei 42 % und im Sommer bei 51 %. Diese Unterschiede sind signifikant (ANOVA: $F=411$, $p<0.001$, $N=968$, Effektstärke $f=1.13$).

Bei 41,0 % aller Befragungen wird die Luft in der entsprechenden Jahreszeit als eher oder sehr trocken bewertet, bei 53,1 % als neutral und nur bei 5,7 % als eher oder sehr feucht. Die Bewertung der Nutzer unterscheidet sich zwischen den Jahreszeiten deutlich weniger stark als die gemessene relative Luftfeuchtigkeit.



Wie empfinden Sie im Moment die Luftfeuchte in Ihrem Büro?

Abbildung 59 Boxplot der relativen Luftfeuchtigkeit über der Nutzerbewertung der Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Ein Zusammenhang zwischen Nutzerbewertung der Feuchtigkeit und Messwert besteht nur im Frühling und Herbst, im Sommer und Winter gibt es keinen Zusammenhang (Abbildung 59).

Die Bewertung der Luftfeuchtigkeit durch die Nutzer korreliert stark mit den Angaben der Nutzer zur Häufigkeit einer trockenen Nase (Pearson's $r=0.50$, $p<0.001$, $N=895$), trockener Augen (Pearson's $r=0.45$, $p<0.001$, $N=8905$) und trockener Haut/Kopfhaut (Pearson's $r=0.43$, $p<0.001$, $N=882$). Die Angaben zu diesen Beschwerden sind auch untereinander stark korreliert. Zwischen dem Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit und den Angaben zur Häufigkeit einer trockenen Nase oder trockener Haut/Kopfhaut bestehen signifikante Zusammenhänge (ANOVA F54_3 „trockene Nase“: $F=4.6$, $p=0.001$, $N=912$, Effektstärke $f=0.14$; F54_4 „trockene Haut/Kopfhaut“: $F=5.1$, $p<0.001$, $N=899$, Effektstärke $f=0.15$). Der Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und den Angaben zur Häufigkeit trockener Augen ist nicht signifikant (ANOVA: $F=1.8$, $p=0.127$, $N=918$, Effektstärke $f=0.09$).

An Arbeitsplätzen mit Pflanzen ist die Luftfeuchtigkeit in den einzelnen Jahreszeiten etwas höher. Der Unterschied ist signifikant (ANOVA: $F=10.9$, $p=0.001$, $N=930$, Effektstärke $f=0.11$), aber mit einem durchschnittlich ca. 1 % höheren Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit während der Arbeitszeit nur sehr gering. Die Bewertung der Luftfeuchtigkeit durch die Nutzer wird von den Pflanzen nicht signifikant beeinflusst.

Gerüche an ihrem Arbeitsplatz empfinden 19,6 % der Nutzer als „ziemlich“ oder „sehr stark“ störend ($N=938$). Am häufigsten wird „ein Gemisch aus Gerüchen“ als störend wahrgenommen (12,2 % „ziemlich“/„sehr stark“ störend, $N=904$), seltener der Geruch von Speisen (10,8 % „ziemlich“/„sehr stark“ störend, $N=901$) oder der Geruch von Teppichboden und Möbeln (6,6 % „ziemlich“/„sehr stark“ störend, $N=913$).

Die Bewertung der Luftqualität wird von der Zufriedenheit mit der Luftfeuchtigkeit in der entsprechenden Jahreszeit beeinflusst, von der Wahrnehmung störender Gerüche („Gemisch aus Gerüchen“) und der Temperaturbewertung nachmittags (je wärmer die Temperatur empfunden wird desto schlechter wird die Luftqualität bewertet). Einen signifikanten wenn auch geringeren Einfluss hat die Büroform: Die Luftqualität wird in Großraumbüros im Mittel 0,3 Punkte schlechter bewertet als in Zellenbüros.

Diese vier Einflussgrößen erklären 39 % der Streuung der Bewertung der Luftqualität im Messzeitraum (Regressionsanalyse, Hybrid-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.391$, $R^2_{\text{kor}}=0.387$, $F=62.9$, $N=694$; Details siehe Anhang A16).

Geräuschpegel

Unter den abgefragten Aspekten fühlen sich die Nutzer in ihrer Leistungsfähigkeit am stärksten von Geräuschen beeinträchtigt, insbesondere Nutzer von Großraumbüros.

Der Schallpegel wurde im Rahmen dieser Untersuchung erfasst, es wurden jedoch nur orientierende Messungen durchgeführt. Die Messgeräte können bei Luftzug zu hohe Werte anzeigen. Wenn sie von der Schallquelle abgeschirmt sind – beispielsweise durch einen Monitor oder Ordner – werden zu niedrige Werte gemessen.

Wegen der Ungenauigkeit der Messwerte wurden den Auswertungen die Medianwerte der Schallpegelwerte für jeden Arbeitsplatz während der individuellen Arbeitszeit des Nutzers zugrunde gelegt. Die Beeinflussung des Medianwerts durch Extremwerte, die aufgrund von Messfehlern aufgetreten sein können, ist geringer als die des Mittelwertes.

Die folgende Abbildung 60 zeigt die Medianwerte von Arbeitsplätzen in Zellenbüros und in Großraumbüros.

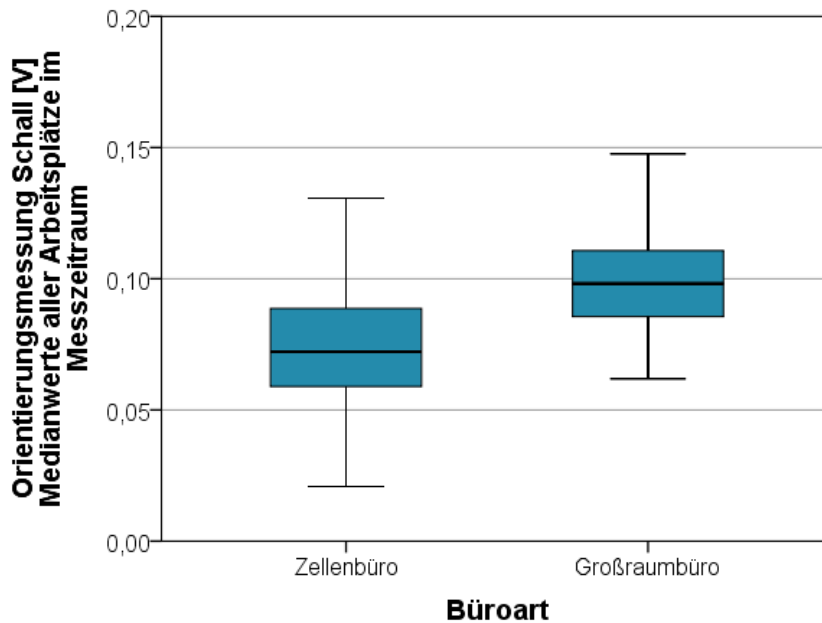


Abbildung 60 Boxplot der Medianwerte der orientierenden Messungen des Schallpegels an allen Arbeitsplätzen in Abhängigkeit von der Büroform

Die Medianwerte der Arbeitsplätze in Großraumbüros liegen deutlich höher als die Medianwerte der Arbeitsplätze in Zellenbüros (Mittelwert der Medianwerte in Zellenbüros 0,076 V, in Großraumbüros 0,098 V). Dieser Unterschied ist signifikant (ANOVA: $F=118$, $p<0.001$, $N=885$, Effektstärke $f=0.37$).

Dieser Wert kann nicht direkt in einen Schallpegel umgerechnet werden, da die Frequenzen des Schalls nicht gemessen werden konnten. Bei einer Schallquelle, in der alle Frequenzen des Hörbereichs mit gleicher Leistung enthalten sind („weißes Rauschen“), entspricht der durchschnittliche Medianwert der Zellenbüros von 0,076 V etwa 58 dB und der durchschnittliche Medianwert der Großraumbüros von 0,098 V etwa 60 dB. Die Lautstärke war in den Großraumbüros etwa 30 % höher als in den Zellenbüros.

Die Zufriedenheit der Nutzer mit dem Geräuschpegel wird vor allem von der Zufriedenheit mit der Schalldämpfung beeinflusst und von der Büroform. Auch der Medianwert der Schallmesswerte während der individuellen Arbeitszeit der Nutzer beeinflusst die Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel signifikant (je kleiner der Messwert desto größer die Zufriedenheit), der Einfluss ist jedoch geringer als der der anderen beiden Faktoren.

Die Zufriedenheit mit der Schalldämpfung, die Büroform und der Medianwert der Messwerte erklären zusammen 36 % der Streuung der Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel (Regressionsanalyse, Hybrid-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.362$, $R^2_{\text{kor}}=0.359$, $F=82.9$, $N=736$; Details siehe Anhang A17).

5.2.9 Architektonische Parameter – Lage und Gestaltung des Gebäudes

Zur Überprüfung der Hypothese, dass architektonische Parameter den visuellen Komfort beeinflussen, wurden zunächst die Einflüsse und Zusammenhänge der untersuchten architektonischen Parameter auf die Nutzerbewertung der Architektur und der Räume analysiert.

Die Bewertung der Lage und Gestaltung der verschiedenen Gebäude fällt erwartungsgemäß je nach Gebäude unterschiedlich aus.

Die durchschnittliche Bewertung der Verkehrsanbindung der Gebäude ist positiv, sie liegt zwischen 3,27 und 4,86 („sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5). Der Aspekt „Einkaufsmöglichkeiten“ wird bei gleicher Skala durchschnittlich mit 2,18 bis 4,30 bewertet, der Aspekt „Erholungsmöglichkeiten“ mit 2,40 bis 3,70. Auch die Zufriedenheit mit dem Stadtviertel, in dem das Gebäude liegt, ist sehr unterschiedlich mit Mittelwerten von 2,75 bis 4,10.

Alle vier Einzelaspekte sind miteinander korreliert, die Aspekte „Einkaufsmöglichkeiten“, „Erholungsmöglichkeiten“ und „Stadtviertel“ weisen hohe Zusammenhänge auf (*Pearson's* $r > 0.50$, $p < 0.001$, $N \geq 563$). Alle vier Aspekte weisen hohe oder sehr hohe Korrelationskoeffizienten zwischen 0,65 und 0,76 mit der Zufriedenheit mit der Lage des Gebäudes insgesamt auf, die durchschnittlich mit 2,87 bis 4,07 neutral bis positiv bewertet wird.

Die Schönheit des Gebäude von außen wird im Mittel mit 2,36 bis 4,42 („hässlich“=1 ... „schön“=5) bewertet. Die Bewertung der neun Gebäude wird von verschiedenen architektonischen Parametern beeinflusst: Die Gebäude, die ganz oder teilweise um 1900 errichtet wurden, werden der Regressionsanalyse zufolge von den Nutzern 0,8 Einheiten „schöner“ empfunden ($t = -6.6$, $p < 0.001$). Eine Ganzglasfassade hat bei den untersuchten Gebäuden eine Verbesserung der Bewertung um 0,5 zufolge ($t = -4.3$, $p < 0.001$), ein Atrium um 0,35 ($t = -3.0$, $p = 0.003$).

Auch die empfundene Selbstbestimmtheit der befragten Nutzer beeinflusst die Bewertung der Schönheit des Gebäudes von außen (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2 = 0.379$, $R^2_{\text{kor}} = 0.377$, $F = 131.3$, $N = 865$; Details siehe Anhang A18). 62 % der Varianz werden von diesen Faktoren jedoch nicht erklärt – so auch die mit 4,32 sehr positive Bewertung des Gebäudes des Umweltbundesamtes, dessen Qualität mit den hier untersuchten Faktoren offenbar nicht umfassend beschrieben wird.

Bemerkenswert ist die Bewertung von Ganzglasfassaden: Der Anteil Nutzer eines Gebäudes mit Ganzglasfassade, der das Gebäude „eher schön“ oder „schön“ empfindet, ist unter den Nutzern, die die Fenster als „eher groß“ oder „zu groß“ bewerten, mit 72 % ($N = 76$) ebenso groß wie unter den Nutzern, die die Fenstergröße als „gerade richtig“ bewerten (69 %, $N = 99$).

Die Bewertungen, wie „schön“ und wie „interessant“ ein Gebäude von außen erscheint, korrelieren signifikant miteinander (*Pearson's* $r = 0.79$, $p < 0.001$, $N = 900$), und auch mit den entsprechenden Bewertungen des Gebäudes von innen („schön“: *Pearson's* $r = 0.63$, $p < 0.001$, $N = 914$; „interessant“: *Pearson's* $r = 0.67$, $p < 0.001$, $N = 916$).

Auch zwischen der Bewertung der Schönheit eines Gebäudes und der Zufriedenheit mit den abgefragten Komfortparametern bestehen signifikante Zusammenhänge. Die Zufriedenheit mit der Beleuchtung des Arbeitsplatzes durch Tageslicht *ohne* Verschattung, die Bewertung des Kunstlichts, die Zufriedenheit mit Temperatur und Luftqualität, mit dem Geräuschpegel und mit der Zufriedenheit mit der Arbeitstätigkeit im Betrieb sind positiv korreliert (*Pearson's* $r \geq 0.16$, $p < 0.001$, $N \geq 819$). Ob die Zufriedenheit in „schönen“ Gebäuden größer ist, diese also milder beurteilt werden, oder ob Gebäude, in denen die Nutzer mit dem Raumklima zufriedener sind, im Mittel als schöner empfunden werden, kann aus den Korrelationen nicht abgeleitet werden.

Ob ein Raum von den Nutzern als beengt oder geräumig empfunden wird, wird signifikant von der Bürofläche beeinflusst, die dem jeweiligen Nutzer zur Verfügung steht. Die Bandbreite der Bürofläche ist mit ca. 4 m² (Büroraum mit „Notarbeitsplätzen“) bis ca. 27 m² pro Person sehr groß. Als weitere Einflussfaktoren konnten die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung und die Zufriedenheit mit der Fenstergröße identifiziert werden. Wie glücklich der befragte Nutzer sich fühlt, hat ebenfalls signifikanten Einfluss (Regressionsanalyse, Hybrid-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.285$, $R^2_{\text{korr}}=0.282$, $F=47.0$, $N=833$; Details siehe Anhang A19).

Ob ein Raum als niedrig oder hoch empfunden wird, hängt ebenfalls stark von der vorhandenen Raumhöhe ab. Ein weiterer signifikanter Faktor ist die Bewertung des Beleuchtungsniveaus im fensterfernen Teil des Raums: Je heller der Raum im fensterfernen Teil empfunden wird, desto höher wird der Raum empfunden (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.365$, $R^2_{\text{korr}}=0.364$, $F=239.3$, $N=838$; Details siehe Anhang A20).

Die empfundene Helligkeit korreliert dabei stark mit der Zufriedenheit mit der künstlichen Beleuchtung. Für Faktoren der Tageslichtversorgung (Bewertung der Tageslichtversorgung, Fensterflächenanteil, Zufriedenheit mit der Fenstergröße) konnten keine signifikanten Zusammenhänge gefunden werden.

Die Bewertung der Dimensionen eines Raums wird neben den tatsächlichen Abmessungen somit stark von der künstlichen Beleuchtung beeinflusst, wobei in der vorliegenden Stichprobe bei der Größe des Raums die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung im Vordergrund steht und bei der Höhe des Raums die Beleuchtung des fensterfernen Teils.

Beide Bewertungen werden möglicherweise von der Helligkeit der Decke beeinflusst, die nicht separat abgefragt wurde.

Die Einrichtung des Büros insgesamt wird mit Gebäudemittelwerten zwischen 3,28 und 3,82 in allen Gebäuden positiv bewertet, die Gebäudemittelwerte der Sauberkeitsbewertung liegen zwischen 2,46 und 4,08 („sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5).

Die Arbeitsplätze sind überwiegend so angeordnet, dass sich die Tür seitlich vom Arbeitsplatz befindet (53 %, $N=906$). Mit dieser Orientierung sind die betroffenen Nutzer mehrheitlich zufrieden (Mittelwert 3,64; „sehr unangenehm“=1 ... „sehr angenehm“=5).

Die Nutzer, deren Zimmertür sich in ihrem zentralen Gesichtsfeld befindet, bewerten die Orientierung im Mittel mit 4,08, während die Nutzer von Arbeitsplätzen, bei denen sich die Tür im Rücken des Arbeitsplatzes befindet, diese im Mittel mit 3,13 bewerten. Diese Unterschiede sind signifikant (ANOVA: $F=41.9$, $p<0.001$, $N=906$, Effektstärke $f=0.30$) und auch in Abbildung 61 deutlich zu sehen.

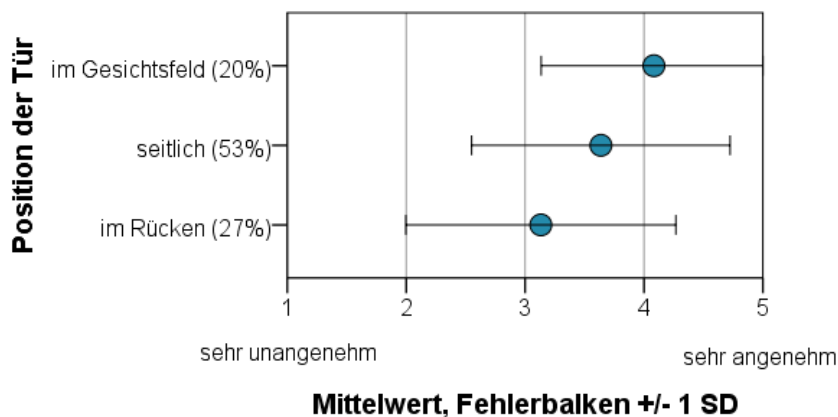


Abbildung 61 Mittelwerte und Standardabweichungen der Bewertung der Orientierung des Arbeitsplatzes zur Tür in Abhängigkeit von der Orientierung

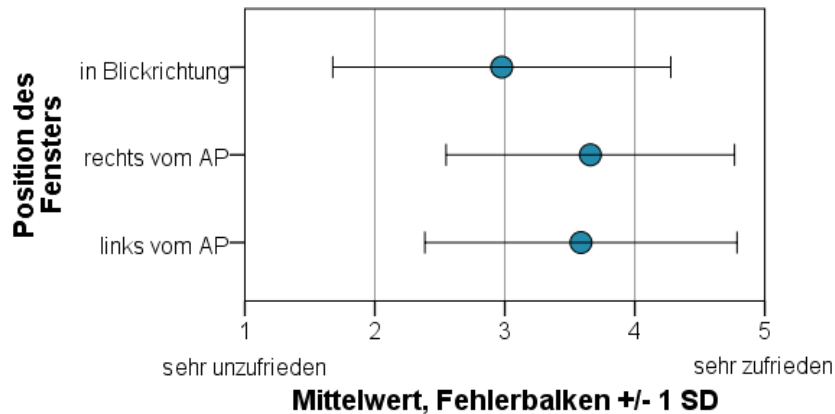


Abbildung 62 Mittelwerte und Standardabweichungen der Zufriedenheit mit der Orientierung des Arbeitsplatzes zum Fenster in Abhängigkeit von der Orientierung

Die Fenster befinden sich fast ausschließlich seitlich von den Arbeitsplätzen. Die Nutzer sind mit dieser Orientierung zum Fenster mehrheitlich zufrieden (Mittelwert „links“ 3,59; „rechts“ 3,66; „sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5). Die Nutzer, die mit Blick zum Fenster arbeiten, bewerten diese Orientierung im Mittel signifikant schlechter mit 2,98 (ANOVA: $F=6.7$, $p=0.001$, $N=950$, Effektstärke $f=0.12$), wie in Abbildung 62 zu sehen ist. Ob der befragte Nutzer Rechts- oder Linkshänder ist, wirkt sich nicht signifikant auf die Bewertung aus.

Aus Sicht der Nutzer sollte sich die Zimmertür demzufolge in ihrem zentralen Gesichtsfeld befinden, während die Fenster möglichst seitlich von den Arbeitsplätzen angeordnet sein sollten.

Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass die Architektur die Zufriedenheit beeinflusst – die Zufriedenheit mit zahlreichen Komfortaspekten ist in als schön empfundenen Gebäuden größer. Das Empfinden, wie geräumig oder hoch ein Raum ist, wird – neben dem großen Einfluss der tatsächlichen Abmessungen des Raumes – auch von der künstlichen Beleuchtung signifikant beeinflusst.

Der Einfluss von Farbgebung und Materialität konnte nicht untersucht werden, da die Wände fast ausnahmslos hell (weiß) gestrichen waren, die Decken in allen Fällen hell gestrichen waren und die Möbel in der Regel aus hellem Holz bestanden oder mit hellen Holzdekoren/-furnieren oder hellgrauen Kunststoffen beschichtet waren.

5.2.10 Zufriedenheit der Nutzer mit dem Raumklima

Die empfundene Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit durch die Beleuchtung und Aspekte des Raumklimas ist insgesamt gering, und auch die Bewertung der untersuchten Aspekte wie Beleuchtung, Temperatur und Luftqualität fällt insgesamt eher positiv aus.

Dem entspricht die Bewertung der momentanen Zufriedenheit mit dem Raumklima (Abbildung 63). Diese beträgt im Mittel 3,28 und ist damit im positiven Bereich („sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5; $N=954$). Die Regressionsanalyse bestätigt die erwartete Beeinflussung der Zufriedenheit mit dem Raumklima durch die Zufriedenheit mit den abgefragten Einzelaspekten.

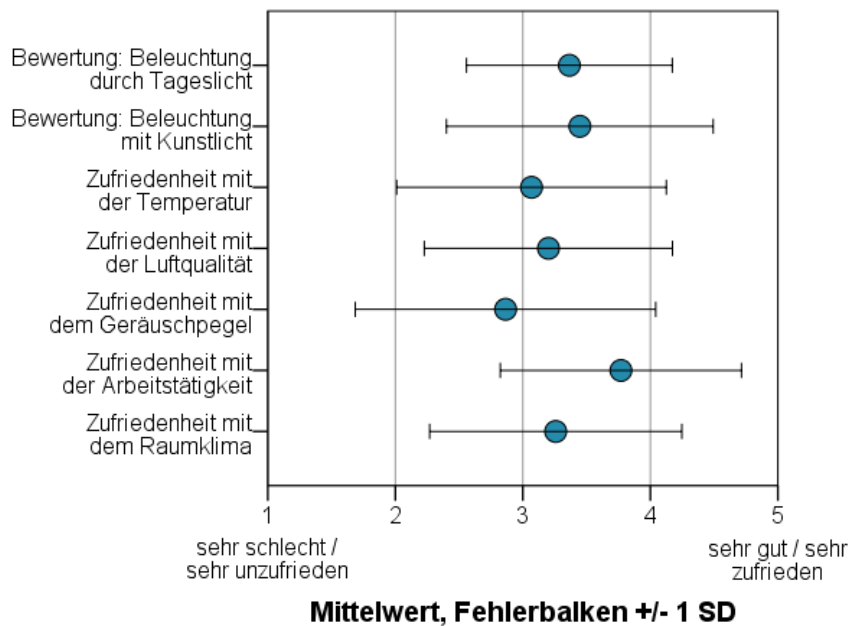


Abbildung 63 Mittelwerte und Standardabweichungen der Bewertung der Beleuchtung, der Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten des Raumklimas und dem Raumklima insgesamt (inklusive Beleuchtung)

Faktoren mit signifikantem Einfluss sind

- die Zufriedenheit mit der Luftqualität im Messzeitraum ($t=7.4, p<0.001$),
- die Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel im Büro ($t=5.3, p<0.001$),
- die Zufriedenheit mit der Arbeitstätigkeit im Betrieb ($t=4.9, p<0.001$),
- die Zufriedenheit mit der Temperatur am Arbeitsplatz im Messzeitraum ($t=4.7, p<0.001$),
- die Bewertung der Beleuchtung des Arbeitsplatzes durch Kunstlicht ($t=3.6, p<0.001$),
- die Bewertung der Tageslichtversorgung am Arbeitsplatz *ohne* Sonnenschutz im Messzeitraum ($t=3.5, p<0.001$),
- die empfundene Selbstbestimmtheit der Nutzer (je selbstbestimmter desto größer die Zufriedenheit; $t=3.2, p=0.001$),
- die Häufigkeit von Blendung durch das Fenster (je seltener desto größer die Zufriedenheit; $t=2.6, p=0.010$),
- die Nutzerbewertung des Aussehens des Gebäudes innen (je schöner desto größer die Zufriedenheit; $t=2.4, p=0.015$).

Bei der Zufriedenheit mit dem Raumklima scheinen trotz der Frage nach dem momentanen Urteil längerfristige Erfahrungen berücksichtigt zu werden. Die Nutzerangaben zur Zufriedenheit im Messzeitraum entsprechen der momentanen Zufriedenheit mit dem Raumklima besser als Bewertung der momentanen Situation der verschiedenen Parameter.

Die untersuchten Einflussgrößen erklären 42 % der Varianz der Zufriedenheit mit dem Raumklima (Regressionsanalyse, RE-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.422$, $R^2_{\text{kor}}=0.416$, $F=57.6$, $N=719$; Details siehe Anhang A21). Alter und Geschlecht der Probanden sind ohne signifikanten Einfluss.

Die Aspekte der Beleuchtung scheinen eine geringere Bedeutung für die Zufriedenheit mit dem Raumklima zu haben als die Zufriedenheit mit Aspekten wie Luftqualität, Geräuschpegel und Temperatur, die der Regressionsanalyse zufolge die Gesamtzufriedenheit stärker beeinflussen. Da die Regressionsanalyse von Extremwerten beeinflusst wird, kann dieser Effekt auch durch besonders positive oder besonders negative Nutzerbewertungen verursacht worden sein.

Die Bewertung der Beleuchtung mit Tageslicht, die Zufriedenheit mit der Temperatur und mit der Luftqualität und die Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel sind positiv korreliert, sie weisen geringe bis mittlere Zusammenhänge auf (*Pearson's* $r \geq 0.14$, $p < 0.001$, $N \geq 840$).

Die Bewertung der Beleuchtung korreliert stärker mit der Zufriedenheit mit der Temperatur und mit der Luftqualität als mit der Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel. Der Zusammenhang mit der Zufriedenheit mit der Temperatur ist im Frühling und Sommer (*Pearson's* $r=0.27$, $p < 0.001$, $N=196$) stärker als im Herbst und Winter (*Pearson's* $r=0.19$, $p=0.004$, $N=215$; Details siehe Anhang A22).

Der Einfluss der Zufriedenheit mit der Temperatur und mit der Luftqualität erklärt der Regressionsanalyse zufolge 18 % der Varianz der Bewertung der Beleuchtung mit Tageslicht (Hybrid-Modell, unbalanced panel: $R^2=0.182$, $R^2_{\text{kor}}=0.181$, $F=43.4$, $N=792$; Details siehe Anhang A23).

Räumliche Bedingungen wie die Büroform oder ein Atrium beeinflussen die Zufriedenheit der Nutzer mit dem Raumklima bzw. Aspekten des Raumklimas, wie Abbildung 64 zeigt:

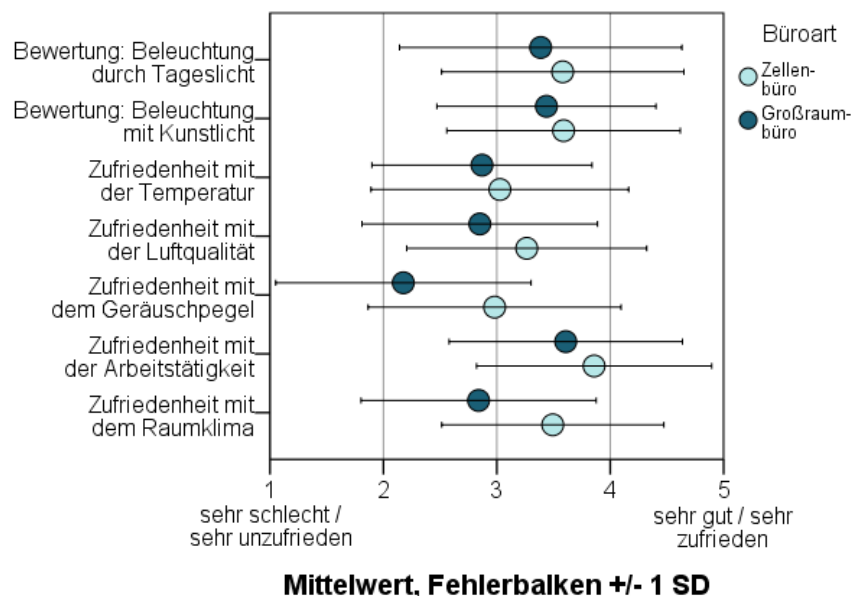


Abbildung 64 Mittelwerte und Standardabweichungen der Bewertung der Beleuchtung, der Zufriedenheit mit verschiedenen Aspekten des Raumklimas und dem Raumklima insgesamt in Abhängigkeit von der Büroform

In den Gebäuden, in denen sowohl Zellen- als auch Großraumbüros untersucht wurden, werden alle identifizierten Einflussfaktoren der Zufriedenheit mit dem Raumklima in den Großraumbüros schlechter bewertet als in den Zellenbüros. Einzige Ausnahme ist die Nutzerbewertung des

Aussehens des Gebäudes innen, die für beide Büroformen identisch ist. Bei der Zufriedenheit mit der Luftqualität, dem Geräuschpegel, Blendung, Gesundheit und auch dem Raumklima insgesamt sind die Unterschiede statistisch signifikant (Raumklima mit „sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5; ANOVA: $F=27.4$, $p<0.001$, $N=474$, Effektstärke $f=0.24$).

In zwei Gebäuden konnten sowohl Räume, die an Atrien liegen, als auch außenliegende Räume untersucht werden. In der vorliegenden Stichprobe unterscheiden sich die Bewertungen der Büroräume hinsichtlich einiger Aspekte:

- die Bewertung der Tageslichtversorgung am Arbeitsplatz *ohne* Sonnenschutz im Messzeitraum („sehr schlecht“=1 ... „sehr gut“=5; Mittelwert außenliegende Büros 3,77, Mittelwert Büros am Atrium 3,46; ANOVA: $F=2.9$, $p=0.088$, $N=161$, Effektstärke $f=0.14$),
- die Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel im Büro („sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5; Mittelwert außenliegende Büros 3,06, Mittelwert Büros am Atrium 3,67; ANOVA: $F=14.4$, $p<0.001$, $N=166$, Effektstärke $f=0.30$),
- die Häufigkeit von Blendung durch das Fenster („eigentlich immer“=1 ... „eigentlich nie“=5; Mittelwert außenliegende Büros 3,12, Mittelwert Büros am Atrium 4,03; ANOVA: $F=26.2$, $p<0.001$, $N=165$, Effektstärke $f=0.40$),
- der Blick aus dem Fenster („unangenehm“=1 ... „angenehm“=5; Mittelwert außenliegende Büros 4,26, Mittelwert Büros am Atrium 3,21; ANOVA: $F=38.4$, $p<0.001$, $N=165$, Effektstärke $f=0.49$; „langweilig“=1 ... „interessant“=5; Mittelwert außenliegende Büros 3,42, Mittelwert Büros am Atrium 2,60; ANOVA: $F=20.3$, $p<0.001$, $N=164$, Effektstärke $f=0.36$).

Während die Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel in den Büros am Atrium also signifikant höher ist und Blendung durch Tageslicht signifikant seltener auftritt, werden die Tageslichtversorgung (auch bei ähnlichem Tageslichtquotienten, siehe Tabelle 12) als schlechter und der Ausblick als weniger angenehm und langweiliger bewertet als bei außenliegenden Büroräumen. Die Zufriedenheit mit dem Raumklima insgesamt unterscheidet sich in der vorliegenden Stichprobe nicht signifikant („sehr unzufrieden“=1 ... „sehr zufrieden“=5; Mittelwert außenliegende Büros 3,42, Mittelwert Büros am Atrium 3,27; ANOVA: $F=1.1$, $p=0.288$, $N=165$, Effektstärke $f=0.08$).

Die Nutzer wurden gefragt, was sie, wenn sie die Möglichkeit hätten, ändern würden. Nur bei 23,7 % der Befragungen gaben die Nutzer an, „überhaupt nichts“ ändern zu wollen ($N=760$), bei 580 Befragungen wurden bis zu vier Änderungswünsche genannt.

Sehr häufig wurde der Wunsch nach einer neuen Einrichtung/Möblierung geäußert ($n=182$), nach einer anderen farblichen Gestaltung oder mehr Pflanzen ($n=99$) oder nach einer Verbesserung der Ausstattung des Arbeitsplatzes mit PC, Tastatur oder Monitor ($n=40$). Der Wunsch nach einer anderen Anordnung der Möbel im Raum wurde bei 80 Befragungen geäußert. Diese 401 Nutzerwünsche zur Einrichtung und Gestaltung der Räume und zur Ausstattung der Arbeitsplätze stellen mit 36 % die größte Gruppe aller 1110 genannten Änderungswünsche dar.

Die Belichtung und Beleuchtung des Arbeitsplatzes ist mit 185 Änderungswünschen (17 %) der Themenkomplex, der am zweithäufigsten genannt wurde – offenbar ist die Beleuchtung des Arbeitsplatzes für die Nutzer durchaus von großer Bedeutung. Dabei werden alle Aspekte genannt, die bereits in den Unterkapiteln von den Nutzern angegeben wurden:

- „Kunstlicht – bessere Einstellmöglichkeit“
- „automatisches Licht abschaffen“
- „Beleuchtung – mehr Tageslicht“
- „Automatik und Segmentierung der Außenjalousien“
- „Blendschutz mit besserer Durchsicht“
- „Blendschutz so gestalten, dass nicht immer das komplette Fenster zugezogen sein muss“

Die Belüftung, die Luftfeuchte und der Schutz vor störenden Gerüchen werden bei 132 Änderungswünschen angesprochen (12 %). Zu hohe oder zu niedrige Innentemperaturen oder zu geringe Einflussmöglichkeiten auf die Temperatur werden in 99 Fragebögen genannt (9 % der Änderungswünsche).

Eine Verbesserung des Schallschutzes wird bei 85 Befragungen gewünscht (8 % aller Änderungswünsche) – hier sind vor allem die Nutzer von Großraumbüros betroffen, die 248 der 977 Fragebögen ausgefüllt haben.

Neben der Zufriedenheit der Nutzer können auch gesundheitliche Beschwerden ein Anhaltspunkt für Optimierungsbedarf im Gebäude sein. Beispielsweise könnte eine sehr geringe Luftfeuchtigkeit zu einer größeren Häufigkeit einer „trockenen Nase“ führen oder Blendungsprobleme zu häufigeren Kopfschmerzen.

Angaben zu Fehlzeiten und Krankheitstagen der Nutzer liegen nicht vor. Die Nutzer wurden jedoch gefragt, wie häufig Beschwerden wie Kopfschmerzen, trockene Nase oder Muskelverspannungen im Messzeitraum auftraten. Alle neun Fragen zur Gesundheit wurden bei über 90 % der Befragungen beantwortet.

Es fällt auf, dass alle neun Angaben untereinander positiv korreliert sind (*Pearson's $r > 0.28$, $p < 0.001$, $N \geq 863$*) – auch Angaben zur Häufigkeit von „trockener Nase“ und „laufender Nase“, die zwar erfahrungsgemäß beide gehäuft im Winter auftreten, aber in der Regel nicht miteinander einhergehen. Das kann ein Hinweis darauf sein, dass die Antworten nicht nur die Häufigkeit der aufgetretenen Beschwerden abbilden, sondern auch die Zufriedenheit der Nutzer.

Der Mittelwert der Häufigkeit gesundheitlicher Beschwerden, die die Befragten angeben, wird von folgenden Faktoren signifikant beeinflusst:

- von der Zufriedenheit mit der Luftqualität im Messzeitraum (je größer die Zufriedenheit desto seltener sind gesundheitliche Beschwerden),
- von der Zufriedenheit mit der Arbeitstätigkeit im Betrieb (je größer die Zufriedenheit desto seltener sind gesundheitliche Beschwerden),
- vom Geschlecht der Befragten (Frauen geben häufiger gesundheitliche Beschwerden an),
- von der empfundenen Selbstbestimmtheit der Nutzer (je selbstbestimmter desto seltener sind gesundheitliche Beschwerden),
- von der Häufigkeit von Blendung durch das Fenster (je seltener Blendung auftritt desto seltener sind gesundheitliche Beschwerden),
- von der Büroform (in Großraumbüros sind gesundheitliche Beschwerden häufiger).

Diese Einflussgrößen erklären 55 % der Varianz der angegebenen Häufigkeit gesundheitlicher Beschwerden (Regressionsanalyse, Hybrid-Modell, unbalanced panel: $R^2 = 0.548$, $R^2_{\text{kor}} = 0.540$, $F = 88.6$, $N = 741$; Details siehe Anhang A24).

Die Zufriedenheit mit dem Raumklima insgesamt wird in dieser Stichprobe demzufolge stärker von der Zufriedenheit mit der Luftqualität, dem Geräuschpegel und der Temperatur am Arbeitsplatz beeinflusst als von der Zufriedenheit mit der Beleuchtung durch Tages- oder Kunstlicht.

Räumliche Bedingungen wie die Bürogröße oder ein Atrium beeinflussen die Zufriedenheit der Nutzer signifikant, wobei alle identifizierten Einflussfaktoren der Zufriedenheit mit dem Raumklima in den Großraumbüros schlechter bewertet werden als in den Zellenbüros.

Die Bewertung von Büros an Atrien ist weniger eindeutig: In der vorliegenden Stichprobe scheinen sich Vorteile bei Störungen durch Geräusche und Blendung und der Nachteil der als schlechter empfundenen Tageslichtversorgung auszugleichen.

Trotz des vergleichsweise geringen Einflusses der Beleuchtung auf die Zufriedenheit mit dem Raumklima betreffen die Änderungswünsche der Nutzer – nach zahlreichen Wünschen zur Einrichtung und zur Ausstattung der Arbeitsplätze – die Belichtung und Beleuchtung der Arbeitsplätze.

Ein Einfluss des Lichtspektrums im Büroraum auf die Gesundheit der Nutzer konnte in dieser Untersuchung nicht nachgewiesen werden (siehe Abschnitt „5.4.2 Lichtspektrum an den Arbeitsplätzen“).

5.3 Auswertung der Nutzereingriffe

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse der identifizierten Nutzereingriffe vorgestellt, die indirekt Aufschluss über die gewünschte Helligkeit am Arbeitsplatz und die Blendungstoleranz der Nutzer geben.

Die Daten werden in Häufigkeitsdiagrammen und in Boxplots dargestellt, die den Medianwert der dargestellten Werte als schwarze Linie innerhalb einer Box zeigen. Für die statistische Analyse, ob Stichproben sich signifikant unterscheiden, wurden Varianzanalysen durchgeführt. Bei diesem Test wird anhand von Mittelwert und Verteilung der Daten berechnet, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Stichproben derselben Grundgesamtheit angehören, wie im Abschnitt „4.7 Statistische Auswertung“ beschrieben. Daher wird im Text in einigen Fällen der Mittelwert genannt, während im entsprechenden Diagramm der Medianwert dargestellt ist.

Die Zuordnung eines Nutzereingriffs zum eingreifenden Nutzer ist nicht möglich. Man kann vermuten, dass Nutzereingriffe in der Regel von einem der Nutzer vorgenommen werden, deren Arbeitsplatz sich im jeweiligen Raum befindet. Es gibt jedoch keinen Anhaltspunkt, welcher der Nutzer den Eingriff vorgenommen hat.

Würde jeder Nutzereingriff allen bekannten Nutzern des Raumes im jeweiligen Messzeitraum zugeordnet werden, würden die Nutzereingriffe je nach Anzahl der vorliegenden Fragebögen mehrfach oder auch gar nicht berücksichtigt. Wenn der betreffende Nutzer im entsprechenden Messzeitraum keinen Fragebogen ausgefüllt hat, würde ein Nutzereingriff ausschließlich unbeeiligten Nutzern zugeordnet werden.

Eine Zuordnung zwischen ausgefüllten Fragebögen und Nutzereingriffen ist unter diesen Umständen ausgeschlossen. Individuelle Einflussfaktoren wie Alter, Blendempfindlichkeit und Bewertung der Aussicht können daher nicht berücksichtigt werden.

5.3.1 Nutzereingriffe Kunstlicht

Zeitpunkt und Häufigkeit der Nutzereingriffe

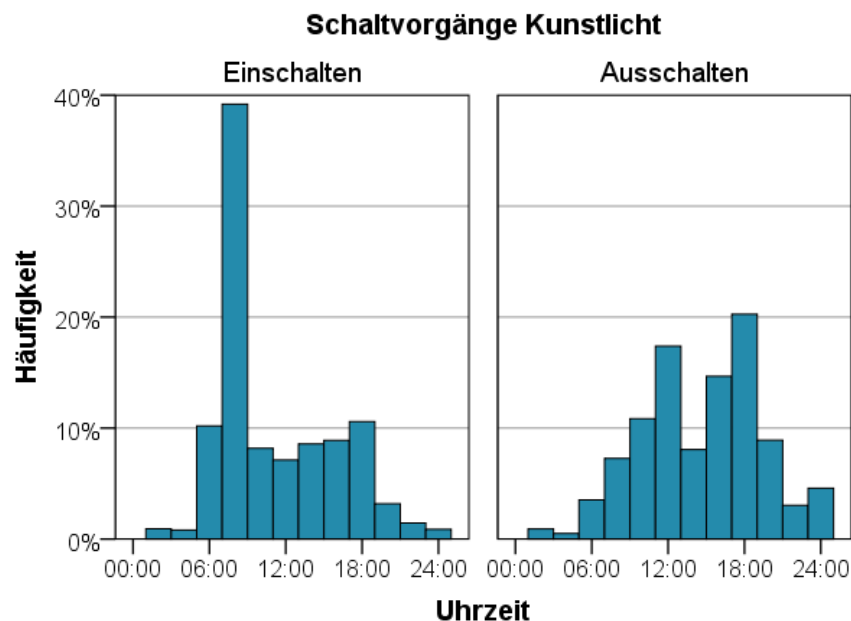


Abbildung 65 Schaltvorgänge Kunstlicht in Abhängigkeit von der Art des Schaltvorgangs und der Uhrzeit

Das Ein- und Ausschalten des Kunstlichts wurde in sieben der neun untersuchten Gebäude erfasst. Das Einschalten des Kunstlichts erfolgt überwiegend zwischen 6:00 und 10:00 Uhr (54 %, 131

$N=3325$), das Ausschalten überwiegend zwischen 11:00 und 13:00 Uhr (18 %, $N=3312$) und zwischen 16:00 und 19:00 Uhr (30 %, $N=3312$), wie Abbildung 65 zeigt.

Den Ein- und Ausschaltvorgängen wurden – trotz der in der Einleitung beschriebenen Schwierigkeiten – die angegebenen Arbeitszeiten aller Nutzer zugeordnet, die im entsprechenden Messzeitraum einen Fragebogen für diesen Raum ausgefüllt haben. 317 Ein- und Ausschaltvorgängen (4,8 %, $N=6637$) konnte kein Nutzerprofil zugeordnet werden. Ob unter den zugeordneten Nutzerprofilen auch das Profil des Nutzers enthalten ist, der den Nutzereingriff tatsächlich vorgenommen hat, kann nicht überprüft werden. Wenn der Nutzereingriff von einem Nutzer vorgenommen wurde, der die Frage nach seiner üblichen Arbeitszeit nicht beantwortet hat, keinen Fragebogen ausgefüllt oder seinen Fragebogen für einen anderen Raum ausgefüllt hat, kann die Nutzungszeit des „richtigen“ Nutzers nicht zugeordnet werden.

Bei den Nutzern, die eine Bandbreite für ihre Arbeitszeit angegeben haben, wurden der früheste Arbeitsbeginn und das späteste Arbeitsende zugrunde gelegt.

46,3 % aller Einschaltvorgänge, denen ein Nutzungszeitraum zugeordnet werden konnte ($N=3167$), haben im Zeitraum von einer Stunde vor dem als üblichen Arbeitsbeginn angegebenen Zeitpunkt eines Nutzers in diesem Raum und einer Stunde nach diesem Zeitpunkt stattgefunden. Dasselbe gilt für 31,9 % der Ausschaltvorgänge ($N=3153$) im Vergleich mit dem angegebenen üblichen Arbeitsende.

Das bestätigt den Eindruck, dass das Kunstlicht vor allem morgens beim Betreten des Büros eingeschaltet wird. Anlass für das Ausschalten sind vermutlich der Gang in die Mittagspause und das Verlassen des Büros am Abend.

In drei Gebäuden wird das Kunstlicht manuell geschaltet (Anzahl Schaltvorgänge Kunstlicht $N=2664$), in drei anderen Gebäuden wird das Kunstlicht tageslichtabhängig und teilweise auch präsenzabhängig geregelt (Anzahl Schaltvorgänge $N=3490$). Erwartungsgemäß treten bei manueller Schaltung weniger Schaltvorgänge pro Gebäude und Arbeitstag auf als bei automatischer Regelung.

In einem weiteren Gebäude wird das Kunstlicht manuell geschaltet, die Lichtschalter befinden sich in jedoch nicht im Raum, sondern sind an zentralen Stellen im jeweiligen Geschoss angebracht. Der durchschnittliche Abstand zwischen den untersuchten Büroräumen und ihrem Lichtschalter beträgt dort 19 m. In diesem Gebäude wurden nochmals deutlich weniger Schaltvorgänge beobachtet ($N=483$).

Der Anzahl der insgesamt beobachteten Nutzereingriffe entsprechend unterscheidet sich die Anzahl Nutzereingriffe pro Tag mit Kunstlichtnutzung in Abhängigkeit von der Art der Steuerung. Das Kunstlicht wird bei manueller Schaltung durchschnittlich 1,38 Mal pro Tag an- und ausgeschaltet, bei automatischer Regelung traten 1,48 Schaltvorgänge pro Tag auf.

In dem Gebäude mit Lichtschalter außerhalb der Büroräume wird das Kunstlicht mit 1,07 Vorgängen pro Tag weniger häufig an- und ausgeschaltet (ANOVA $F=4.699$, $p=0.010$, $N=364$, Effektstärke $f=0.58$).

Die Anzahl Nutzereingriffe pro Tag könnte neben der Art der Steuerung auch davon beeinflusst werden, ob Nutzer alleine über den Schaltzustand entscheiden können oder sich mit Kollegen abstimmen müssen. Die Häufigkeit der Nutzereingriffe zur Veränderung des Kunstlichts ist jedoch nicht signifikant mit der von den Nutzern angegebenen Abstimmungshäufigkeit korreliert (Einschalten des Kunstlichts: *Pearson's* $r<0.01$, $p=0.938$, $N=719$; Ausschalten: *Pearson's* $r<0.01$, $p=0.998$, $N=719$), auch bei Betrachtung der manuell geschalteten Kunstlichtanlagen.

Neben der Häufigkeit unterscheiden sich auch die Zeiten, zu denen das Kunstlicht ein- oder ausgeschaltet wird, in Abhängigkeit von der Art der Steuerung.

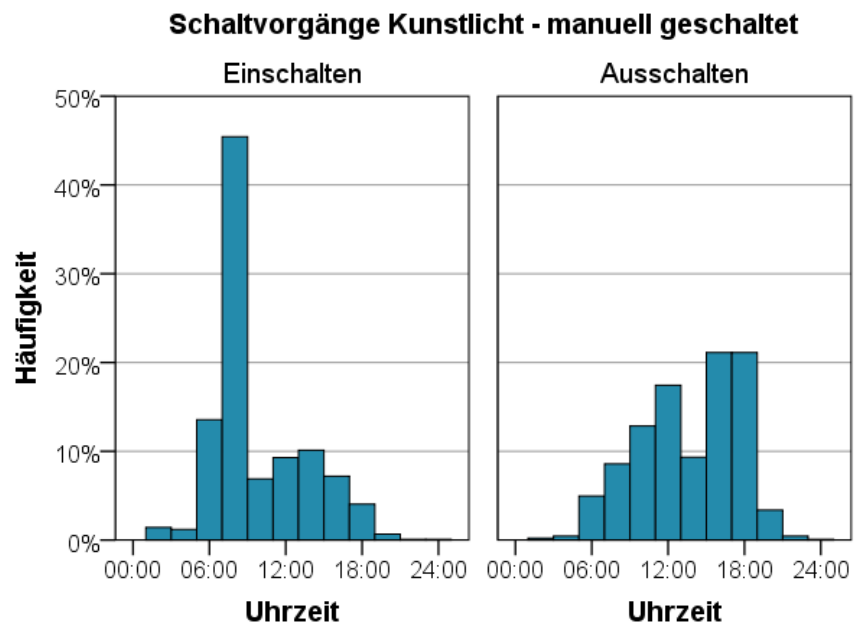


Abbildung 66 Schaltvorgänge Kunstlicht bei manueller Schaltung des Kunstlichts in Abhängigkeit von der Art des Schaltvorgangs und der Uhrzeit

Zwar wird das Kunstlicht unabhängig von der Art der Steuerung in allen untersuchten Gebäuden vor allem morgens eingeschaltet, bei automatischer Regelung treten jedoch deutlich mehr Einschaltvorgänge am Nachmittag auf (Abbildung 67) als bei manueller Schaltung (Abbildung 66). Der Unterschied der Zeitpunkte ist signifikant (ANOVA: $F=219.6$, $p<0.001$, $N=3\,080$, Effektstärke $f=0.27$).

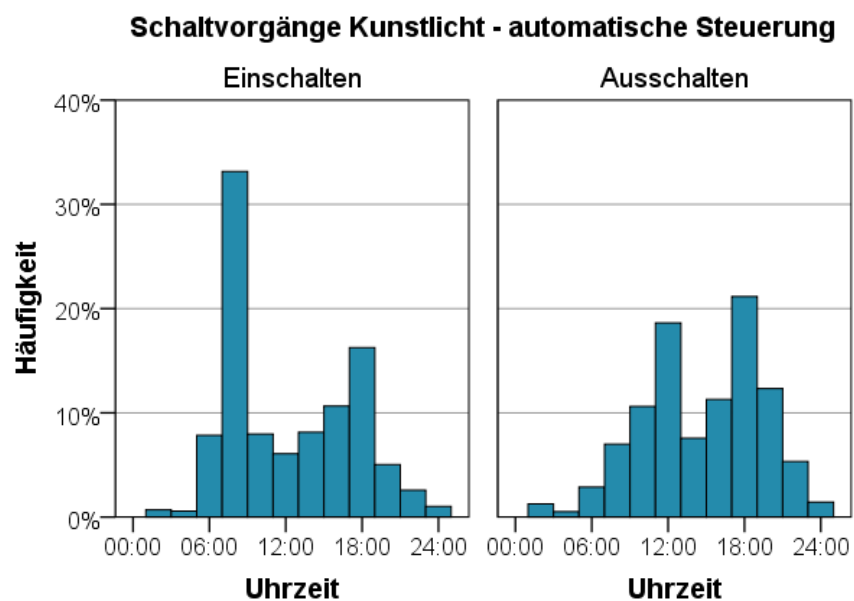


Abbildung 67 Schaltvorgänge Kunstlicht bei präsenz- und teilweise auch tageslichtabhängiger Regelung des Kunstlichts in Abhängigkeit von der Art des Schaltvorgangs und der Uhrzeit

Ausschaltvorgänge treten bei automatischer Regelung sowohl vor 13:00 Uhr als auch gegen 18:00 Uhr häufiger auf als bei manueller Schaltung.

Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung ist, dass das Kunstlicht bei automatischer Regelung zu Beginn der Mittagspause (automatisch) ausgeschaltet wird und im Lauf des Nachmittags/Abends bei unzureichender Helligkeit wieder eingeschaltet wird.

Den häufigeren Einschaltvorgängen nachmittags entsprechend treten bei automatischer Regelung auch die Ausschaltvorgänge im Mittel etwas später auf (ANOVA: $F=28.6, p<0.001, N=3\,074$, Effektstärke $f=0.10$).

In dem Gebäude, in dem die Lichtschalter außerhalb der Büroräume angeordnet wurden, zeigt sich ein gänzlich anderes Bild (Abbildung 68):

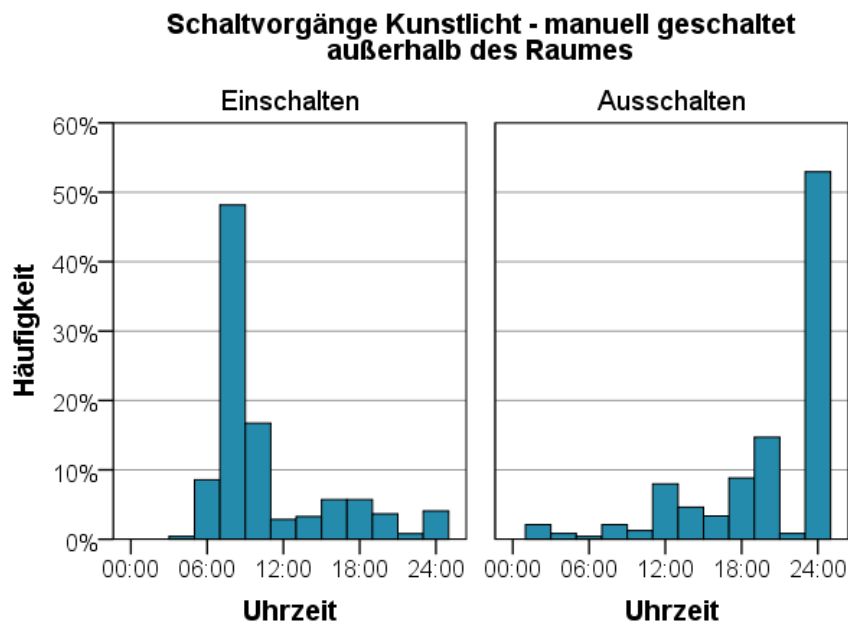


Abbildung 68 Schaltvorgänge Kunstlicht bei manueller Schaltung des Kunstlichts und Lichtschaltern außerhalb des Raums in Abhängigkeit von der Art des Schaltvorgangs und der Uhrzeit

Das Einschalten des Kunstlichts erfolgt – vergleichbar mit den anderen drei Gebäuden mit manueller Steuerung – zu 48 % zwischen 7:00 Uhr und 9:00 Uhr morgens.

Das Ausschalten erfolgt zu 53 % zwischen 23:00 Uhr und 1:00 Uhr nachts ($N=238$), vermutlich durch den Wachdienst. Dieses Gebäude wird mit Einbau-Downlights beleuchtet, so dass die Nutzer tagsüber kaum sehen, ob das Kunstlicht eingeschaltet ist oder nicht – möglicherweise wird es häufig übersehen.

Auch die folgende Abbildung 69 der Kunstlichtnutzung in einem Raum dieses Gebäudes zeigt beispielhaft, dass das Einschalten in diesem Raum zu einer Zeit stattfindet, die dem üblichen Arbeitsbeginn entspricht. Das Ausschalten erfolgt gegen Mitternacht und entspricht nicht der Zeit, die die Nutzer als ihr übliches Arbeitsende angegeben haben.

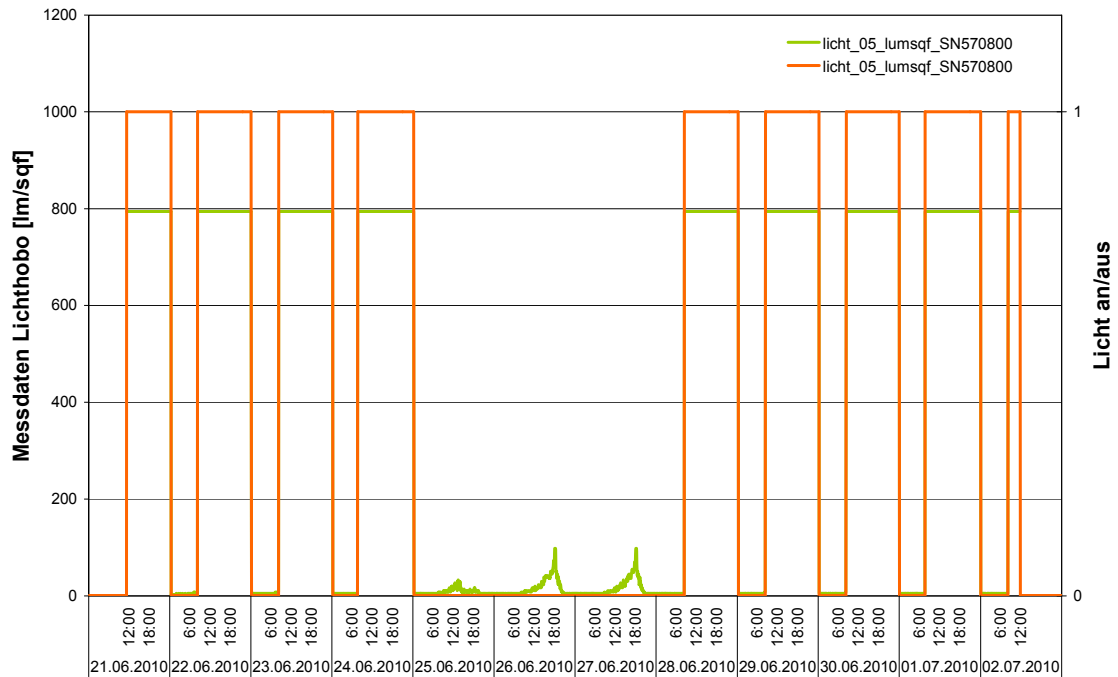


Abbildung 69 Verlauf der gemessenen Beleuchtungsstärke an der Leuchte und der daraus abgeleiteten Kunstlichtnutzung in einem beispielhaft gewählten Raum in dem Gebäude mit zentral angeordneten Lichtschaltern

Neben Anzahl und Zeitpunkt der Nutzereingriffe unterscheidet sich auch der Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung. Hier zeigen sich erwartungsgemäß auch deutliche jahreszeitliche Unterschiede (Abbildung 70).

Durchschnittlicher Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung

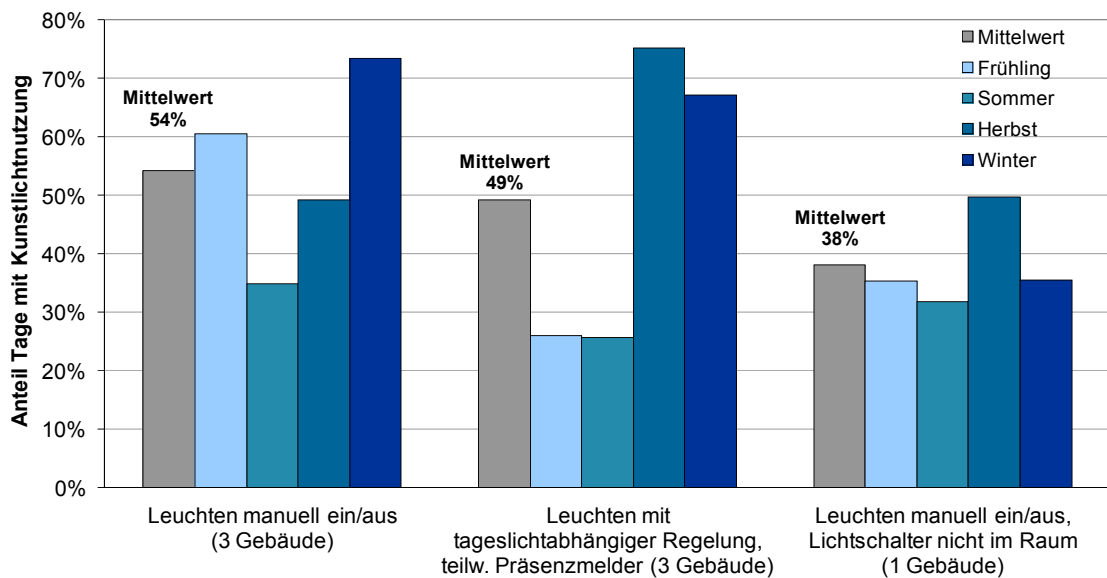


Abbildung 70 Durchschnittlicher Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung in Abhängigkeit von der Art der Steuerung und der Jahreszeit

Im Sommer ist der Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung am geringsten. In den drei Gebäuden mit Kunstlichtregelung und in dem Gebäude, in dem sich die Lichtschalter nicht im Raum befinden, ist der durchschnittliche Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung im Herbst größer als im Winter. Das entspricht nicht den Erwartungen.

Der hohe Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung im Herbst in der Gruppe der Gebäude mit Kunstlichtregelung wird stark von einem der drei Gebäude dieser Gruppe beeinflusst, in dem der Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung im Herbst bei 99 % lag. Was diesen enorm hohen Anteil in diesem einen Gebäude verursacht hat, ist nicht bekannt. In den anderen beiden Gebäuden war der Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung in Herbst und Winter fast gleich groß.

In dem Gebäude mit Lichtschalter außerhalb der Büroräume lagen im Messzeitraum Herbst sechs der 15 untersuchten Räume am Atrium, während in den anderen Messzeiträumen nur jeweils fünf Räume am Atrium lagen. Dieser Umstand kann einen etwas größeren Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung begründen. Der große Unterschied zwischen Herbst und Winter wird dadurch aber nicht vollständig erklärt.

Brenndauer des Kunstlichts

Der Energieverbrauch des Kunstlichts wird maßgeblich von der Brenndauer beeinflusst.

Für die folgenden Auswertungen zur Brenndauer wurden nur die Tage berücksichtigt, an denen das Kunstlicht eingeschaltet wurde. Tage ohne Kunstlichtnutzung wurden nicht berücksichtigt, weil der Anlass für das Nicht-Einschalten nicht ermittelt werden kann: Das Tageslicht kann von den Nutzern als ausreichend empfunden worden sein oder der Raum kann ungenutzt geblieben sein (beispielsweise wegen Krankheit, Urlaub oder Dienstreisen).

Die durchschnittliche Brenndauer unterscheidet sich signifikant je nach Lichtsteuerung (ANOVA: $F=55,0$, $p<0,001$, $N=361$, Effektstärke $f=0,55$). Die automatische Regelung verkürzt die durchschnittliche Brenndauer pro Tag mit Kunstlichtnutzung um ca. eine Stunde (22 %) im Vergleich zur manuellen Schaltung (Abbildung 71).

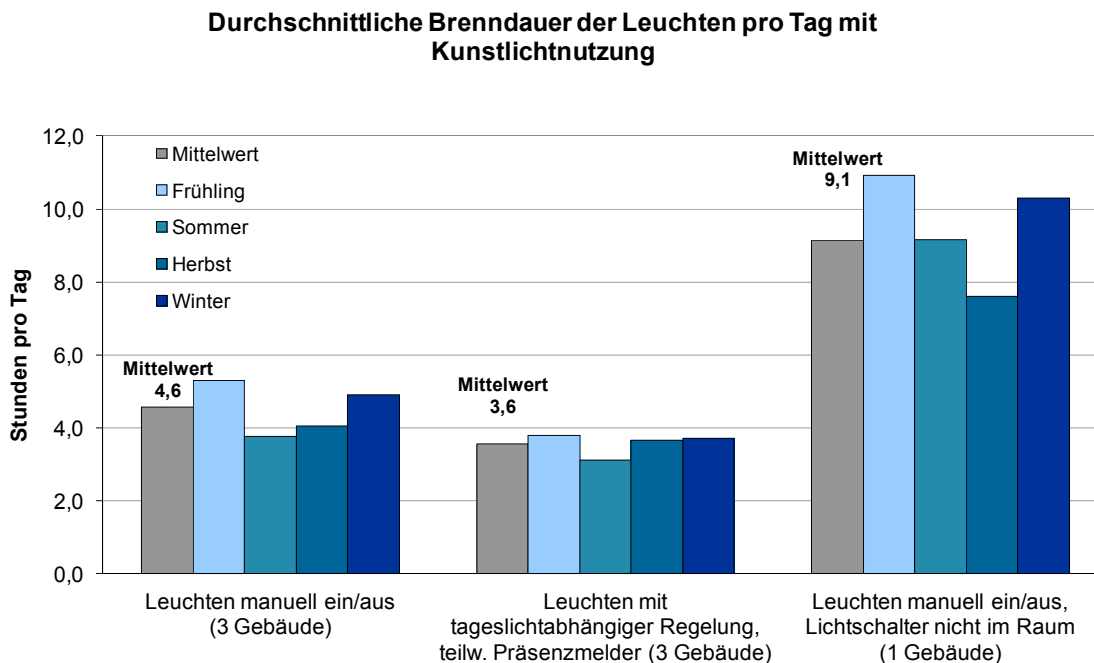


Abbildung 71 Durchschnittliche Brenndauer der Leuchten an Tagen mit Kunstlichtnutzung in Abhängigkeit von der Art der Steuerung und der Jahreszeit

Das Gebäude mit Einbau-Downlights und Lichtschaltern außerhalb des Büroraums weist eine doppelt so lange Brenndauer des Kunstlichts auf wie die übrigen Gebäude mit manueller Schaltung. Die größere Flexibilität der Elektroinstallation und geringere Nutzerfreundlichkeit (Abbildung 72) wirkt sich damit deutlich auf den Energieverbrauch aus.

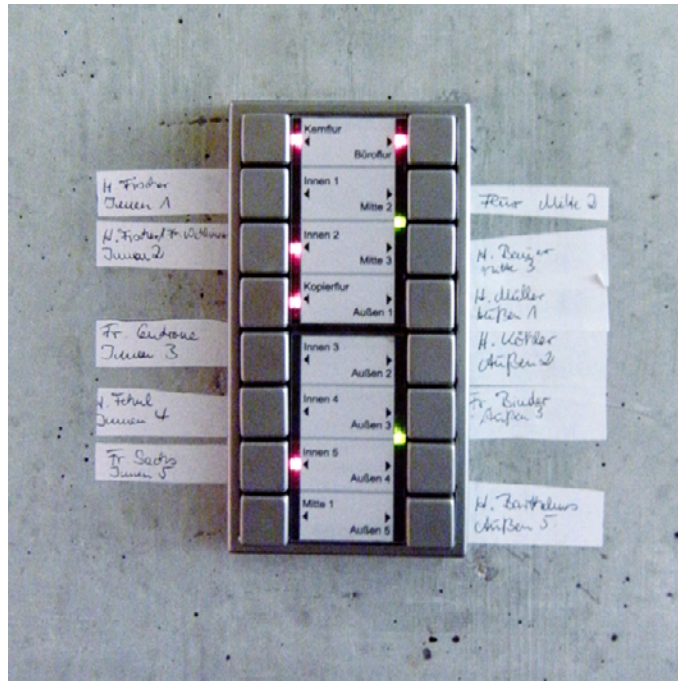


Abbildung 72 Zentral angeordneter Lichtschalter in einem der Gebäude. Die nachträgliche Beschriftung durch die Nutzer zeigt, dass die Zuordnung der Schalter zu den entfernt liegenden Räumen für die Nutzer nicht verständlich war.

Das Gebäude mit Lichtschaltern außerhalb der Räume wurde bei den folgenden Analysen ausgeschlossen, um Verzerrungen zu vermeiden. Der Einfluss von Atrien konnte aufgrund der Stichprobe nicht analysiert werden.

Für den architektonischen Parameter „Büroform“ (Zellenbüro/Großraumbüro) konnte kein signifikanter Einfluss auf die Brenndauer des Kunstlichts nachgewiesen werden, auch der Fensterflächenanteil korreliert nicht mit der Brenndauer.

Die jahreszeitlichen Unterschiede, die beim durchschnittlichen Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung sehr groß sind (siehe Abbildung 70), sind bei der Brenndauer pro Tag mit Kunstlichtnutzung bei den sechs berücksichtigten Gebäuden nur schwach (ANOVA: $F=2.811$, $p=0.040$, $N=323$, Effektstärke $f=0.16$), die Brenndauer ist im Sommer (Mittelwert 3,4 h) und Herbst (Mittelwert 3,8 h) etwas kürzer als im Winter (Mittelwert 4,2 h) und im Frühling, der mit 4,5 h im Mittel die längste Brenndauer aufweist.

Die je nach Art der Steuerung unterschiedliche Wahrscheinlichkeit, dass das Licht eingeschaltet wird, und die unterschiedliche Brenndauer zeigt sich auch im folgenden Diagramm (Abbildung 73), in dem der durchschnittliche Anteil der angegebenen regelmäßigen Arbeitszeit dargestellt ist, zu der das Kunstlicht eingeschaltet war. Die „regelmäßige Arbeitszeit“ umfasst auch Urlaubs- und Krankheitstage im Messzeitraum, ebenso Tage mit Dienstreisen. Die Anwesenheit der Nutzer im Raum wurde nicht erfasst. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Nutzer sich nicht während der gesamten regelmäßigen Arbeitszeit in ihrem Büro aufgehalten haben, und dass der Anteil der Kunstlichtnutzung bezogen auf die Anwesenheitszeiten im Büro größer wäre.

Bei der manuell gesteuerten Kunstlichtanlage mit Lichtschaltern außerhalb der Büroräume sind die jahreszeitlichen Unterschiede der Kunstlichtnutzung im Tagesverlauf nur gering, was auch dem durchschnittlichen Anteil Tage mit Kunstlichtnutzung entspricht.

In den drei Gebäuden mit manuellem Betrieb (Lichtschalter im Raum) ist vor allem im Frühling der Anteil Kunstlichtnutzung deutlich größer als in den drei Gebäuden mit tageslichtabhängiger Regelung, ebenso im Winter, wo der Anteil Kunstlichtnutzung in den Gebäuden mit Regelung im Tagesverlauf sehr viel deutlicher zurückgeht als bei manueller Schaltung.

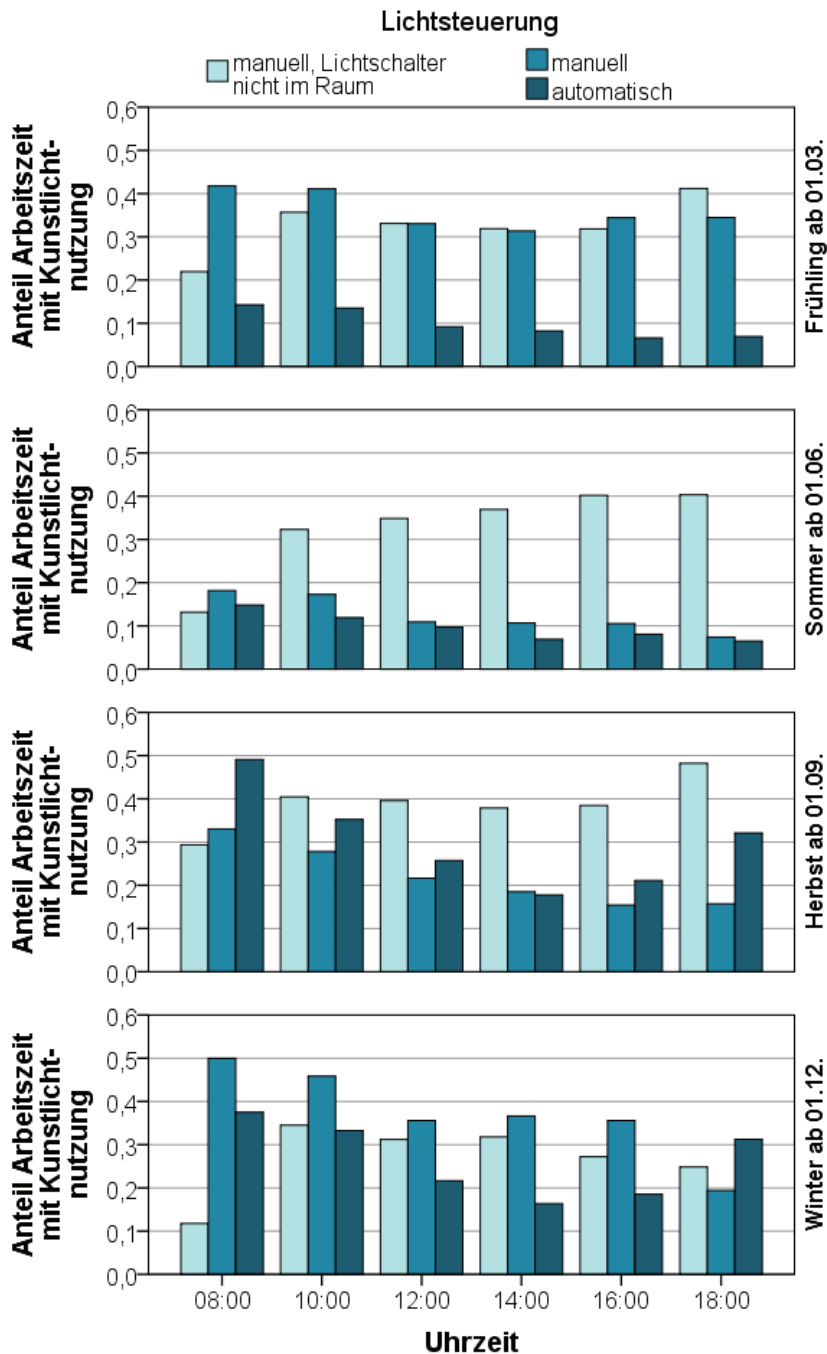


Abbildung 73 Durchschnittlicher Anteil der angegebenen regelmäßigen Arbeitszeit, zu der das Kunstlicht eingeschaltet war, in Abhängigkeit von der Uhrzeit, der Art der Steuerung und der Jahreszeit

Der große Unterschied zwischen manueller Schaltung und tageslichtabhängiger Regelung im Frühling entspricht den in dieser Jahreszeit gewünschten hohen Werten der Beleuchtungsstärke

(siehe Abschnitt „5.2.2 Beleuchtung“). Während die tageslichtabhängige Regelung das Kunstlicht bei Erreichen der vorgegebenen Beleuchtungsstärke dimmt und ausschaltet, lässt eine manuelle Schaltung die ergänzende Nutzung von Kunstlicht trotz „ausreichender Beleuchtung“ mit Tageslicht zu.

Im Herbst bevorzugen Nutzer niedrigere Beleuchtungsstärken, die den von einer tageslichtabhängigen Regelung erzeugten Werten besser entsprechen. Dementsprechend unterscheiden sich manueller und automatisierter Betrieb im Herbst nur wenig.

Die Hypothese, dass der Umgang der Nutzer mit dem Kunstlicht von der Jahreszeit und der Bedienbarkeit des Systems beeinflusst wird, konnte durch diese Ergebnisse bestätigt werden. Ein Einfluss der Büroform oder von Atrien konnte mit der vorliegenden Stichprobe nicht nachgewiesen werden.

Beleuchtungsstärke vor dem Einschalten des Kunstlichts

Die Brenndauer des Kunstlichts ist ein Indikator für den Energieverbrauch einer Beleuchtungsanlage. Der Moment des Einschaltens dagegen gibt einen Hinweis auf die Wünsche der Nutzer: Die Helligkeit im Raum oder am Arbeitsplatz vor dem Einschalten wurde vermutlich als zu gering empfunden.

Der Moment des Ausschaltens lässt keine Interpretation zu, da die Anwesenheit der Nutzer nicht erfasst werden konnte. Es kann daher nicht unterschieden werden, ob das Kunstlicht ausgeschaltet wurde, weil der Raum verlassen wurde, oder ob die Beleuchtung an Nutzerwünsche angepasst wurde und der Raum weiter genutzt wurde.

Die horizontale Beleuchtungsstärke wurde an zwei Arbeitsplätzen im Raum erfasst. Am Abbautag wurde die horizontale Beleuchtungsstärke an den Messgeräten und an allen Arbeitsplätzen im Raum gemessen. Aus dem Verhältnis dieser Messungen wurden Korrekturfaktoren abgeleitet, mit denen die horizontale Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum während des Messzeitraums abgeschätzt wurde (siehe Abschnitt „4.5 Untersuchungsdurchführung“).

Die horizontale Beleuchtungsstärke vor dem Einschalten des Kunstlichts unterscheidet sich erwartungsgemäß deutlich in Abhängigkeit von der Tageszeit, zu der der Eingriff erfolgt ist, da die Beleuchtungsstärke an den (überwiegend fensternahen) Arbeitsplätzen von der Außenbeleuchtungsstärke stark beeinflusst wird (Abbildung 74).

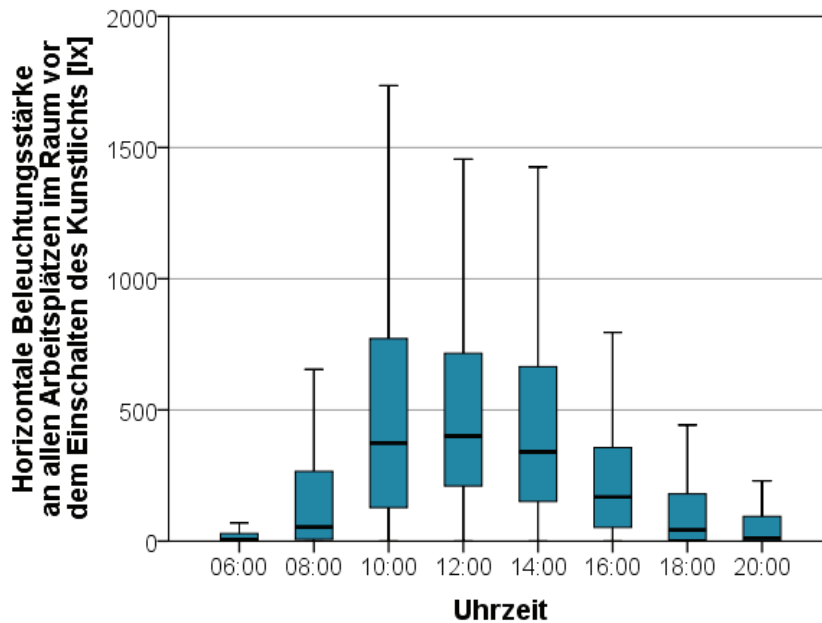


Abbildung 74 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum vor dem Einschalten des Kunstlichts in Abhängigkeit von der Uhrzeit

Neben der horizontalen Beleuchtungsstärke wurde auch die zylindrische Beleuchtungsstärke in Fensternähe aufgezeichnet. Deren Verteilung ähnelt der Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke an den Arbeitsplätzen, wie die folgende Abbildung 75 zeigt.

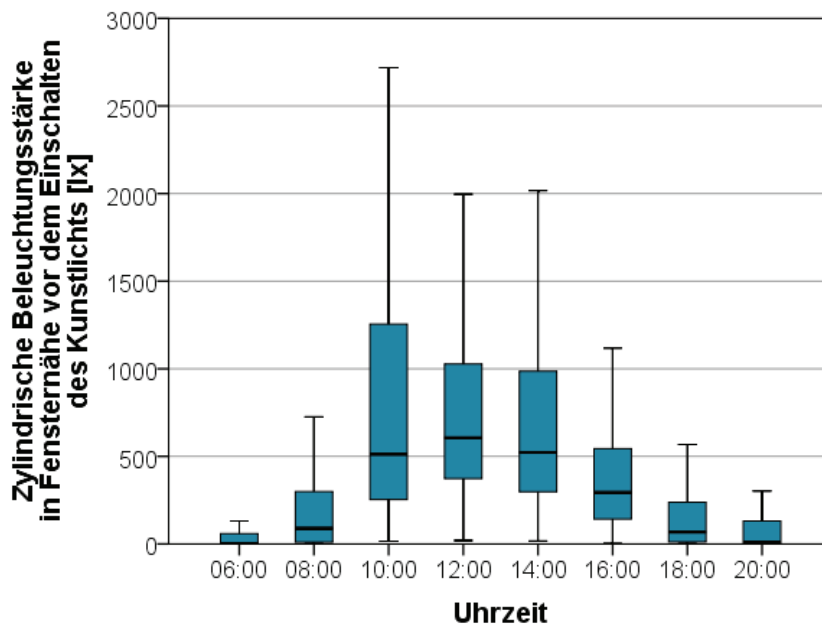


Abbildung 75 Boxplot der zylindrischen Beleuchtungsstärke in Fensternähe vor dem Einschalten des Kunstlichts in Abhängigkeit von der Uhrzeit

Ob das Einschalten aufgrund der als zu gering empfundenen horizontalen Beleuchtungsstärke oder aufgrund der als zu gering empfundenen zylindrischen Beleuchtungsstärke erfolgt ist, kann nicht festgestellt werden. Die Messwerte legen nahe, dass Nutzer bei der zylindrischen Beleuchtungsstärke – wie auch bei der horizontalen Beleuchtungsstärke – Werte oberhalb des in

DIN EN 12464-1 empfohlenen Mindestwertes von 150 lx im Tätigkeitsbereich bevorzugen (DIN EN 12464-1:2011-08, S. 16).

Für die weitere Auswertung der Nutzereingriffe wird die horizontale Beleuchtungsstärke an den Arbeitsplätzen herangezogen, da diese – bei eingeschränkter Messgenauigkeit – der normativ festgelegten und in der Planung genutzten Größe entspricht. Die gemessene zylindrische Beleuchtungsstärke in Fensternähe dagegen ist unter Tageslichtbedingungen in der Regel deutlich höher als die zylindrische Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich, auf die die Norm sich bezieht. Der Messwert in Fensternähe lässt keine Berechnung der zylindrischen Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich zu.

Die horizontale Beleuchtungsstärke, bei der das Kunstlicht eingeschaltet wurde, unterscheidet sich neben der Uhrzeit auch in Abhängigkeit von der Jahreszeit (Abbildung 76). Für die folgenden Auswertungen werden Situationen außerhalb üblicher Nutzungszeiten von 6:00 bis 20:00 Uhr ausgeschlossen.

Der Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum vor dem Einschalten des Kunstlichts liegt im Frühjahr bei 467 lx, im Sommer bei 377 lx, im Herbst bei 246 lx und im Winter bei 160 lx. Diese Unterschiede sind signifikant (ANOVA bei logarithmierter Beleuchtungsstärke: $F=337.6$, $p<0.001$, $N=6\,641$, Effektstärke $f=0.39$).

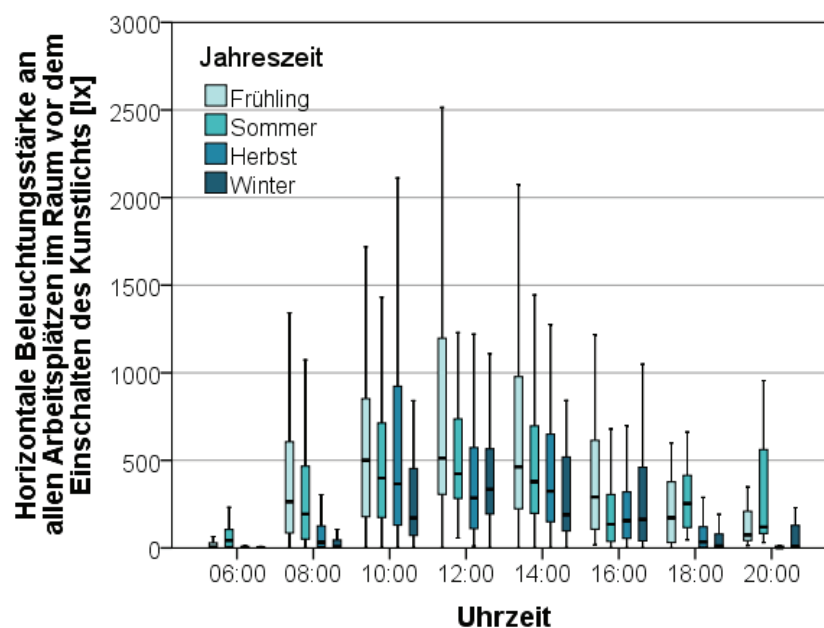


Abbildung 76 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum vor dem Einschalten des Kunstlichts in Abhängigkeit von Uhrzeit und Jahreszeit

Das Kunstlicht wird in allen Jahreszeiten auch in Situationen eingeschaltet, in denen am Arbeitsplatz bereits eine horizontale Beleuchtungsstärke von 500 lx vorhanden war. Bei 26,2 % der Einschaltvorgänge zwischen 6:00 und 20:00 Uhr ($N=2\,732$) lag die horizontale Beleuchtungsstärke an mindestens einem der Arbeitsplätze im Raum über 500 lx. Bei 12,7 % der Einschaltvorgänge war an allen Arbeitsplätzen im Raum bereits ohne Kunstlicht eine Beleuchtungsstärke über 500 lx vorhanden. Auch hier gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Jahreszeiten. Der Anteil der Einschaltvorgänge, bei denen an allen Arbeitsplätzen im Raum schon vor dem Einschalten über 500 lx geherrscht haben, liegt im Frühjahr bei 26,0 % ($N=615$), im Sommer bei 14,6 % ($N=404$), im Herbst bei 7,8 % ($N=933$) und im Winter bei 7,2 % ($N=780$).

Auffallend ist der deutliche Unterschied der Beleuchtungsstärke beim Einschalten des Kunstlichts in den Übergangszeiten Frühling und Herbst. Der Jahreszeit „Frühling“ wurden alle Messzeiträume zugeordnet, die überwiegend in die Monate März, April und Mai fallen, der Jahreszeit „Herbst“ alle Messzeiträume, die überwiegend in die Monate September, Oktober und November fallen. Der Zeitpunkt des Äquinoktiums liegt daher in beiden Jahreszeiten im ersten Drittel. Der Jahreszeit Frühling wurden durchschnittlich höhere Sonnenstände zugeordnet als der Jahreszeit Herbst.

Dem entspricht die durchschnittlich höhere Außenbeleuchtungsstärke beim Einschalten des Kunstlichts im Frühling im Vergleich zum Herbst (Abbildung 77).

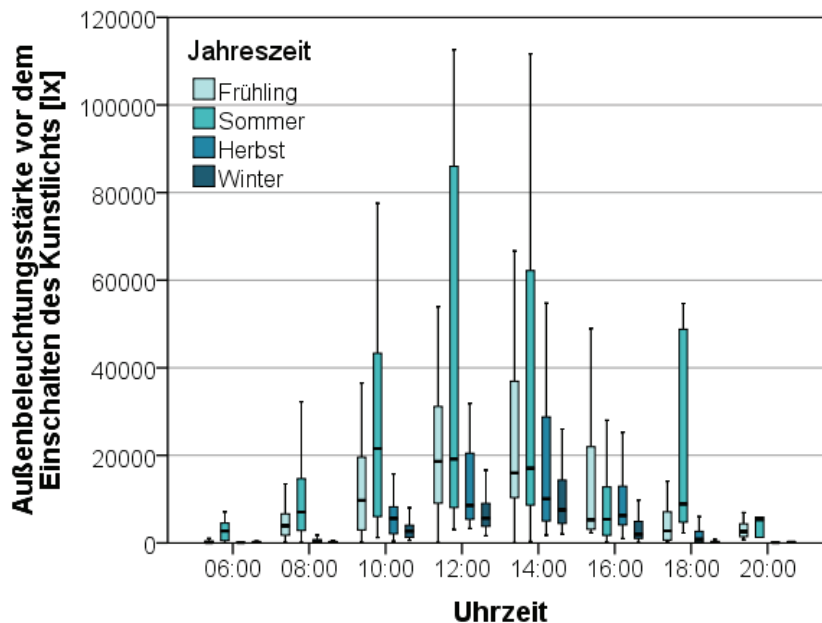


Abbildung 77 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke auf dem Dach des Gebäudes beim Einschalten des Kunstlichts in Abhängigkeit von Uhrzeit und Jahreszeit

Der Unterschied der Außenbeleuchtungsstärke ist jedoch kleiner als der Unterschied der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz: Im Frühling wird das Kunstlicht durchschnittlich bei 9773 lx außen und 467 lx innen eingeschaltet (4,8 % der Außenbeleuchtungsstärke), im Herbst bei 6107 lx außen und 246 lx innen (4,0 % der Außenbeleuchtungsstärke).

Das größere Tageslichtangebot außen führt im Frühling also nicht dazu, dass das Kunstlicht bei kleineren Außenbeleuchtungsstärkeanteilen (und ähnlicher Beleuchtungsstärke) am Arbeitsplatz eingeschaltet wird. Im Gegenteil: Trotz des größeren Angebots wird das Kunstlicht bei größeren Außenbeleuchtungsstärkeanteilen zugeschaltet.

Im Frühling werden offenbar höhere Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz gewünscht als in den anderen Jahreszeiten. Dementsprechend ist in dieser Jahreszeit der Unterschied der Beleuchtungsstärke vor dem Einschalten des Kunstlichts je nach Kunstlichtsteuerung besonders groß: Tageslichtabhängig geregelte Kunstlichtanlagen können aufgrund der Regelung bei bereits vorhandenen hohen Beleuchtungsstärken nicht eingeschaltet werden.

Der Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke aller Arbeitsplätze im Raum vor dem Einschalten des Kunstlichts liegt bei automatisch geregelten Anlagen im Frühling bei 347 lx, bei 13,4 % aller Einschaltvorgänge ($N=376$) herrschten am dunkelsten Arbeitsplatz im Raum vor dem Einschalten über 500 lx. Bei manuell geschalteten Anlagen liegt der Mittelwert vor dem Einschalten im Frühling bei 504 lx, bei 29,8 % aller Einschaltvorgänge ($N=376$) herrschten am dunkelsten Arbeitsplatz im Raum vor dem Einschalten über 500 lx. Der Unterschied der

Beleuchtungsstärke aller Einschaltvorgänge im Frühling über 10 lx ist signifikant (ANOVA bei logarithmierter Beleuchtungsstärke: $F=41.3$, $p<0.001$, $N=1\,059$, Effektstärke $f=0.20$).

Die Beleuchtungsstärke vor dem Einschalten ist in dem Gebäude mit manueller Schaltung und zentral angeordneten Lichtschaltern mit durchschnittlich 602 lx nochmals höher, hier herrschten bei 44,2 % aller Einschaltvorgänge ($N=52$) am dunkelsten Arbeitsplatz im Raum vor dem Einschalten bereits über 500 lx. In diesem Gebäude kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Kunstlicht „vorsorglich“ auf dem Weg zum Arbeitsplatz eingeschaltet wurde und die vorhandene Beleuchtungsstärke gar nicht als zu gering empfunden wurde. Dieses Gebäude wurde daher bei der Varianzanalyse nicht berücksichtigt. Abbildung 78 zeigt den Einfluss der Kunstlichtsteuerung.

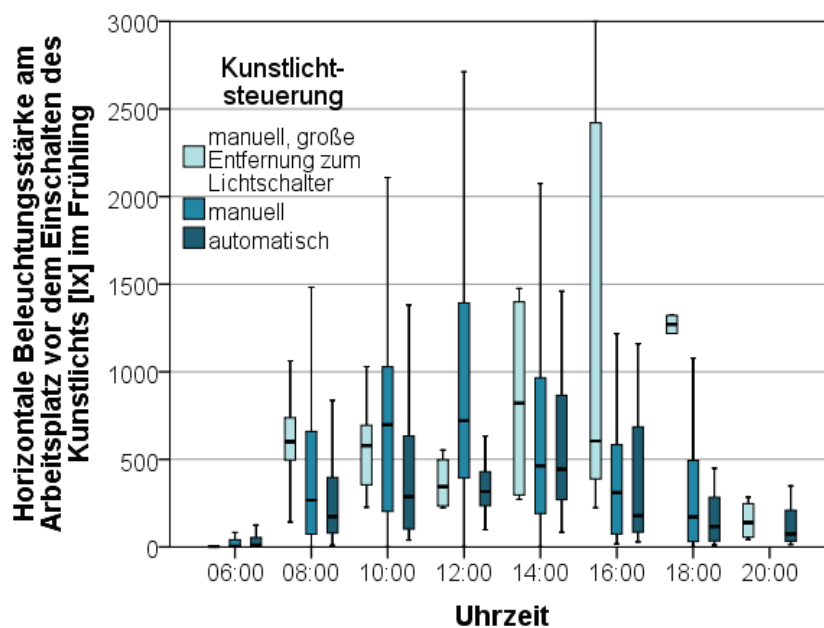


Abbildung 78 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum vor dem Einschalten des Kunstlichts in Abhängigkeit von Kunstlichtsteuerung und Uhrzeit im Frühling

Im Frühling finden – anders als in den übrigen Jahreszeiten – mehr Einschaltvorgänge in den Gebäuden mit manueller Steuerung statt ($N=410$) als in den Gebäuden mit automatischer Regelung ($N=215$).

Im Sommer besteht in der vorliegenden Stichprobe kein signifikanter Unterschied der Beleuchtungsstärke aller Arbeitsplätze im Raum vor dem Einschalten des Kunstlichts in Abhängigkeit von der Steuerung (manuell durchschnittlich 369 lx, geregelt durchschnittlich 367 lx; ANOVA aller Einschaltvorgänge über 10 lx bei logarithmierter Beleuchtungsstärke: $F=4.0$, $p=0.045$, $N=984$, Effektstärke $f=0.06$).

Im Herbst und Winter ist die mittlere Beleuchtungsstärke bei manuell geschalteten Anlagen etwas höher (Herbst: manuell durchschnittlich 292 lx, geregelt durchschnittlich 244 lx; Winter manuell durchschnittlich 172 lx, geregelt durchschnittlich 139 lx; ANOVA aller Einschaltvorgänge über 10 lx bei logarithmierter Beleuchtungsstärke – Herbst: $F=14.7$, $p<0.001$, $N=1\,826$, Effektstärke $f=0.09$; Winter: $F=87.7$, $p<0.001$, $N=890$, Effektstärke $f=0.31$).

Diese Unterschiede sind zwar signifikant, werden aber vermutlich nicht oder in nur geringem Maß von der Steuerung beeinflusst, da das Beleuchtungsstärkeniveau vor dem Einschalten im überwiegenden Teil der Fälle deutlich unter 500 lx lag.

Auch diese Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass die von den Nutzern gewünschte Beleuchtungsstärke (und damit die Nutzerwünsche bezüglich des Kunstlichts) von der Jahreszeit beeinflusst wird.

Für den architektonischen Parameter „Fensterflächenanteil“ konnte in der vorliegenden Stichprobe kein systematischer Zusammenhang mit der Beleuchtungsstärke beim Einschalten des Kunstlichts nachgewiesen werden (*Pearson's* $r=-0.01$, $p=0.337$, $N=6830$).

Zusammenfassung Nutzereingriffe Kunstlicht

Nutzer schalten das Kunstlicht häufig morgens beim Betreten des Büros ein. Zu diesem Zeitpunkt liegt die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz in der Regel unter 500 lx.

Schaltvorgänge um die Mittagszeit werden von der Art der Steuerung beeinflusst: In Gebäuden mit automatisch geregelten Kunstlichtanlagen wird das Licht häufiger ausgeschaltet als in Gebäuden mit manueller Schaltung – es ist anzunehmen, dass das Ausschalten häufig durch die Regelung erfolgt. Dementsprechend treten in Gebäuden mit automatischer Regelung mehr Einschaltvorgänge am Nachmittag auf.

Dieser Unterschied bei den Schaltvorgängen spiegelt sich im Unterschied der Brenndauer von ca. 1 h wider. Diese um ca. 22 % geringere Brenndauer von Kunstlichtanlagen mit automatischer Regelung führt – identische installierte Leistungen vorausgesetzt – zu einem im gleichen Umfang geringeren Energieverbrauch.

In einem Gebäude, in dem die Lichtschalter nutzerunfreundlich mit teilweise großem Abstand zum Arbeitsplatz angebracht und gleichzeitig Leuchten verwendet wurden, deren Schaltzustand unter Tageslichtbedingungen nicht ins Auge fällt, wurde eine signifikant größere mittlere Brenndauer beobachtet.

Die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz, bei der das Kunstlicht eingeschaltet wird, unterscheidet sich je nach Jahreszeit. Im Winter bei nur geringem Tageslichtangebot erfolgt das Einschalten bei vergleichsweise niedrigen Beleuchtungsstärken. Im Frühling wird das Kunstlicht bei höheren Beleuchtungsstärken eingeschaltet als in den anderen Jahreszeiten. Dieser Umstand kann nicht allein durch das Tageslichtangebot erklärt werden.

Bei manuell geschalteten Anlagen, die das Einschalten unabhängig von der bereits vorhandenen Beleuchtungsstärke zulassen, erfolgt das Einschalten des Kunstlichts im Frühling in 30 % der Fälle bei einer Beleuchtungsstärke über 500 lx am dunkelsten Arbeitsplatz im Raum – Nutzer bevorzugen in dieser Jahreszeit offensichtlich Beleuchtungsstärken oberhalb der Mindestanforderung der DIN EN 12464-1.

Bei tageslichtabhängig geregelten Kunstlichtanlagen wird das Kunstlicht bei einer Beleuchtungsstärke oberhalb des eingestellten Sollwertes gedimmt bzw. ausgeschaltet. Wird der Sollwert durch Tageslicht erreicht, ist eine Ergänzung des Tageslichtangebotes durch Kunstlicht ausgeschlossen. Demzufolge zeigen sich im Frühling mit besonders hohen gewünschten Beleuchtungsstärkewerten am Arbeitsplatz große Unterschiede zwischen manuell geschalteten und automatisch geregelten Anlagen.

Diese Beobachtung legt nahe, dass tageslichtabhängig gedimmte oder geschaltete Kunstlichtanlagen mit einem Sollwert von ca. 500 lx den Wünschen der Nutzer im Frühling weniger nahe kommen als manuell geschaltete Anlagen, was auch den Nutzerurteilen zur Helligkeit des Kunstlichts entspricht (siehe Abschnitt „5.2.6 Künstliche Beleuchtung“).

5.3.2 Nutzereingriffe Sonnen-/Blendschutz

In einigen Gebäuden wird der außenliegende Sonnenschutz zentral über die Gebäudeleittechnik (GLT) gesteuert. Die Nutzer können jedoch das Signal der GLT übersteuern. Wenn die Position des Sonnenschutzes von der GLT verändert wird, ist mit der Veränderung kein Nutzerurteil verbunden. Daher müssen diese Veränderungen identifiziert und bei der Auswertung ausgeschlossen werden.

Veränderungen des Sonnenschutzes durch die GLT weisen typische Merkmale auf, die sie von Nutzereingriffen unterscheiden. Veränderungen, die von der GLT ausgelöst werden, finden in mehreren Räumen gleichzeitig statt. Für die Auswertung wird davon ausgegangen, dass eine von der GLT ausgelöste Veränderung vorliegt, wenn eine Veränderung in mindestens vier der 15 untersuchten Räume „gleichzeitig“, also im selben vierminütigen Messintervall, aufgetreten ist.

Der Sonnenschutz wird von der GLT entweder vollständig geöffnet oder geschlossen. Befindet sich der Sonnenschutz nach dem Eingriff in einer Zwischenposition, so kann man davon ausgehen, dass der Eingriff von einem Nutzer vorgenommen wurde oder dass ein Nutzer den Sonnenschutz nach einem Verfahrbefehl der GLT verändert hat, also einen eigenen Eingriff vorgenommen hat.

500 der Veränderungen können diesen Definitionen zufolge von der GLT verursacht worden sein und werden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen, es bleiben 3531 Nutzereingriffe für die Auswertung.

Die aufgezeichneten Leuchtdichtebilder enthalten die Position des Sonnen- und/oder Blendschutzes als visuelle Information, sie liegen für 505 Messreihen vor. Bei 30 der 505 Messreihen (6 %) kam es zu einem Abbruch der Messung während der Messreihe. Grund dafür war in der Regel eine Unterbrechung der Stromversorgung der Leuchtdichtekamera durch die Nutzer.

An einem Messtag wurden von 6:00 Uhr bis 19:00 Uhr Leuchtdichtebilder im Abstand von vier Minuten aufgezeichnet. Das ergibt 196 Bilder an jedem vollständigen Messtag. Die Messreihen begannen in der Regel im Laufe eines Montagvormittags mit dem Aufbau der Messgeräte und endeten im Laufe eines Freitagnachmittags mit dem Abbau. Wegen der „fehlenden“ Stunden am Tag des Aufbaus und am Tag des Abbaus und durch den Abbruch bei 30 Messreihen liegen pro Messzeitraum nicht zehn vollständige Messtage von 6:00 Uhr bis 19:00 Uhr vor, sondern durchschnittlich 9,2 Messtage. Pro Messreihe mit durchschnittlich 9,2 Messtagen wurden durchschnittlich 7,1 Nutzereingriffe beobachtet.

Während pro Messreihe durchschnittlich 0,77 Nutzereingriffe pro Tag vorgenommen wurden (Mittelwerte der Messreihen zwischen 0 und 4,0 Nutzereingriffen täglich), weist eine Messreihe einen Mittelwert von über 11,4 Nutzereingriffen pro Tag auf. Der Sonnenschutz wurde in dieser Messreihe durchschnittlich pro Nutzereingriff um 10 % geschlossen bzw. um 35 % geöffnet, der Blendschutz durchschnittlich um 19 % geschlossen bzw. um 16 % geöffnet. Die Nutzer der betroffenen Arbeitsplätze nahmen also sehr viel häufiger als andere Nutzer relativ kleine Eingriffe vor. Ein Fragebogen wurde für diesen Messzeitraum nicht ausgefüllt, so dass keine Angaben zu den Gründen für die auffallend häufigen Eingriffe vorliegen. Da sich auch die Messwerte vor den Nutzereingriffen in dieser Messreihe von den Messwerten der übrigen Messreihen unterscheiden, wird diese Messreihe von der weiteren Auswertung ausgeschlossen – es kann nicht sicher davon ausgegangen werden, dass die Nutzereingriffe Folge der Belichtungssituation waren.

Es verbleiben 3433 Nutzereingriffe für die Auswertung, 504 Messreihen mit durchschnittlich 9,2 Messtagen und durchschnittlich 6,8 Nutzereingriffen pro Messreihe.

Zeitpunkt und Anlass der Nutzereingriffe

Abbildung 79 zeigt, dass das Öffnen des Sonnen- oder Blendschutzes durch die Nutzer vor allem morgens bei Arbeitsbeginn erfolgt (30,1 % vor 9:00 Uhr) oder gegen Arbeitsende (20,9 % nach 16:00 Uhr).

Das Schließen des Sonnen- oder Blendschutzes durch die Nutzer erfolgt während des gesamten Tages, am häufigsten zwischen 10:00 Uhr und 14:00 Uhr (49,2 % aller Fälle).

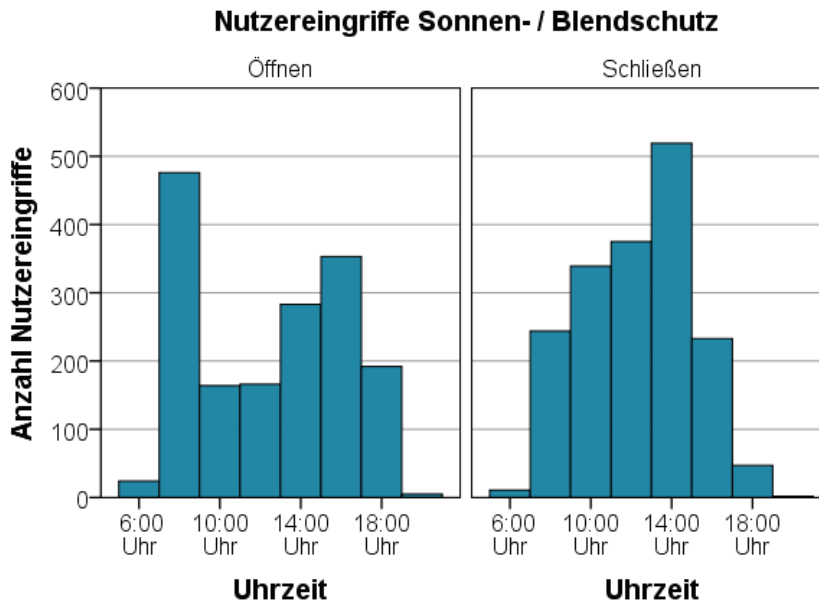


Abbildung 79 Anzahl der Nutzereingriffe zum Öffnens bzw. Schließens von Sonnen- oder Blendschutz in Abhängigkeit von der Art des Eingriffs und der Uhrzeit

Je nach Orientierung des Büroraums öffnen und schließen die Nutzer ihren Sonnenschutz zu unterschiedlichen Zeiten (Abbildung 80 und Abbildung 81).

Das Schließen des Sonnenschutzes erfolgt in Büroräumen mit Nordorientierung (Nordwest/ Nord/Nordost) überwiegend morgens beim Betreten des Büros (7:00 bis 9:00 Uhr). Bei Nordbüros trifft die Sonne bei entsprechender Witterung in diesem Zeitraum auf die Fassade, während diese Räume im weiteren Verlauf des Arbeitstages unbesonnt sind.

Dem Sonnenverlauf entsprechend wird der Sonnenschutz in Ost- und Südost-orientierten Büros in der Regel vor 11:00 Uhr geschlossen, Süd- und Südwest-orientierte Büros folgen mit einer Häufung der Schließvorgänge zwischen 11:00 und 15:00 Uhr, in West-orientierten Räumen wird der Sonnenschutz häufig erst zwischen 15:00 und 17:00 Uhr geschlossen.

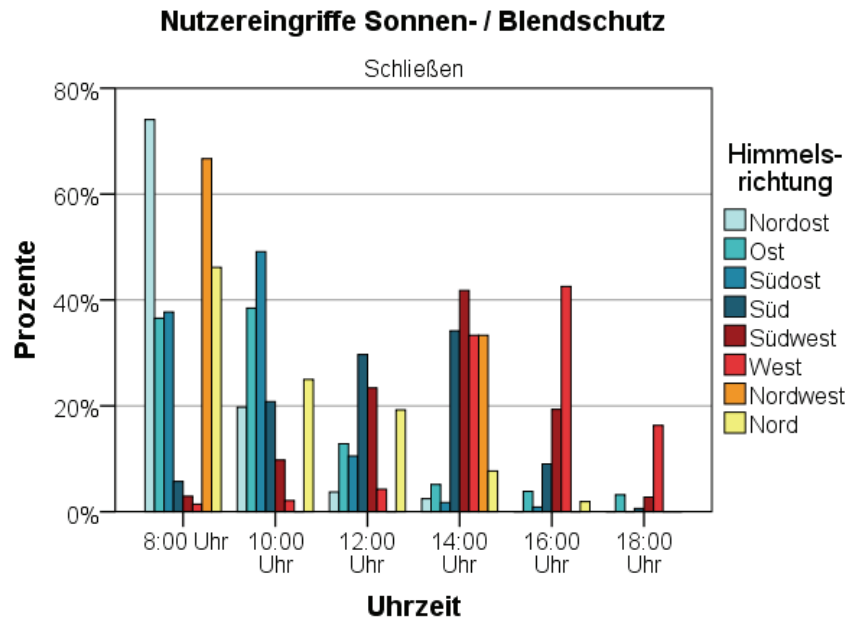


Abbildung 80 Häufigkeit des Schließens von Sonnen- oder Blendschutz in Abhängigkeit von der Orientierung des Fensters und der Uhrzeit

Beim Öffnen des Sonnenschutzes fallen die Büroräume mit Westorientierung auf: Hier finden 73 % aller detektierten Öffnungsvorgänge zwischen 7:00 und 9:00 Uhr morgens statt. In Nordwestbüros finden 50 % der Öffnungsvorgänge zwischen 9:00 und 11:00 Uhr morgens statt. Die Öffnungsvorgänge der übrigen Orientierungen verteilen sich gleichmäßiger über den Arbeitstag.

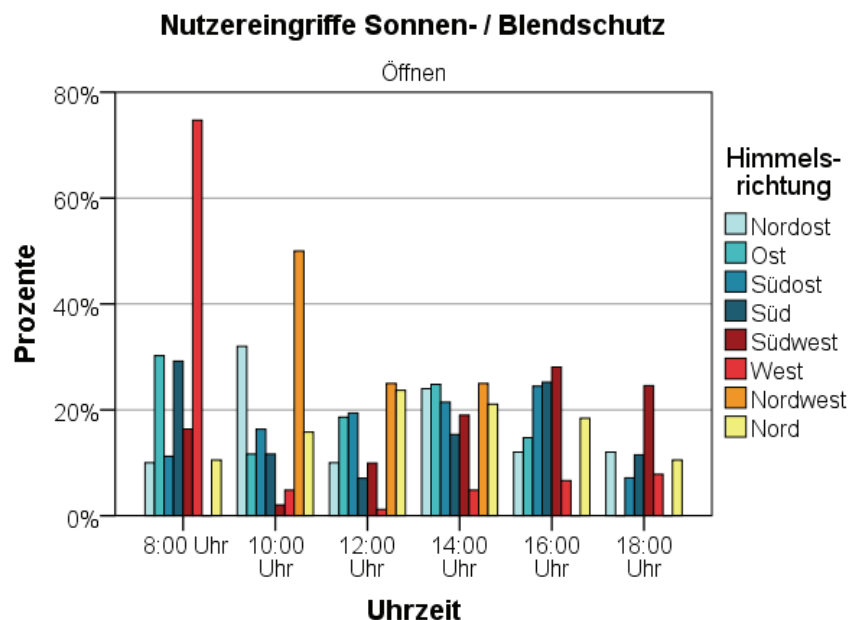


Abbildung 81 Häufigkeit des Öffnens von Sonnen- oder Blendschutz in Abhängigkeit von der Orientierung des Fensters und der Uhrzeit

Die Nutzerangaben (siehe Abbildung 46) und die je nach Orientierung des Büros zu einer Himmelsrichtung unterschiedlichen Zeitpunkte für das Öffnen und Schließen des Sonnenschutzes bestätigen die Annahme, dass die Reduktion von Blendung und die Anpassung der Helligkeit häufig Anlass für Veränderungen des Sonnen- oder Blendschutzes sind. Nur im

Sommer spielt auch der thermische Komfort bei Veränderungen des Sonnenschutzes eine entscheidende Rolle für die Nutzer.

Der zeitliche Verlauf des Schließens des Sonnenschutzes legt die Vermutung nahe, dass der Sonnenschutz primär zum Schutz vor direkter Besonnung eingesetzt wird und seltener zum Schutz vor hohen Leuchtdichten des hellen Himmels oder einer hellen gegenüber liegenden Fassade.

Wie beim Kunstlicht (siehe Abschnitt „5.2.2 Beleuchtung“) ist die Häufigkeit der Nutzereingriffe zur Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes negativ korreliert mit der von den Nutzern angegebenen Abstimmungshäufigkeit. Je häufiger sich die Nutzer abstimmen müssen, desto weniger Nutzereingriffe finden statt (Öffnen des Sonnenschutzes: *Pearson's* $r=-0.31$, $p<0.001$, $N=908$; Schließen des Sonnenschutzes: *Pearson's* $r=-0.32$, $p<0.001$, $N=908$), und desto ausgeprägter ist der Wunsch der Nutzer, sich weniger abstimmen zu müssen (Öffnen des Sonnenschutzes: *Pearson's* $r=-0.18$, $p<0.001$, $N=730$; Schließen des Sonnenschutzes: *Pearson's* $r=-0.21$, $p<0.001$, $N=730$).

DGP-Werte und Beleuchtungsstärke vor und nach einer Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes

Im Folgenden wurde untersucht, welche DGP-Werte die Situationen vor einem Nutzereingriff aufwiesen und welche Werte nach der Anpassung des Sonnen- oder Blendschutzsystems durch den Nutzer vorlagen. Die Anpassung der Daylight Glare Probability an niedrige Beleuchtungsstärken (lowlight) und an die Durchsicht (viewratio) wurde dabei berücksichtigt. Der Korrekturfaktor für das Alter der Nutzer konnte nicht verwendet werden, da der jeweils eingreifende Nutzer und damit auch sein Alter nicht bekannt ist.

Die $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Werte vor dem Schließen des Sonnen- oder Blendschutzes liegen mit durchschnittlich 0,40 in einer Größenordnung, bei der eine Blendung der Nutzer und damit ein Eingreifen zu erwarten ist. Die DGP-Werte vor dem Öffnen des Sonnenschutzes sind mit durchschnittlich 0,16 erwartungsgemäß deutlich niedriger. Die DGP-Werte der Situationen vor dem Öffnen und die Werte vor dem Schließen des Sonnen- oder Blendschutzes unterscheiden sich signifikant (ANOVA $F=2670.8$, $p<0.001$, $N=3427$, Effektstärke $f=0.88$).

Die DGP-Werte nach dem Nutzereingriff unterscheiden sich weniger deutlich. Abbildung 82 zeigt die Daylight Glare Probability beim Blick zum Fenster vor und nach einem Nutzereingriff.

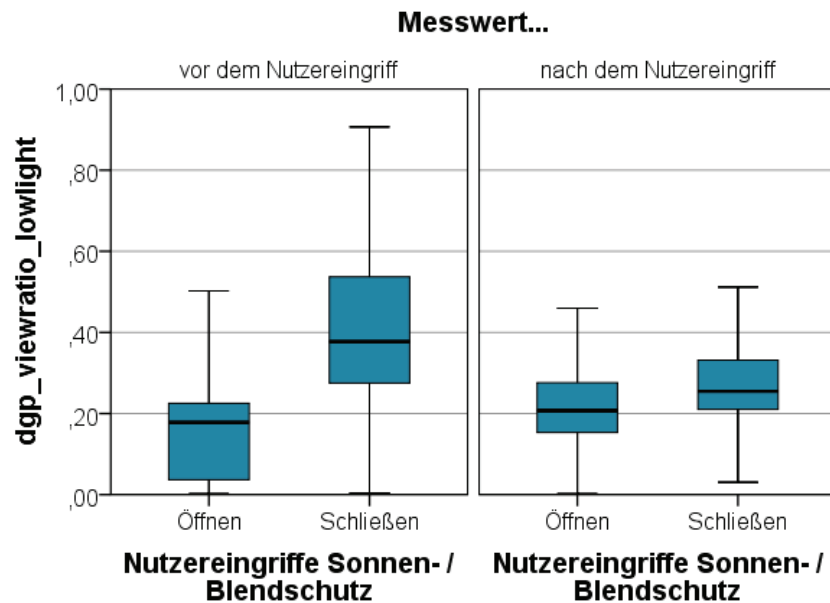


Abbildung 82 Boxplot des $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wertes vor und nach einer Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes durch den Nutzer in Abhängigkeit von der Art des Eingriffs

Die $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Werte vor den Nutzereingriffen unterscheiden sich – bei großer Streuung – je nach Jahreszeit (Abbildung 83). Vor dem Schließen ist der Mittelwert des $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ im Sommer niedriger als in den anderen Jahreszeiten ($DGP_{\text{lowlight, viewratio}}=0,36$, Frühling 0,40, Herbst 0,43, Winter 0,42), diese Unterschiede sind signifikant (ANOVA $F=17.7$, $p<0.001$, $N=1767$, Effektstärke $f=0.17$). Das Eingreifen bei niedrigeren DGP-Werten im Sommer entspricht der von den Nutzern angegebenen Absicht, unerwünschte Wärmeeinträge zu vermeiden.

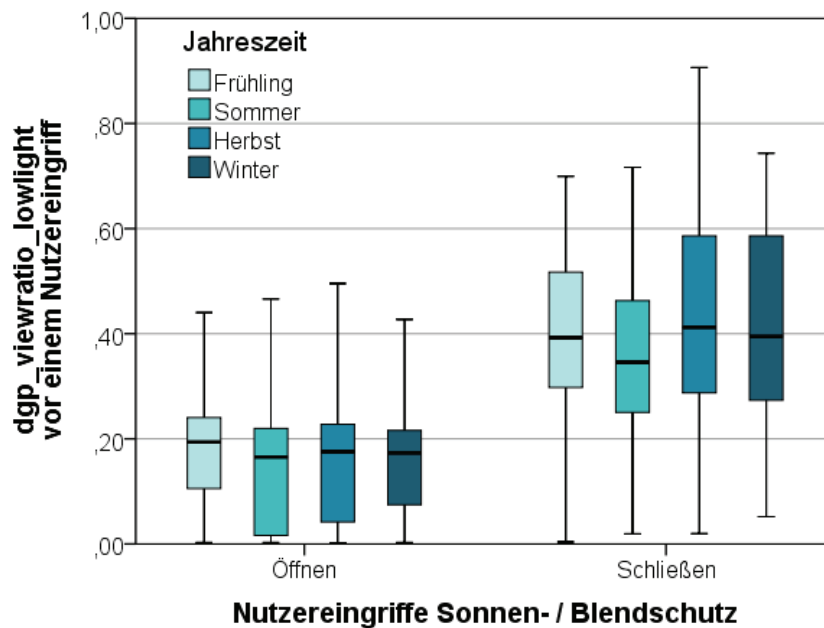


Abbildung 83 Boxplot des $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wertes vor einer Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes durch den Nutzer in Abhängigkeit von der Art des Eingriffs und der Jahreszeit

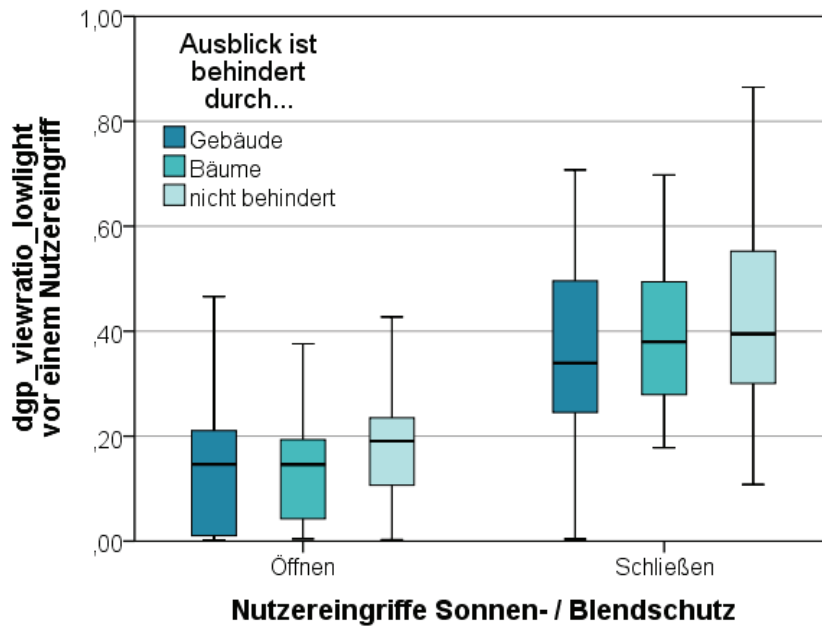


Abbildung 84 Boxplot des $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wertes vor einer Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes durch den Nutzer in Abhängigkeit von der Art des Eingriffs und dem Ausblick

Die $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Werte vor den Nutzereingriffen unterscheiden sich auch je nach Ausblick (Abbildung 84). Beim Blick auf Gebäude wird der Sonnen- oder Blendschutz bei einem durchschnittlichen $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wert von 0,37 geschlossen, beim Blick auf Bäume bei 0,39 und bei freiem Ausblick bei 0,42. Diese Unterschiede sind klein aber signifikant (ANOVA $F=17.5$, $p<0.001$, $N=1767$, Effektstärke $f=0.14$).

Die Unterschiede der DGP-Werte vor dem Öffnen sind größer, lassen aber keinen Rückschluss auf die Blendungstoleranz zu.

Dieses Ergebnis bestätigt trotz der nur kleinen Unterschiede und großer Streuung die Hypothese, dass der Umgang der Nutzer mit dem Sonnen- oder Blendschutzsystem von der Bewertung des Ausblicks beeinflusst wird.

Der Einfluss der Einschränkung des Ausblicks durch den Sonnen- oder Blendschutz konnte nicht untersucht werden, da das hinsichtlich dieses Aspekts am schlechtesten bewertete System Rollläden nur bei einem Gebäude in fünf Räumen eingesetzt wird, und auch Rollos und Vertikal-lamellen als Sonnenschutzsystem nur bei jeweils einem Gebäude in sechs bzw. vier Räumen verwendet wurden. Rückschlüsse aus den Nutzereingriffen so weniger Räume können keine belastbaren Aussagen über die Systeme liefern.

Auch nach dem Nutzereingriff besteht ein signifikanter Unterschied der $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Werte zwischen den Situationen, in denen der Sonnen- oder Blendschutz geschlossen wurde und den Situationen, in denen er geöffnet wurde (ANOVA $F=220.6$, $p<0.001$, $N=3427$, Effektstärke $f=0.25$). Der $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wert nach dem Schließen von Sonnen- oder Blendschutz ist mit durchschnittlich 0,29 höher als der nach dem Öffnen (Mittelwert $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}=0,22$).

Beim Schließen des Sonnenschutzes ist das Auge des Nutzers in der Regel an ein höheres Helligkeitsniveau adaptiert als beim Öffnen des Sonnenschutzes. Das kann dazu führen, dass etwas höhere DGP-Werte akzeptiert werden. Zum Anderen erfolgt das Öffnen des Sonnenschutzes häufig morgens, wenn aufgrund der geringeren Außenbeleuchtungsstärke je nach Orientierung keine hohen DGP-Werte möglich sind.

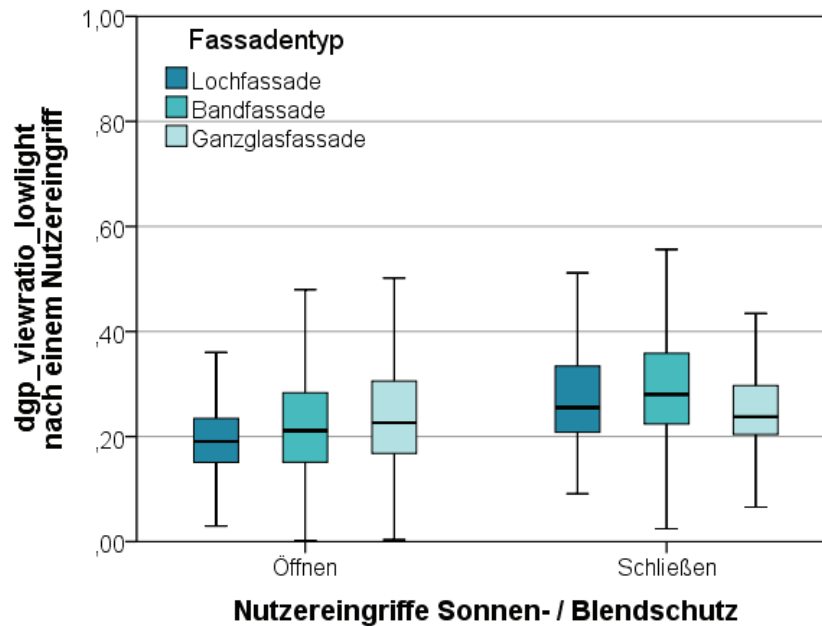


Abbildung 85 Boxplot des $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wertes nach einer Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes durch den Nutzer in Abhängigkeit von der Art des Eingriffs und dem Fassadentyp

Der Fensterflächenanteil der Fassade beeinflusst das Nutzerverhalten, wenn Räume nicht zu einem Atrium orientiert sind (Abbildung 85).

In den beiden untersuchten Gebäuden mit Ganzglasfassade wurde der Sonnenschutz so weit geöffnet, dass der mittlere $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wert nach einem Nutzereingriff 0,25 betrug. In Gebäuden mit Lochfassade ($DGP_{\text{lowlight, viewratio}}=0,20$) oder Bandfassade ($DGP_{\text{lowlight, viewratio}}=0,22$) lagen die Werte etwas niedriger (ANOVA $F=14.1$, $p<0.001$, $N=1\,627$, Effektstärke $f=0.13$).

Beim Schließen des Sonnen- oder Blendschutzes zeigt sich ein anderes Bild: In den Gebäuden mit Ganzglasfassade wurde der Sonnen- oder Blendschutz so weit geschlossen, dass der mittlere $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wert nach einem Nutzereingriff 0,26 betrug. In den Gebäuden mit Lochfassade ($DGP_{\text{lowlight, viewratio}}=0,29$) und Bandfassade ($DGP_{\text{lowlight, viewratio}}=0,31$) lagen die Werte – bei großer Streuung der Messwerte – signifikant höher (ANOVA $F=19.2$, $p<0.001$, $N=1\,677$, Effektstärke $f=0.15$).

Eigenschaften des Sonnenschutzes beeinflussen das Nutzerverhalten ebenfalls. Die Beeinflussung durch die Aspekte „Einschränkung des Ausblicks durch den Sonnen-/Blendschutz“ und „Bedienbarkeit“ kann allerdings nicht direkt analysiert werden, da den Nutzereingriffen kein Nutzer und damit kein Nutzerurteil zugeordnet werden kann. Die unterschiedliche durchschnittliche Bewertung der verschiedenen Systeme kann jedoch als Anhaltspunkt dienen.

Die Aspekte „Einschränkung des Ausblicks“ und „Bedienbarkeit“ werden in Räumen mit Rollläden und mit Sonnenschutzrollos signifikant schlechter bewertet als in Räumen mit anderen Sonnenschutzeinrichtungen, die Einschränkung des Ausblicks wird auch in Räumen mit Vertikal lamellen im Mittel vergleichsweise schlecht bewertet (siehe Abschnitt „5.2.5 Sonnen- und Blendschutz“).

Die Häufigkeit, mit der Nutzer Eingriffe vornehmen, unterscheidet sich ebenfalls je nach System (Abbildung 86). Die Anzahl Veränderungen am Sonnenschutz, die in einem Raum während eines Messzeitraums vorgenommen wurden, liegt in Räumen mit Rollläden bei 2,9 und bei Räumen mit Sonnenschutzrollos bei 4,0 Vorgängen. Die Position außenliegender Raffstores, bei denen Bedienbarkeit und Durchsicht durch das System im Mittel positiver bewertet wurden, wird mit durchschnittlich 6,1 Vorgängen bei ausschließlich manuell bedienbaren Systemen signifikant häufiger verändert.

Vertikallamellen, mit deren Bedienbarkeit die Nutzer insgesamt ebenfalls zufrieden waren, werden pro Messzeitraum durchschnittlich 7,1-mal verändert. Die größte Anzahl Veränderungen wurde mit 9,1 Veränderungen bei automatisch gesteuerten und manuell veränderbaren Raffstores beobachtet. Möglicherweise dienen die Nutzereingriffe zumindest teilweise der Korrektur von Veränderungen durch die Gebäudeleittechnik.

Die durchschnittliche Anzahl Veränderungen unterscheidet sich signifikant in Abhängigkeit vom Sonnenschutzsystem (ANOVA $F=14.2$, $p<0.001$, $N=470$, Effektstärke $f=0.43$)

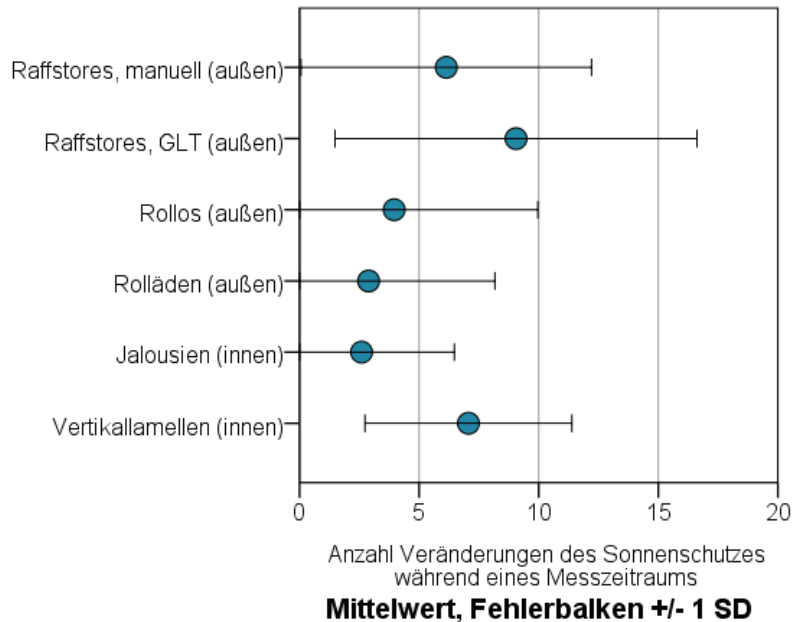


Abbildung 86 Mittelwerte und Standardabweichungen der Anzahl Nutzereingriffe, die während eines Messzeitraums in einem Raum aufgetreten sind, für die eingesetzten Sonnenschutzsysteme

Da die drei Sonnenschutzsysteme Rollos, Rolläden und Vertikallamellen jeweils in nur wenigen Räumen eingesetzt wurden, kann die Anzahl Nutzereingriffe lediglich als Hinweis dienen, dass Systeme, die aus Sicht der Nutzer den Ausblick behindern oder die nicht einfach zu bedienen sind, möglicherweise weniger genutzt werden.

Auch die $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Werte nach einem Nutzereingriff unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Jahreszeit (Abbildung 87). Nach dem Öffnen ist der Mittelwert des $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ den übrigen Ergebnissen entsprechend im Frühling höher als in den anderen Jahreszeiten ($DGP_{\text{lowlight, viewratio}}=0,24$, Sommer 0,23, Herbst 0,22, Winter 0,20), diese Unterschiede sind klein aber signifikant (ANOVA $F=6.4$, $p<0.001$, $N=1\,660$, Effektstärke $f=0.11$).

Nach dem Schließen ist der Mittelwert des $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ im Sommer niedriger als in den anderen Jahreszeiten ($DGP_{\text{lowlight, viewratio}}=0,25$, Frühling 0,28, Herbst 0,31, Winter 0,32), auch diese Unterschiede sind signifikant (ANOVA $F=34.7$, $p<0.001$, $N=1\,767$, Effektstärke $f=0.24$).

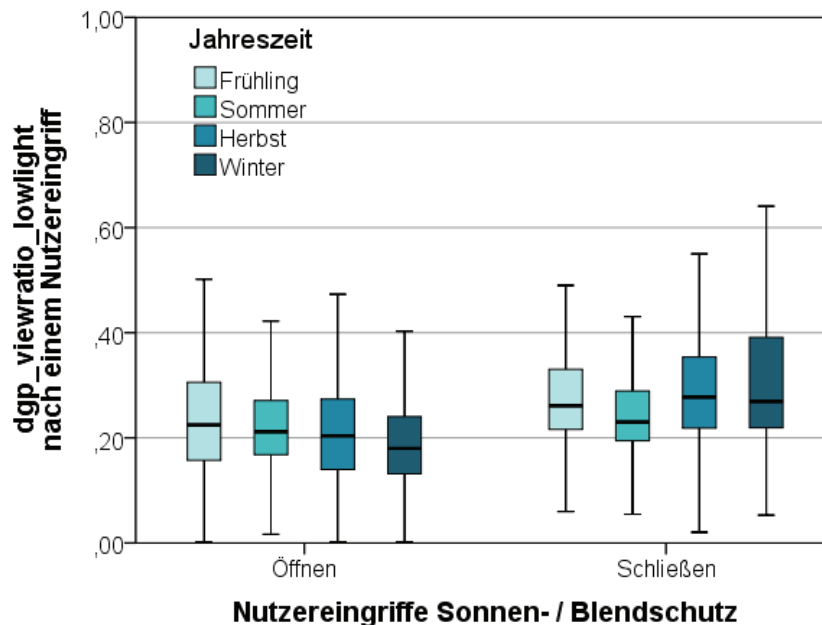


Abbildung 87 Boxplot des $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wertes nach einer Veränderung des Sonnen- oder Blendenschutzes durch den Nutzer in Abhängigkeit von der Art des Eingriffs und der Jahreszeit

Die trotz großer Streuung signifikanten Unterschiede bestätigen die Hypothese, dass die Blendungstoleranz von der Jahreszeit beeinflusst wird, und zeigen auch den Einfluss des thermischen Komforts im Sommer.

Neben der Vermeidung von Blendung durch Tageslicht wird die Anpassung der Helligkeit im Raum oder am Arbeitsplatz bei vielen Befragungen als Anlass für einen Nutzereingriff angegeben. Als Messwerte stehen die zylindrische Beleuchtungsstärke in Fensternähe und die horizontale Beleuchtungsstärke der Arbeitsplätze im Raum zur Verfügung. Es gibt keinen Anhaltspunkt, von welchem Arbeitsplatz in den Mehrpersonenbüros der Nutzereingriff ausging, daher werden die folgenden Analysen mit der zylindrischen Beleuchtungsstärke in Fensternähe durchgeführt, die für alle Arbeitsplätze eines Raumes gleichermaßen gilt.

Die folgende Abbildung 88 zeigt die zylindrische Beleuchtungsstärke in Fensternähe vor und nach einem Nutzereingriff, getrennt nach Art des erfolgten Nutzereingriffs.

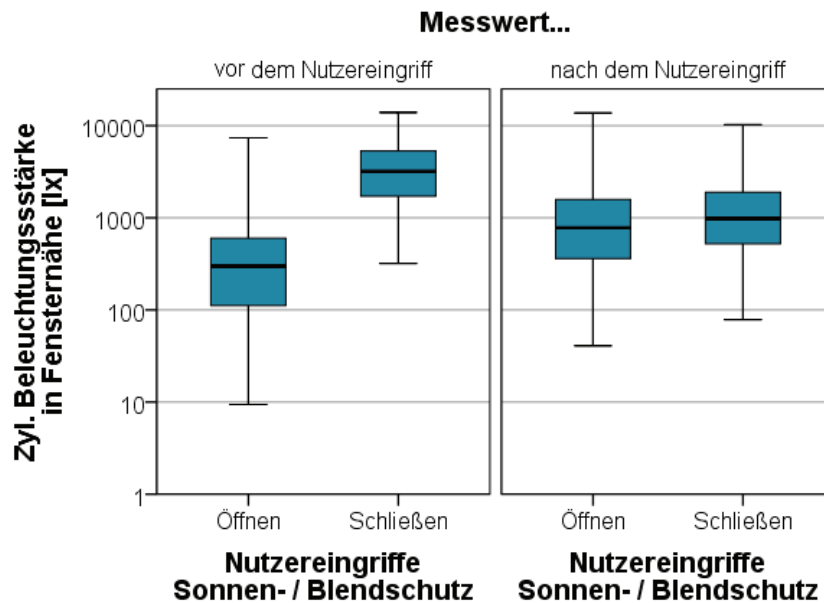


Abbildung 88 Boxplot der zylindrischen Beleuchtungsstärke in Fensternähe vor und nach einer Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes durch den Nutzer in Abhängigkeit von der Art des Eingriffs

Die zylindrische Beleuchtungsstärke in Fensternähe vor dem Öffnen des Sonnen- oder Blendschutzes liegt im Mittel bei 509 lx, vor dem Schließen liegt der Wert im Mittel signifikant höher bei 3728 lx (ANOVA bei logarithmierter Beleuchtungsstärke: $F=3515.5$, $p<0.001$, $N=3402$, Effektstärke $f=1.02$).

Auch nach dem Nutzereingriff unterscheiden sich die Messwerte der zylindrischen Beleuchtungsstärke signifikant. Nach dem Öffnen liegt der Mittelwert der zylindrischen Beleuchtungsstärke bei 1270 lx, nach dem Schließen bei 1517 lx (ANOVA bei logarithmierter Beleuchtungsstärke: $F=57.2$, $p<0.001$, $N=3405$, Effektstärke $f=0.13$). Die höheren Werte der zylindrischen Beleuchtungsstärke nach dem Schließen des Sonnenschutzes entsprechen den höheren DGP-Werten in dieser Situation.

Für Büroarbeitsplätze gibt die DIN EN 12464-1 „Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsstätten in Innenräumen“ einen Wartungswert der horizontalen Beleuchtungsstärke von 500 lx vor. Die Neufassung der Norm von 2011 fordert zusätzlich im Bereich der Tätigkeit einen Wartungswert der mittleren zylindrischen Beleuchtungsstärke von 50 lx in einer „festzulegenden Höhe“, z. B. 1,20 m für sitzende Personen. Für Büros wird wegen der Relevanz visueller Kommunikation ein Wartungswert von mindestens 150 lx für die zylindrische Beleuchtungsstärke empfohlen.

Die zylindrische Beleuchtungsstärke wurde in Fensternähe gemessen (der durchschnittliche Abstand der Sensoren zum Fenster betrug 0,97 m), während die untersuchten Arbeitsplätze im Mittel 2,26 m von der Fensterfassade entfernt waren. Auch wenn die Werte der zylindrischen Beleuchtungsstärke im Mittel also 1,29 m näher am Fenster gemessen wurden als die Norm vorgibt, legen die Messwerte nach einer Nutzereingriff nahe, dass Nutzer von Büroarbeitsplätzen mit Tageslichtangebot Werte der zylindrischen Beleuchtungsstärke deutlich über dem Mindestwert der Norm bevorzugen.

Die Messwerte der horizontalen Beleuchtungsstärke an den Arbeitsplätzen verhalten sich entsprechend der zylindrischen Beleuchtungsstärke. Auch die horizontale Beleuchtungsstärke unterscheidet sich vor den Nutzereingriffen „Öffnen“ und „Schließen“ um eine Größenordnung, und unterscheidet sich nach den Nutzereingriffen noch statistisch signifikant aber nicht mehr so deutlich. Der Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum

nach dem Schließen des Sonnen- oder Blendschutzes beträgt 1 006 lx, der Mittelwert nach dem Öffnen des Sonnen- oder Blendschutzes beträgt 786 lx. Da nicht bekannt ist, welcher der Arbeitsplätze Anlass für den Nutzereingriff war, kann aus diesen Messwerten nicht direkt abgeleitet werden, welches Beleuchtungsstärkeniveau am Arbeitsplatz gewünscht wurde.

Die horizontale Beleuchtungsstärke an den Arbeitsplätzen nach einem Nutzereingriff ist abhängig von der Jahreszeit (Abbildung 89). Im Frühling wird der Sonnen- und Blendschutz so weit geöffnet, dass der Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum 1 076 lx beträgt, in den übrigen Jahreszeiten ist der Mittelwert der Beleuchtungsstärke signifikant niedriger (Sommer 646 lx, Herbst 830 lx, Winter 735 lx; ANOVA bei logarithmierter Beleuchtungsstärke: $F=40.1$, $p<0.001$, $N=3\,469$, Effektstärke $f=0.19$).

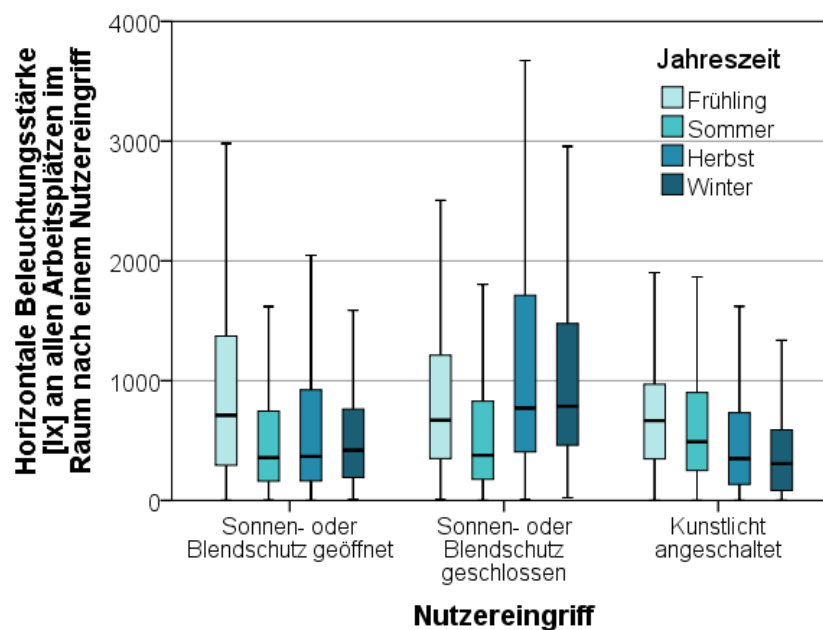


Abbildung 89 Boxplot der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum nach einer Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes durch den Nutzer bzw. nach Einschalten des Kunstlichts in Abhängigkeit von der Art des Eingriffs und der Jahreszeit

Das Schließen des Sonnenschutzes erfolgt im Sommer offensichtlich rigorosere als in den übrigen Jahreszeiten: Der Sonnen- oder Blendschutz wird so weit geschlossen, dass der Mittelwert der horizontalen Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum 654 lx beträgt, in den übrigen Jahreszeiten ist der Mittelwert der Beleuchtungsstärke nach dem Schließen des Sonnen- oder Blendschutzes signifikant höher (Frühling 1 035 lx, Herbst 1 362 lx, Winter 1 260 lx; ANOVA bei logarithmierter Beleuchtungsstärke: $F=110.9$, $p<0.001$, $N=3\,360$, Effektstärke $f=0.31$). Das deckt sich mit den Angaben der Nutzer, den Sonnenschutz im Sommer als Schutz vor Wärme einzusetzen. Auch der Frühling unterscheidet sich signifikant von den übrigen Jahreszeiten.

Abbildung 90 zeigt, dass der Anteil des Fensters, der während des Tages (6:00 Uhr bis 19:00 Uhr) durchschnittlich vom Sonnenschutz verdeckt wird, im Sommer mit 26,4 % höher ist als im Frühling (16,3 %), Herbst (15,2 %) oder Winter (11,2 %). Der Sommer unterscheidet sich signifikant von den anderen Jahreszeiten (ANOVA $F=15.1$, $p<0.001$, $N=505$, Effektstärke $f=0.30$). Die Position des Blendschutzes ist in den verschiedenen Jahreszeiten weniger unterschiedlich, die Unterschiede sind nicht signifikant.

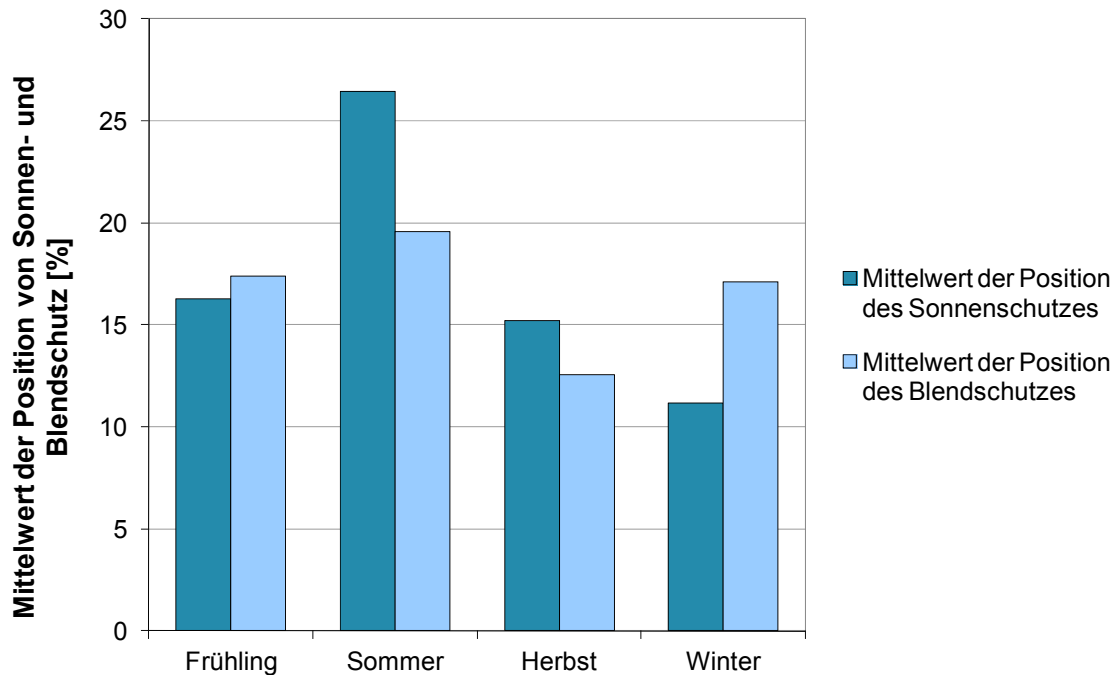


Abbildung 90 Anteil der Fensterfläche, die durchschnittlich während des Arbeitstages vom Sonnen- oder Blendschutz verdeckt wird, getrennt nach Sonnen- und Blendschutz, in Abhängigkeit von der Jahreszeit

Im Sommer wird der Sonnenschutz stärker genutzt als der Blendschutz. Das ist auch für den thermischen Komfort von Vorteil. Umgekehrt wird im Winter der (innenliegende) Blendschutz stärker genutzt, der die Blendwirkung reduziert und gleichzeitig die Nutzung solarer Wärmeinträge ermöglicht. Im Frühling und Sommer sind die Unterschiede zwischen Sonnen- und Blendschutz nicht signifikant.

Zusammenfassung Nutzereingriffe Sonnen- und Blendschutz

Der Sonnen- und Blendschutz wird von den Nutzern vor allem zum Schutz vor Blendung und zur Anpassung der Helligkeit eingesetzt. Der Zeitpunkt, zu dem der Sonnenschutz geschlossen wird, unterscheidet sich je nach Orientierung des Fensters und folgt dem Sonnenlauf.

Die Werte der Daylight Glare Probability vor dem Schließen der Lamellen liegen überwiegend in einer Größenordnung, bei der Blendung zu erwarten ist. Der mit Hilfe des Nutzereingriffs „gewählte“ DGP-Wert liegt im Mittel bei 0,26. Die DGP-Werte nach dem Schließen des Sonnenschutzes sind dabei – bei großer Streuung der Messwerte – signifikant höher als die Werte nach dem Öffnen des Sonnenschutzes.

Der Umgang der Nutzer mit dem Sonnen- oder Blendschutz unterscheidet sich je nach Jahreszeit. Wie schon beim Umgang mit dem Kunstlicht zeigt sich auch hier, dass Nutzer im Frühling höhere Beleuchtungsstärken bevorzugen – der Sonnenschutz wird weiter geöffnet als in den übrigen Jahreszeiten.

Im Sommer wird der Sonnenschutz den Nutzerangaben zufolge auch zum Schutz vor unerwünschten Wärmeeinträgen verwendet. Dem entspricht der rigorosere Umgang der Nutzer mit dem Sonnenschutz, der im Sommer weiter geschlossen wird als in den anderen Jahreszeiten.

5.4 Auswertung der Messung des Tageslichtquotienten und des Lichtspektrums

Wie im Abschnitt „4.5.1 Messung des Lichtspektrums und des Tageslichtquotienten“ erwähnt, wurde aus den Messungen des Lichtspektrums an den untersuchten Arbeitsplätzen auch der Tageslichtquotient als Kennwert der Tageslichtversorgung ermittelt, auf den im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

5.4.1 Tageslichtquotient an den Arbeitsplätzen

Die Messung des Tageslichtquotienten wird von der Leuchtdichteverteilung des Himmels stark beeinflusst, die während der Messungen nicht kontrolliert werden konnte. Daher sind diese Messungen nur als orientierend mit eingeschränkter Genauigkeit zu betrachten und werden deshalb auch nicht detailliert ausgewertet.

Tabelle 12 zeigt die Mittelwerte aller im jeweiligen Gebäude bzw. Gebäudeteil gemessenen Tageslichtquotienten sowie die Nutzerbewertung der Tageslichtversorgung und den Fensterflächenanteil der entsprechenden Räume.

Gebäude mit Baujahr	Tageslichtquotient am Arbeitsplatz [%] Mittelwert	Nutzerbewertung der Beleuchtung des Arbeitsplatzes mit Tageslicht	Anteil Fensterfläche an der Nettofassade [%]
LBBW MA, Erweiterungsbau (1980er)	0,90	2,83	59,6
Universität KA (1836)	1,56	2,56	34,6
LBBW MA, Altbau (1911)	1,59	2,96	41,1
UBA DE, Räume zum Atrium (2005)	1,70	2,65	71,3
UBA DE, außenliegende Räume (2005)	1,80	2,93	34,7
ISE FR (2001)	2,13	2,82	56,7
Braun HG, Räume zum Atrium (2000)	2,45	3,08	100,0
LBBW KA, Lochfassade (2007)	2,66	2,80	43,8
SIC FR (2003)	3,48	3,03	51,4
Braun HG, außenliegende Räume (2000)	3,88	3,26	100,0
LBBW KA, Bandfassade (2007)	4,02	3,31	71,2
DB Netz AG, KA (1997)	4,45	3,10	67,9
LBBW S (2004)	5,40	3,25	100,0
Mittelwert	2,90	2,94	63,7

Tabelle 12 Mittelwerte des Tageslichtquotienten, der Nutzerbewertung der Beleuchtung („zu dunkel“=1 ... „zu hell“=5) und des Fensterflächenanteils der untersuchten Gebäude bzw. Gebäudeteile, sortiert nach Tageslichtquotient

Die gemessenen Tageslichtquotienten sind in den jeweiligen Gebäuden bzw. Gebäudeteilen sehr unterschiedlich, die Unterschiede sind statistisch signifikant (ANOVA: $F=15.2$, $p<0.001$, $N=370$, Effektstärke $f=0.71$).

Der gemessene Tageslichtquotient am Arbeitsplatz korreliert mit der Nutzerbewertung der Beleuchtung des Arbeitsplatzes durch Tageslicht (Frage 16 bei „zu dunkel“=1 ... „zu hell“=5; Pearson's $r=0.22$, $p<0.001$, $N=821$).

Auffallend ist das Gebäude des Umweltbundesamtes in Dessau. Hier unterscheidet sich der Tageslichtquotient kaum zwischen außenliegenden Räumen ($D=1,8$) und Räumen, die zum Atrium orientiert sind ($D=1,7$). Die Verluste, die das Dach des Atriums mit sich bringt, werden durch größere Fensterflächenanteile der Räume zum Atrium ausgeglichen. Der deutliche Unterschied bei der Nutzerbewertung der Helligkeit ist aufgrund dieser Messwerte nicht zu erwarten. An sonnigen Tagen kann sich die Tageslichtversorgung dieser Räume allerdings stärker unterscheiden, als es der bei bedecktem Himmel gemessene Tageslichtquotient nahe legt: Der Sonnenschutz der außenliegenden Räume kann den Nutzerwünschen entsprechend individuell angepasst werden, während der Sonnenschutz des Atriumdachs von den Nutzern nicht beeinflusst werden kann und die angrenzenden Räume u.U. stärker verdunkelt als von manchen Nutzern gewünscht.

Eine Bestätigung der Hypothese, dass die Architektur (in diesem Fall das Atrium) die Helligkeitsbewertung und damit den visuellen Komfort signifikant beeinflusst, ist auf Basis dieses einen Gebäudes nicht möglich.

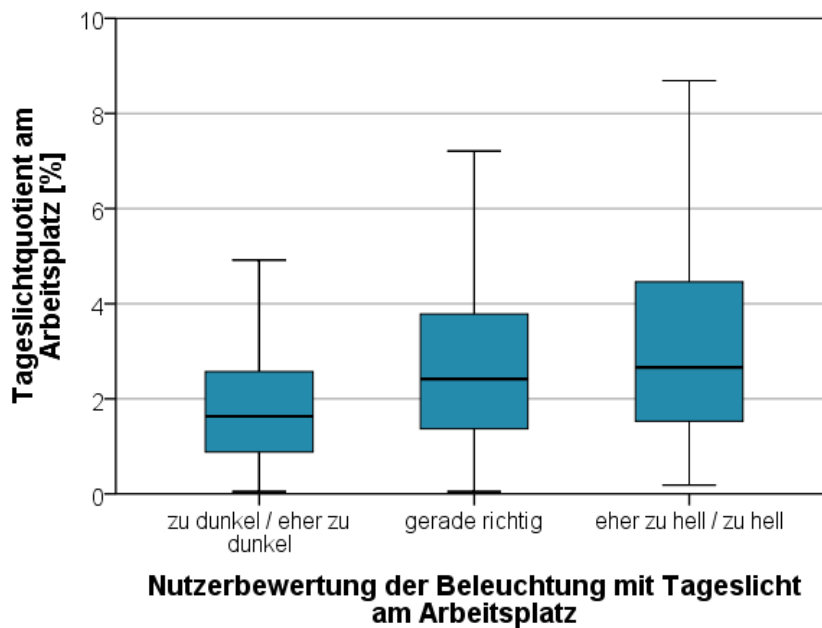


Abbildung 91 Boxplot der Tageslichtquotienten an den untersuchten Arbeitsplätzen über der Nutzerbewertung der Beleuchtung mit Tageslicht am Arbeitsplatz

Die Bandbreite der gemessenen Tageslichtquotienten an Arbeitsplätzen, die von ihren Nutzern als „gerade richtig“ mit Tageslicht versorgt bewertet werden, ist groß. Der Medianwert des Tageslichtquotienten liegt an diesen Arbeitsplätzen bei 2,4 % (siehe Abbildung 91).

Die Tageslichtquotienten der Arbeitsplätze können nicht direkt mit der Empfehlung der DIN 5034-1:2011-07 für den Tageslichtquotienten in Raummitte verglichen werden. Die untersuchten Arbeitsplätze sind in der Regel näher an der Fensterfassade als der Referenzpunkt der Norm.

5.4.2 Lichtspektrum an den Arbeitsplätzen

Als ein – neben der Beleuchtungsstärke – wichtiger Aspekt der biologischen Wirksamkeit wurde die spektrale Zusammensetzung des Tages- und Kunstlichts in den Gebäuden untersucht. Das Augenmerk lag darauf, ob und gegebenenfalls wie sich die Lichtspektren in den Gebäuden unterscheiden und wie sich die Tageslichtspektren innen vom Tageslichtangebot außen unterscheiden. Der Einfluss der an den Arbeitsplätzen vorhandenen Sonnen- und Blendschutzsysteme auf das Lichtspektrum wurde ebenfalls untersucht.

Für jeden Arbeitsplatz wurde ermittelt, welcher Anteil der außen vorhandenen sichtbaren Strahlung am Arbeitsplatz zur Verfügung steht (entsprechend dem Tageslichtquotienten). Dieser Anteil der Bestrahlungsstärke wurde für Wellenlängen von 380 nm bis 780 nm ermittelt (Messintervall 1 nm).

Um Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung des Lichts einfach erkennen zu können, wird nicht der Transmissionsgrad der verschiedenen Wellenlängen angegeben. Stattdessen wurde der Außenbestrahlungsstärkeanteil jeder Wellenlänge ins Verhältnis zum Mittelwert aller Außenbestrahlungsstärkeanteile dieser Messung von 380 bis 780 nm gesetzt.

$$D_{e,\lambda} = \frac{E_{e,\lambda \text{ innen}}}{E_{e,\lambda \text{ außen}}} \left/ \left(\frac{1}{401} * \sum_{i=380}^{780} \frac{E_{e,\lambda_i \text{ innen}}}{E_{e,\lambda_i \text{ außen}}} \right) \right. \quad (7)$$

mit	$D_{e,\lambda}$	normierter spektraler Bestrahlungsstärkequotient für $\lambda=380$ nm bis 780 nm, Wellenlängenintervall $\Delta\lambda=1$ nm
	$E_{e,\lambda \text{ innen}}$	spektrale Bestrahlungsstärke innen [W/(m ² *nm)]
	$E_{e,\lambda \text{ außen}}$	spektrale Bestrahlungsstärke außen [W/(m ² *nm)]

Der Einfluss des Tageslichtquotienten bzw. des Tageslichtanteils bei eingesetztem Sonnen- oder Blendschutzsystem ist damit eliminiert, die Leuchtdichteverteilung des Himmels ist weniger relevant. Man erhält eine Aussage, wie sehr eine Wellenlänge im Vergleich zu den übrigen Wellenlängen zum Angebot an Strahlung im sichtbaren Bereich beiträgt, einen „normierten spektralen Bestrahlungsstärkequotienten“. Würde die spektrale Zusammensetzung an einem Arbeitsplatz genau der spektralen Zusammensetzung außen entsprechen – wenn auch bei geringerer Leistung – so läge der normierte Wert für alle Wellenlängen bei 1 (100 %).

Eine visuelle Bewertung entsprechend $V(\lambda)$ wurde bei dieser Betrachtung nicht vorgenommen.

Abbildung 92 zeigt den normierten spektralen Bestrahlungsstärkequotienten als Mittelwert der Gebäude bzw. Gebäudeteile bei Beleuchtung durch Tageslicht ohne Sonnen- oder Blendschutz. Deutlich zu sehen sind die Unterschiede, die zwischen den Gebäuden bestehen. Bei den Altbauten (Baujahr 1836, 1911, 1980er) verläuft der Wert zwischen 420 nm und 700 nm nahe 1, alle Wellenlängen in diesem Wertebereich gelangen also in ähnlichem Maß zum Messpunkt im Gebäude.

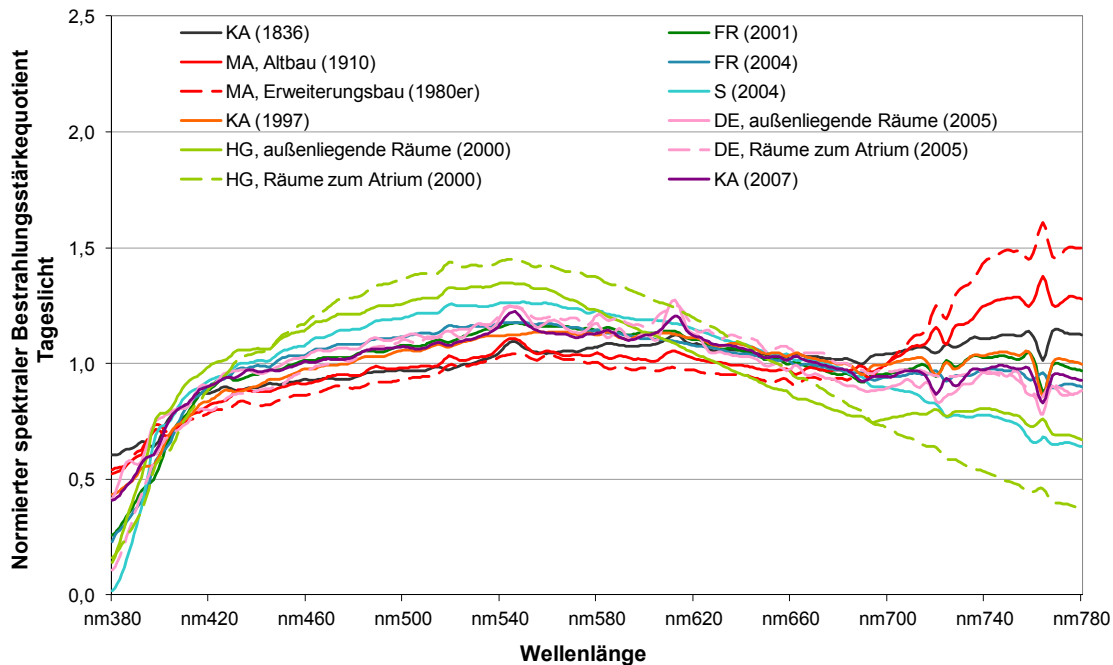


Abbildung 92 Normierter spektraler Bestrahlungsstärkequotient von 380 nm bis 780 nm an den untersuchten Arbeitsplätzen als Mittelwert der Gebäude bzw. Gebäudeteile bei Beleuchtung mit Tageslicht

Das Verwaltungsgebäude der Braun GmbH (Räume am Atrium mit Folienkissen-Dach, gestrichelte Linie) weist eine deutlich ungleichmäßigere Verteilung auf. Die Wellenlängen zwischen 460 nm und 620 nm sind mit bis zu 1,45 überrepräsentiert, während von den Wellenlängen zwischen 660 nm und 780 nm ein geringerer Anteil ins Gebäude gelangt. Beim gleichen Gebäude wurden auch außenliegende Räume untersucht (durchgezogene Linie). Hier sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Wellenlängenbereichen weniger groß. Das Folienkissendach des Atriums beeinflusst demzufolge das Tageslichtspektrum der am Atrium liegenden Räume.

Im Bereich über 700 nm zeigen sich ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Gebäuden. Im Erweiterungsbau und Altbau der LBBW Mannheim gelangen diese Wellenlängen in einem vergleichsweise großen Anteil zu den untersuchten Arbeitsplätzen, in den beiden Gebäuden mit Ganzglasfassade sind sie unterrepräsentiert. Im Gebäude der Braun GmbH wurde Sonnenschutzglas eingebaut, im Gebäude der LBBW Stuttgart eine Doppelfassade mit einer Dreifachwärmeschutzverglasung.

Die folgende Abbildung 93 zeigt, wie sich der Einsatz des Sonnenschutzsystems auf die spektrale Zusammensetzung des Lichts am Arbeitsplatz auswirkt. In den meisten Gebäuden führt die Verwendung des Sonnenschutzes nicht zu einer gravierenden Veränderung der spektralen Zusammensetzung des Lichts.

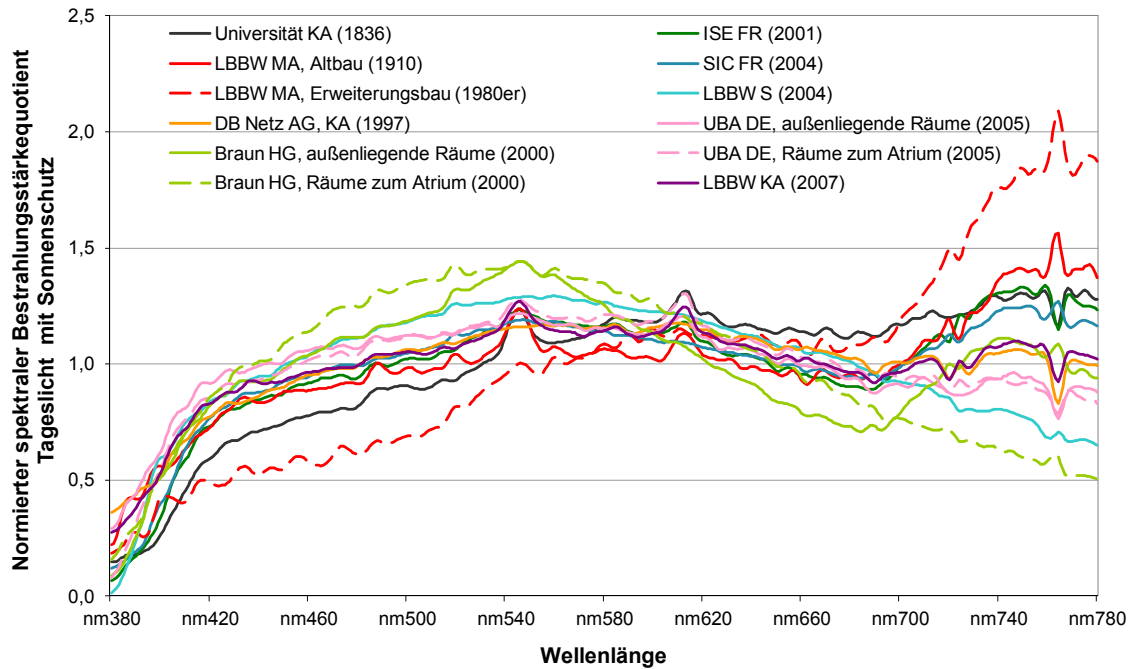


Abbildung 93 Normierter spektraler Bestrahlungsstärkequotient von 380 nm bis 780 nm an den Arbeitsplätzen als Mittelwert der Gebäude bzw. Gebäudeteile bei Beleuchtung mit Tageslicht, mit Sonnenschutz

Größere Unterschiede gibt es bei den Altbauten (1980er, 1836), wo die Wellenlängen zwischen 380 nm und 540 nm in der Situation mit Sonnenschutz teilweise deutlich reduziert werden. Bei dem Erweiterungsbau der LBBW Mannheim aus den 1980er Jahren und beim Verwaltungsgebäude der Braun GmbH (außenliegende Räume) gelangen die Wellenlängen zwischen 700 nm und 780 nm relativ häufiger ins Gebäude als in der Situation ohne Sonnenschutz. Da der außenliegende Sonnenschutz vor unerwünschter Wärmestrahlung im Sommer schützen soll, wäre eine besonders niedrige Transmission im IR-Bereich über 780 nm wünschenswert, dieser Spektralbereich wurde in dieser Untersuchung nicht gemessen.

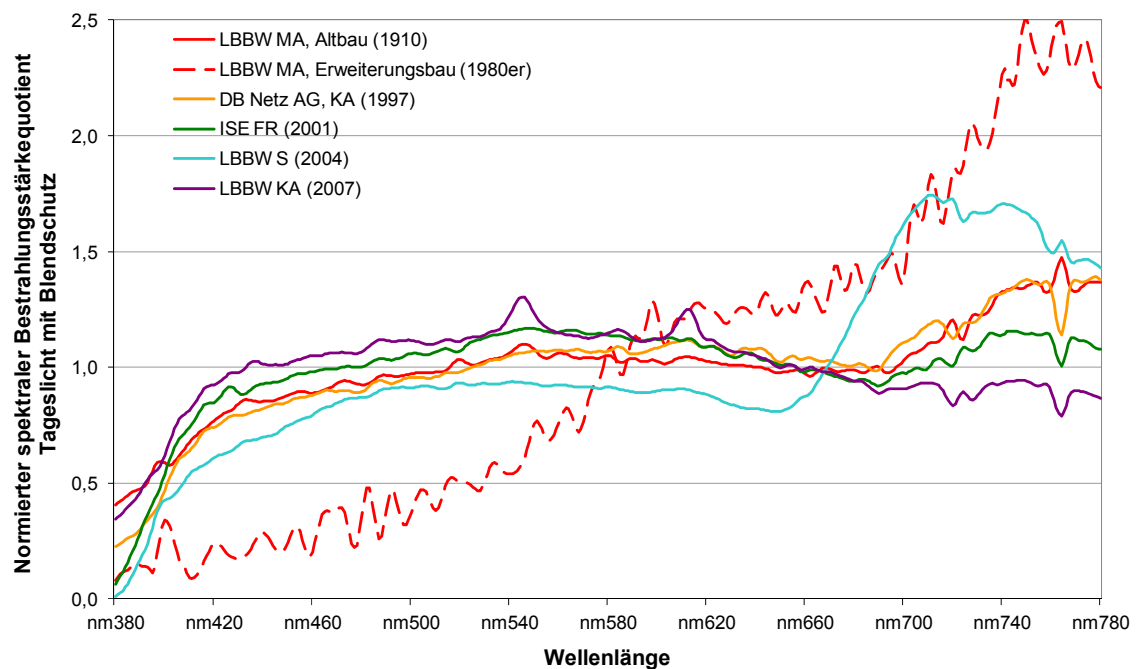


Abbildung 94 Normierter spektraler Bestrahlungsstärkequotient von 380 nm bis 780 nm an den Arbeitsplätzen als Mittelwert der Gebäude bzw. Gebäudeteile bei Beleuchtung mit Tageslicht, mit Blendschutz

Beim Blendschutz (Abbildung 94) fällt wieder der Erweiterungsbau der LBBW Mannheim auf, wo kurzwelliges Licht in deutlich geringerem Maß in das Gebäude gelangt als langwelliges. Das Hochhaus der LBBW Stuttgart zeigt mit Blendschutz eine relativ gleichmäßige Verteilung des Lichts auf die Wellenlängen zwischen 460 nm und 660 nm. Bei ca. 660 nm steigt der Anteil der Wellenlängen steil an, Wellenlängen zwischen 700 nm und 780 nm tragen überproportional zum Strahlungsangebot an den Arbeitsplätzen bei.

Wie sehr sich die spektrale Zusammensetzung des Lichts bei Einsatz des Blendschutzes ändert, zeigt auch der Vergleich der verschiedenen Situationen in diesem Gebäude (Abbildung 95). Ergänzend ist die spektrale Verteilung des aus den Messwerten errechneten Kunstlichtanteils angegeben. Man sieht in allen Gebäuden die für Leuchtstoffröhren typische spektrale Verteilung.

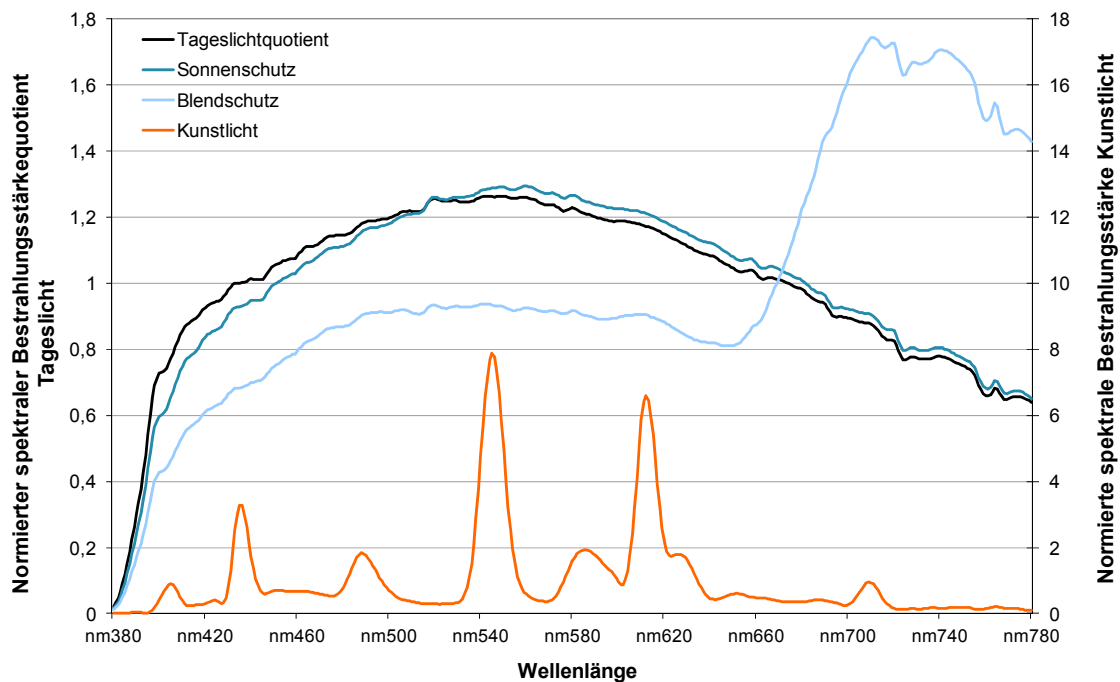


Abbildung 95 Normierter spektraler Bestrahlungsstärkequotient von 380 nm bis 780 nm als Mittelwert der untersuchten Arbeitsplätze im Gebäude LBBW Stuttgart für verschiedene Beleuchtungssituationen

Ebenso bemerkenswert ist das Gebäude des Umweltbundesamtes in Dessau (Abbildung 96). Hier unterscheidet sich schon der Tageslichtquotient kaum zwischen außenliegenden Räumen ($D=1,8$) und Räumen, die zum Atrium orientiert sind ($D=1,7$). Auch die spektrale Zusammensetzung des Lichts unterscheidet sich dieser Messung zufolge zwischen außenliegenden Räumen und Räumen am Atrium über weite Bereiche des Spektrums nicht deutlich. Der Einsatz der Jalousien beeinflusst weder bei außenliegenden Räumen noch bei Räumen zum Atrium die spektrale Verteilung des Lichts.

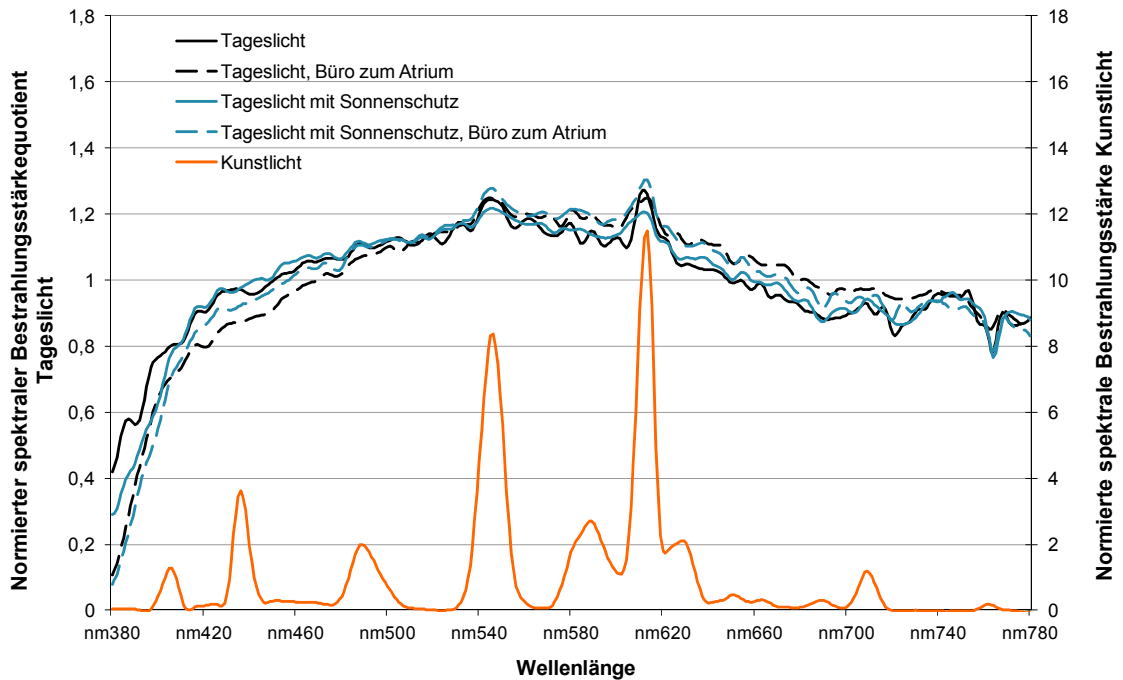


Abbildung 96 Normierter spektraler Bestrahlungsstärkequotient von 380 nm bis 780 nm als Mittelwert der untersuchten Arbeitsplätze im Gebäude UBA Dessau für verschiedene Beleuchtungssituationen

Beim Gebäude der LBBW Mannheim zeigt sich auch im Vergleich der verschiedenen Situationen im Gebäude vor allem im Erweiterungsbau die starke Beeinflussung des Spektrums durch den Sonnen- und noch stärker durch den Blendschutz (Abbildung 97).

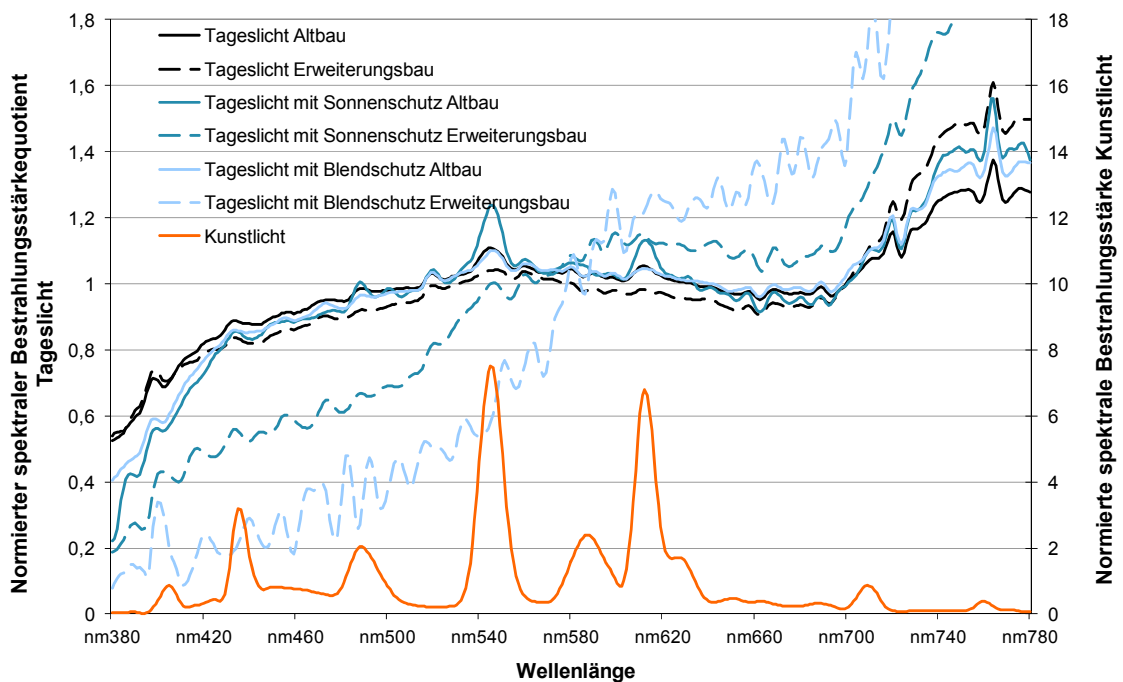


Abbildung 97 Normierter spektraler Bestrahlungsstärkequotient von 380 nm bis 780 nm als Mittelwert der untersuchten Arbeitsplätze im Gebäude LBBW Mannheim für verschiedene Beleuchtungssituationen

Mit Hilfe des circadianen Wirkfaktors a_{cv} können die qualitativen Aussagen der Diagramme zur spektralen Verteilung des Lichts quantifiziert werden. Der a_{cv} -Wert außen lag bei allen Messungen zwischen 0,825 und 1,593, im Mittel bei 0,930.

Tabelle 13 zeigt das Verhältnis von a_{cv} -Wert innen zu a_{cv} -Wert außen, der hier mit „ s_{ak} -Quotient“ bezeichnet wird. Dieser Wert zeigt, in welchem Maße ein System (Verglasung, Sonnen-/Blendschutz, Oberflächenmaterialien und Reflexionsgrade) die Wellenlängen zu den Arbeitsplätzen gelangen lässt, die (zumindest vorläufig) als aktivierend betrachtet werden. Ein Quotient von 100 % bedeutet, dass die spektrale Zusammensetzung des Lichts im Gebäude ebenso aktivierend wirkt wie die spektrale Zusammensetzung des Tageslichts außen. Die für die aktivierende Wirkung ebenfalls relevante Intensität des Lichtes wird dabei außer Acht gelassen. Die Gebäude sind nach Baujahr sortiert.

Gebäude mit Baujahr	a_{cv} Innen / a_{cv} Außen [%]	a_{cv} Innen mit Sonnenschutz / a_{cv} Außen [%]	a_{cv} Innen mit Blendschutz / a_{cv} Außen [%]
Universität KA (1836)	90,0	73,8	
LBBW MA, Altbau (1911)	90,5	86,3	88,4
LBBW MA, Erweiterungsbau (1980er)	89,2	64,4	41,1
DB Netz AG, KA (1997)	88,7	85,1	85,1
Braun HG, Räume zum Atrium (2000)	88,7	88,1	
Braun HG, außenliegende Räume (2000)	94,0	85,3	
ISE FR (2001)	89,9	82,4	88,4
SIC FR (2003)	90,0	84,6	
LBBW S (2004)	90,8	86,2	88,8
UBA DE, Räume zum Atrium (2005)	84,8	86,1	
UBA DE, außenliegende Räume (2005)	91,1	91,8	
LBBW KA (2007)	90,5	86,6	92,0
Mittelwert	89,8	83,2	87,0

Tabelle 13 Verhältnis von a_{cv} -Wert innen zu a_{cv} -Wert außen (s_{ak} -Quotient) für verschiedene Belichtungssituationen als Mittelwert der untersuchten Gebäude bzw. Gebäudeteile, sortiert nach dem Baujahr der Gebäude

Der gemessene a_{cv} -Wert im Gebäude ohne Verwendung von Sonnen- oder Blendschutzsystemen beträgt durchschnittlich 90 % des a_{cv} -Wertes außen. Der Anteil kurzwelligen Lichts, der an den Arbeitsplätzen ankommt, ist – wie auch in den Diagrammen zu sehen ist – etwas geringer als der Anteil der anderen Wellenlängen. Die Gebäude unterscheiden sich signifikant (ANOVA: $F=4,0$, $p<0,001$, $N=368$, Effektstärke $f=0,37$).

Den mit 84,8 % niedrigsten Quotienten weisen die zum Atrium orientierten Räume des Umweltbundesamtes in Dessau auf, während der Quotient der nach außen orientierten Räume bei 91,1 % liegt. Auch die zum Atrium orientierten Räume der Braun GmbH weisen mit 88,7 % einen geringeren Quotienten auf als die nach außen orientierten Räume dieses Gebäudes (94,0 %).

Deutlich größeren Einfluss zeigt jedoch die Wahl des Sonnen- und Blendschutzsystems. Auch hier bestehen signifikante Unterschiede zwischen den Gebäuden bzw. Gebäudeteilen (ANOVA Sonnenschutz: $F=33.3$, $p<0.001$, $N=300$, Effektstärke $f=1.18$; Blendschutz $F=164.3$, $p<0.001$, $N=122$, Effektstärke $f=2.94$).

Der Erweiterungsbau der LBBW Mannheim aus den 1980er Jahren weist hier mit 64,4 % bzw. 41,1 % die niedrigsten Quotienten auf.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Wahl der Verglasung und des Sonnen- oder Blendschutzsystems die spektrale Zusammensetzung des Tageslichts am Arbeitsplatz stark beeinflussen kann, und dass sich das Spektrum im Gebäude zum Teil deutlich vom natürlichen Tageslichtspektrum außen unterscheidet.

Die Spektren des Kunstlichts wurden nicht detailliert analysiert. In allen Gebäuden wurden für die Grundbeleuchtung Leuchtstofflampen eingesetzt, deren Lichtfarben nicht extrem waren (vermutlich überwiegend neutralweiß, keine Farbtemperatur von 6000 K oder mehr).

Mit Hilfe dieser Spektroradiometer-Messungen sollte die Hypothese überprüft werden, dass die spektrale Zusammensetzung des Lichts am Arbeitsplatz (über das circadiane System) die Gesundheit der Nutzer und ihr allgemeines Wohlbefinden beeinflusst.

Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem s_{ak} -Quotienten des Arbeitsplatzes und dem momentanen Befinden der Nutzer (Frage 1) oder den Angaben zu gesundheitlichen Beschwerden (Frage 54) besteht für die vorliegende Untersuchung nicht.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Anwesenheit der Nutzer am Arbeitsplatz nicht aufgezeichnet wurde. Wie häufig und wie lange sich die Nutzer tatsächlich an ihrem Arbeitsplatz aufgehalten haben und welchen Beleuchtungsstärken und Spektren sie während der übrigen Zeit ausgesetzt waren, ist unbekannt. Gleichzeitig sind die Unterschiede zwischen den Gebäuden nicht sehr groß, sofern kein Sonnen- oder Blendschutz eingesetzt wird. Ein Zusammenhang zwischen dem (gesundheitlichen) Befinden der Nutzer und dem s_{ak} -Quotienten des Arbeitsplatzes ist unter diesen Umständen nicht zu erwarten.

Die Hypothese kann somit nicht bestätigt werden, was jedoch in der Datenlage begründet sein kann.

Trotz der geringen Unterschiede zwischen den Gebäuden zeigt sich in der vorliegenden Stichprobe ein schwacher aber signifikanter Zusammenhang zwischen der Nutzerbewertung der Tageslichtversorgung und dem Grad der Veränderung des Lichtspektrums durch Verglasung und Sonnen-/Blendschutz.

Die Nutzerbewertung der Beleuchtung des Arbeitsplatzes mit Tageslicht korreliert schwach mit dem s_{ak} -Quotienten für die Situation *ohne* Sonnen- oder Blendschutz (Frage 16 bei „zu dunkel“=1 ... „zu hell“=5; *Pearson's* $r=0.14$, $p<0.001$, $N=816$). Die Nutzerbewertung der Beleuchtung des Arbeitsplatzes durch Tageslicht *mit* Verschattung korreliert mit dem s_{ak} -Quotienten für die Situation mit Sonnenschutz (Frage 23 bei „sehr schlecht“=1 ... „sehr gut“=5; *Pearson's* $r=0.23$, $p<0.001$, $N=608$).

Zwischen dieser Nutzerbewertung und dem Quotienten für die Situation mit Blendschutz besteht kein signifikanter Zusammenhang (*Pearson's* $r=0.09$, $p=0.171$, $N=241$).

Messungen mit RGB-Sensoren

Mit RGB-Sensoren wurden an einem der Arbeitsplätze in jedem Raum die spektralen Anteile des Lichts im Rot-, Grün- und Blaubereich aufgezeichnet. Diese Messung kann nur als orientierende Messung interpretiert werden. Im Folgenden werden die Messwerte der RGB-Sensoren mit den Ergebnissen der Spektroradiometer-Messungen verglichen. Dafür wurde der Anteil des Blauwertes an der Summe des Rot-, Grün- und Blauwertes ermittelt.

In den Situationen, in denen das Kunstlicht ausgeschaltet ist und Sonnen- und Blendschutz offen sind, korreliert der Blauanteil, der mit den RGB-Sensoren gemessen wurde, schwach mit dem s_{ak} -Quotienten (Mittelwert Blauanteil=0.18; *Pearson's r*=0.06, $p<0.001$, $N=359\,702$).

In den Situationen, in denen der Sonnenschutz mindestens 50 % geschlossen ist, korreliert der mit den RGB-Sensoren gemessene Blauanteil stärker mit dem entsprechenden s_{ak} -Quotienten (Mittelwert Blauanteil=0.17; *Pearson's r*=0.20, $p<0.001$, $N=60\,467$).

Situationen, in denen der Blendschutz mindestens 50 % geschlossen ist, der Sonnenschutz aber offen ist, treten nur selten auf und werden hier nicht ausgewertet.

Die relativ schwachen Korrelationen von Blauanteil der RGB-Sensoren und s_{ak} -Quotienten bestätigen, dass die Messungen der Lichtfarbe mit den RGB-Sensoren nur als orientierende Messungen betrachtet werden können.

Für die Messwerte der RGB-Sensoren wurden statistische Kennwerte (Mittelwert, Medianwert, Quartile) bezogen auf die übliche Arbeitszeit der Nutzer ermittelt. Diese Kennwerte der RGB-Sensoren korrelieren mit den s_{ak} -Quotienten der Situation ohne Sonnen- oder Blendschutz. Alle Korrelationen sind schwach aber signifikant, die Kennwerte des Blausensors korrelieren am stärksten (rot: *Pearson's r*>0.14, $p<0.001$, $N=764$; grün: *Pearson's r*>0.16, $p<0.001$, $N=832$; blau: *Pearson's r*>0.18, $p<0.001$, $N=832$).

An den Arbeitsplätzen mit höheren s_{ak} -Quotienten wurden also auch höhere Blau-Werte mit den RGB-Sensoren erfasst, wobei auch diese Unterschiede nicht groß sind.

Zusammenfassung Lichtspektrum

In dieser Felduntersuchung lässt sich bei relativ geringen Unterschieden zwischen den Gebäuden und in Unkenntnis der Einflüsse außerhalb des Büroraums kein Einfluss des Lichtspektrums im Büroraum auf das Befinden oder die Gesundheit der Nutzer nachweisen. Zwischen Lichtspektrum und Nutzerbewertung der Helligkeit bzw. Zufriedenheit der Nutzer mit der Tageslichtversorgung mit Sonnenschutz konnte ein Zusammenhang nachgewiesen werden: Je weniger Verglasung und Sonnenschutz die spektrale Zusammensetzung des Lichtes verändern, desto positiver wird die Tageslichtversorgung mit Sonnenschutz bewertet.

6 Diskussion

Im Folgenden werden die gewonnenen Ergebnisse anhand der untersuchten Hypothesen zusammengefasst und im Vergleich mit Ergebnissen anderer Studien diskutiert. Neben den untersuchten Parametern wurden weitere Faktoren identifiziert, welche die Nutzerbewertung des visuellen Komforts oder die Wünsche der Nutzer hinsichtlich der Belichtung und Beleuchtung unter Alltagsbedingungen in der vorliegenden Stichprobe signifikant beeinflusst haben – diese werden ebenfalls genannt.

6.1 Auswertung der Nutzerbefragung

Zunächst wurden den Nutzerbewertungen aus den Fragebögen die Messwerte zugeordnet, die zum Zeitpunkt der Befragung am jeweiligen Arbeitsplatz aufgezeichnet wurden. Die Auswertung dieser Daten zeigt, welche Bedingungen als komfortabel empfunden werden und welche Faktoren die Bewertung beeinflussen. Sie dient der Überprüfung der Hypothesen 1 und 2.

Die befragten Nutzer bewerteten die Beleuchtung ihres Arbeitsplatzes überwiegend positiv. Die Beleuchtung mit Tageslicht und vorhandener Verschattung wurde von 54 % der Nutzer als „eher gut“ oder „sehr gut“ beurteilt, die Beleuchtung mit Kunstlicht von 55 % der Nutzer. Beide Bewertungen sind miteinander korreliert.

Hypothese 1: Die Nutzerbewertung der Helligkeit ist abhängig von der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz. Die präferierte Beleuchtungsstärke wird vom Alter der Nutzer, der Jahreszeit und der Nutzerbewertung des Ausblicks beeinflusst.

Diese Hypothese wird durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigt.

Die Nutzerbewertung der Helligkeit weist allerdings nur einen geringen Zusammenhang mit der horizontalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz auf.

Die Beleuchtungsstärke kann nicht direkt wahrgenommen werden. Da sie sehr viel einfacher zu messen ist als die von den Probanden wahrnehmbare Leuchtdichte der Oberflächen im Raum, wurde wie in vielen der zitierten Untersuchungen die Beleuchtungsstärke als Maß für die „Helligkeit“ gewählt.

Die Einflüsse der Reflexionseigenschaften der Oberflächen und des Blickwinkels des Betrachters auf die Helligkeit, die „subjektiv empfundene Leuchtdichte“ (DIN 5034-1:2011-07, S. 6), werden dabei ignoriert. Die Wände der untersuchten Büroräume waren fast ausnahmslos weiß gestrichen, die Decken in allen Fällen hell gestrichen und die Möbel bestanden in der Regel aus hellem Holz oder waren mit hellen Holzdekoren/-furnieren oder hellgrauen Kunststoffen beschichtet. Die Probanden saßen beim Ausfüllen der Fragebögen an ihren Arbeitsplätzen. Es wird daher davon ausgegangen, dass für die Probanden bei vergleichbarem Beleuchtungsstärkeniveau auch vergleichbare Leuchtdichten der Oberflächen aufgetreten sind. Der Einfluss der Lichtrichtung auf die Oberflächenleuchtdichte bleibt dabei unberücksichtigt.

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

Bei 67 % der Befragungen gaben die Nutzer an, keine Änderung der Helligkeit zu wünschen. Die Beleuchtungsstärke, bei der ein solches Nutzerurteil abgegeben wurde, wurde als dem Nutzerwunsch entsprechend angenommen und als die vom jeweiligen Nutzer präferierte

Beleuchtungsstärke interpretiert. Dieses präferierte Beleuchtungsstärkeniveau weist ebenfalls eine sehr große individuelle Streuung auf und entspricht in seiner Größenordnung den Ergebnissen von Begemann et al. (1997).

Die präferierte Beleuchtungsstärke wurde der Hypothese entsprechend vom Alter der Nutzer beeinflusst: Bei Nutzern unter 30 Jahren lag sie im Mittel bei 1168 lx, bei Nutzern über 50 Jahren im Mittel bei 834 lx.

Ein Einfluss des Alters der Nutzer ist – wie im Abschnitt „2.2.3 Alterseinfluss“ dargestellt – aufgrund des mit dem Alter zunehmenden Lichtbedarfs und wegen der zunehmenden Blendempfindlichkeit zu erwarten. Aus diesen beiden Veränderungen folgt, dass mit zunehmendem Alter prinzipiell mehr Licht bei gleichzeitig besserer Entblendung bzw. besserem Blendschutz benötigt wird. An den untersuchten Arbeitsplätzen bevorzugten ältere Nutzer niedrigere Beleuchtungsstärken, der Alterseinfluss auf die bevorzugte zylindrische Beleuchtungsstärke war stärker als auf die bevorzugte horizontale Beleuchtungsstärke.

Dieser Wunsch der älteren Nutzer nach einem niedrigeren Niveau der Beleuchtungsstärke – insbesondere der zylindrischen Beleuchtungsstärke – deutet darauf hin, dass während der überwiegend vormittags (und damit bei seitlichem Tageslichteintrag) stattfindenden Befragungen die mit dem Alter zunehmende Blendempfindlichkeit den zunehmenden Lichtbedarf dominierte. Wenn man in Betracht zieht, dass die Nutzer nach eigenen Angaben an ihrem Arbeitsplatz zu 2/3 der Arbeitszeit mit Bildschirmarbeit beschäftigt sind, ist dieses Ergebnis nachvollziehbar. Eine hohe vertikale Beleuchtungsstärke am Monitor – z. B. durch seitlich einfallendes Licht – führt auch bei gut entspiegelten Monitoren zu einer (geringen) Zeichenkontrast-Reduktion durch die Leuchtdichte der Reflexion dieses Lichts (Kokoschka, 1989), welche die Erkennbarkeit der Bildschirminhalte (Zeichen) erschweren kann. Die Sehaufgabe „Erkennen von Bildschirmhalten“ wird also im Gegensatz zum Lesen eines gedruckten Textes durch einen höheren Tageslichteintrag nicht erleichtert.

Dies verdeutlicht, wie relevant der Sonnen- bzw. Blendschutz gerade für ältere Nutzer von Bildschirmarbeitsplätzen ist.

Der von Seidl (1978) vermutete jahreszeitliche Einfluss, den Begemann et al. (1997) und Laurentin et al. (2000) nicht statistisch signifikant bestätigen konnten, wurde in der vorliegenden Studie nachgewiesen. Seidl berücksichtigte bei seiner Analyse nur die „mittleren Untersuchungstage“ von fünf Versuchsreihen, also fünf Tage, und vermutete einen Zusammenhang mit dem Sonnenhöhenwinkel.

In der vorliegenden Stichprobe unterscheiden sich die Ergebnisse im Frühling und Herbst trotz ähnlicher Tageslänge und Sonnenhöhe deutlich, die jahreszeitlichen Unterschiede stehen also in keinem Zusammenhang mit dem Sonnenhöhenwinkel. Die präferierte horizontale Beleuchtungsstärke lag im Frühling bei durchschnittlich 1086 lx, während im Herbst durchschnittlich 856 lx als gerade richtig empfunden wurden.

Dabei handelt es sich nicht um sogenannte „Panel-Effekte“, die bei der mehrfachen Befragung derselben Probanden auftreten können. Die Befragungen starteten in acht der Gebäude im Herbst und einmal im Frühling. Die Nutzerbewertungen änderten sich nicht systematisch mit der Anzahl der Befragungen.

Bei SAD-Patienten ist Wirz-Justice (2009) zufolge eine deutliche Reaktion auf die abnehmende Tageslänge im Herbst bekannt. Hier wirkt sich folglich die langfristige jahreszeitliche Veränderung des Tageslichtangebots aus. Ein Einfluss des zunehmenden bzw. abnehmenden Tageslichtangebots auf das präferierte Beleuchtungsstärkeniveau über die Unterschiede der absoluten Tageslänge hinaus ist auch bei gesunden Menschen vorstellbar.

Möglicherweise spielt zudem die Erfahrung der zurückliegenden Monate mit einem Mangel an Licht im Winter bzw. einem Überfluss im Sommer eine Rolle bei den jahreszeitlichen Unterschieden der präferierten Beleuchtungsstärke.

Die Nutzerbewertung des Ausblicks beeinflusste die bevorzugte Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz ebenfalls signifikant. Dieser Einfluss des Ausblicks entspricht seiner vielfach bestätigten großen Bedeutung für Nutzer von Büroarbeitsplätzen und der ebenfalls mehrfach nachgewiesenen größeren Leuchtdichtetoleranz von Probanden bei einem „interessanten“ Ausblick (Hopkinson, 1972 und Tuaycharoen & Tregenza, 2007).

Möglicherweise beeinflusst die Bewertung des Ausblicks die bevorzugte Beleuchtungsstärke jedoch nicht direkt. Man kann vermuten, dass Nutzer bei einem „angenehmen“ oder „interessanten“ Ausblick den Sonnen- oder Blendschutz weniger weit schließen, was eine höhere Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz zur Folge hätte.

Einen größeren Einfluss auf die gewünschte Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz als diese drei Faktoren hatte jedoch die Außenbeleuchtungsstärke. Sie wurde als der wichtigste Parameter identifiziert, der die präferierte Beleuchtungsstärke zusätzlich zur Jahreszeit beeinflusst.

Der dominante Einfluss der Außenbeleuchtungsstärke auf das präferierte Beleuchtungsstärkeniveau deckt sich mit den Ergebnissen von Begemann et al. (1997) und von Halonen und Lehtovaara (1995), die feststellten, dass viele Nutzer in tageslichtversorgten Testräumen einen „Tagesverlauf“ des Kunstlichts bevorzugten, und bei zunehmendem Tageslichtangebot außen auch innen ansteigende Beleuchtungsstärkewerte wählten.

Dem entspricht auch die Unzufriedenheit der Nutzer mit der tageslichtabhängigen Dimmung an ihrem Arbeitsplatz, die von Escuyer et al. (2001, nach Galasiu & Veitch, 2006, S. 733) und von Slater et al. (ebd., S. 737) beobachtet wurde und die sich auch in dieser Untersuchung zeigt.

Die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz bei eingeschaltetem Kunstlicht war in der vorliegenden Untersuchung in den Gebäuden mit tageslichtabhängig geregelten Kunstlichtanlagen trotz der automatischen Dimmung im Mittel etwas höher als in den Gebäuden ohne tageslichtabhängige Dimmung. Die Beleuchtung durch Kunstlicht wurde von den Nutzern im Widerspruch dazu bei den tageslichtabhängig gedimmten Anlagen als dunkler bewertet als bei den manuell geschalteten Anlagen.

Die Dimmung begrenzt den – für den Nutzer erlebbaren – Anstieg der Beleuchtungsstärke beim Einschalten des Kunstlichts, und gleicht (bis zum Erreichen des Sollwertes und dem Ausschalten des Kunstlichts) auch einen Anstieg des Tageslichtangebots im Raum durch Dimmung aus, so dass die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz bei zunehmender Helligkeit außen nicht den Erwartungen entsprechend ansteigt.

Wenn am Arbeitsplatz eine Beleuchtungsstärke präferiert wird, die im Zusammenhang mit der Außenbeleuchtungsstärke steht und zudem von der Jahreszeit beeinflusst wird, widerspricht eine energiesparende Konstantlichtregelung dem Wunsch der Nutzer.

Ebenso wie die Außenbeleuchtungsstärke beeinflusst auch die Architektur die Erwartungen der Nutzer an die Helligkeit im Raum. Die Nutzer von Büroräumen an Atrien wünschen sich zwar häufiger mehr Licht am Arbeitsplatz als die Nutzer außenliegender Räume. Die präferierte Beleuchtungsstärke in Räumen am Atrium liegt mit durchschnittlich 560 lx dennoch deutlich unter der präferierten Beleuchtungsstärke in außenliegenden Räumen von 999 lx. Große Fensterflächen nach außen dagegen wecken den Wunsch nach hohen Beleuchtungsstärken.

Vermutlich spielen hier die Erfahrungen der Nutzer eine entscheidende Rolle, die bei Räumen an Atrien geringere Helligkeiten und bei großen Fensterflächen besonders hohe Helligkeiten erwarten.

Ein Einfluss des aufgrund des unterschiedlichen Tageslichtangebots unterschiedlichen Adaptationsniveaus der Nutzer wäre ebenfalls denkbar. In diesem Fall wäre aber eher ein Zusammenhang mit dem Tageslichtquotienten als Maß für die Tageslichtversorgung zu erwarten als ein Zusammenhang mit dem Fensterflächenanteil, wo Fensterflächen unterhalb der Arbeitsfläche keinen relevanten Beitrag zur Helligkeit am Arbeitsplatz leisten.

Neben den architektonischen Parametern „Fensterflächenanteil“ und „Atrium“ beeinflusst die von den Nutzern angegebene Häufigkeit der Abstimmung mit Kollegen bezüglich Kunstlicht

und Sonnenschutz die präferierte Beleuchtungsstärke: Das Kunstlicht wird eher eingeschaltet und der Sonnenschutz eher geschlossen, wenn weniger Abstimmung erforderlich ist. Die Abstimmungshäufigkeit nimmt mit der Anzahl der Mitarbeiter im Raum zu und wird damit auch von der Büroform (Zellenbüro/Großraumbüro) beeinflusst.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Mehrheit der Probanden mit der am Arbeitsplatz vorhandenen horizontalen und zylindrischen Beleuchtungsstärke zufrieden war. Die Messwerte lagen bei diesem Nutzerurteil – insbesondere bei jüngeren Nutzern – bei großer Streuung deutlich über den normativen Mindestanforderungen für Büroarbeitsplätze. Die bevorzugte Beleuchtungsstärke wurde stark von der Außenbeleuchtungsstärke und zusätzlich von der Jahreszeit beeinflusst.

Hypothese 2: Die Nutzerbewertung der Blendung ist abhängig vom DGP-Wert, vom Alter der Nutzer, von der Jahreszeit und von der Nutzerbewertung des Ausblicks.

Der Blendungsindex „Daylight Glare Probability“ DGP wurde 2006 von Wienold und Christoffersen aufgrund der geringen Vorhersagequalität bestehender Blendungsindizes wie dem „Daylight Glare Index“ DGI entwickelt.

Der ermittelte Wert der Daylight Glare Probability mit ihren Erweiterungen zur Berücksichtigung des Alters der Nutzer, der Durchsicht durch das System und für Situationen mit geringem Blendrisiko hat einen signifikanten Einfluss auf die Blendungsbewertung. Das bestätigt die Ergebnisse der Testraumuntersuchungen von Wienold am Fraunhofer ISE (Moosmann et al., 2012).

Das Bestimmtheitsmaß des $DGP_{\text{lowlight, viewratio, age}}$ -Wertes beträgt in der vorliegenden Untersuchung allerdings nur 27 %. Damit bleibt ein großer Teil der Varianz unerklärt, die Vorhersagegenauigkeit des DGP-Index ist nur wenig besser als die des Daylight Glare Index.

Diese geringe Vorhersagegüte des Blendungsindex DGP entspricht den Ergebnissen von Hirning, Isoardi, Coyne, Garcia Hansen und Cowling (2013), die eine Felduntersuchung in drei Gebäuden mit Großraumbüros in Brisbane, Australien, durchgeführt haben.

Die große Unsicherheit der Blendungsvorhersage kann in der vorliegenden Untersuchung von den verschiedenen diskutierten Messfehlern beeinflusst sein (Messfehler der Leuchtdichtekamera, Aufstellungsort der Leuchtdichtekameras, Unsicherheit bezüglich der Blickrichtung der Probanden).

Beim Vergleich zwischen Nutzerurteil und Leuchtdichtebild wäre wünschenswert, dass Entfernung und „Blickwinkel“ zur Blendquelle für Proband und Leuchtdichtebild identisch sind. Bei Felduntersuchungen mit Langzeitmessungen ist das ausgeschlossen, es kommt also grundsätzlich zu einem Messfehler.

In einer Studie an der De Montfort University in Leicester, Großbritannien, wurde untersucht, wie sich Abweichungen des Blickwinkels zur Blendquelle und der Entfernung von der Blendquelle auswirken, wie sie typischerweise bei Felduntersuchungen auftreten. Für Abweichungen der Kameraposition von der des Probanden um 30° wurden bei bedecktem Himmel Fehler zwischen 2 % und 25 % ermittelt, bei 45° Abweichung Fehler zwischen 8 % und 35 %. Es ist davon auszugehen, dass diese Abweichungen bei sonnigem Himmel zu größeren Messfehlern führen (Fan, Painter & Mardaljevic, 2009).

Die in der vorliegenden Untersuchung abgeschätzten DGP-Werte „mit Blick zum Monitor“ erreichten allerdings kein höheres Bestimmtheitsmaß als die gemessenen DGP-Werte „mit Blick zum Fenster“. Das kann daher rühren, dass die Probanden bei der Frage nach der Blendung durch das Fenster in Richtung Fenster geschaut haben und die „Blickrichtung“ des Messgeräts der der Probanden nahe kam.

Neben dem DGP-Wert und dem Alter der Nutzer konnte auch der Einfluss der Jahreszeit auf die Blendungsbewertung nachgewiesen werden. Dieser ist unabhängig von der Sonnenhöhe, welche die Blendungsbewertung nicht signifikant beeinflusst.

Vergleichbar mit der höheren präferierten Beleuchtungsstärke werden im Frühling auch höhere DGP-Werte als „nicht blendend“ bewertet als in den anderen Jahreszeiten, dementsprechend wird im Herbst und Winter häufiger Blendung empfunden als im Frühling.

Der Einfluss der Nutzerbewertung des Ausblicks entspricht dem von Hopkinson (1972) und von Tuaycharoen und Tregenza (2007) beobachteten Effekt, dass umso höhere DGP-Werte als „nicht blendend“ bewertet werden, je angenehmer der Ausblick empfunden wird.

Derselbe Zusammenhang zeigt sich auch beim Umgang der Nutzer mit dem Sonnenschutz: Je freier der Ausblick, desto höhere DGP-Werte werden akzeptiert.

Als weitere Einflussgrößen wurden die architektonischen Parameter „Fensterflächenanteil“ und „Atrium“ identifiziert: Nutzer von Räumen an Atrien empfinden Blendung bereits bei niedrigeren DGP-Werten, und bei mittleren Fensterflächenanteilen werden in der vorliegenden Stichprobe höhere DGP-Werte akzeptiert als bei Lochfassaden oder Ganzglasfassaden. Dementsprechend tritt Blendung umso häufiger auf, je größer der Fensterflächenanteil der Fassade ist.

Auch die Nutzerbewertung der Bedienbarkeit des Sonnenschutzes beeinflusst die Blendungsbewertung: Je zufriedener ein Nutzer mit der Bedienbarkeit ist, desto höhere DGP-Werte akzeptiert er.

Man kann davon ausgehen, dass ein Nutzer umso zufriedener mit der Bedienbarkeit seines Sonnenschutzes ist, je erfolgreicher er seine Einflussnahme auf die Position des Sonnenschutzes empfindet. Die Bedeutung der Einflussnahme auf die Umgebung wird in der Psychologie mit dem Konzept der „Selbstwirksamkeit“ beschrieben. Aus anderen Studien ist bekannt, dass die Möglichkeit der (wirksamen) Einflussnahme zum Wohlbefinden der Nutzer beiträgt und zu einer größeren Toleranz gegenüber den Umgebungsbedingungen (z. B. bei hohen sommerlichen Temperaturen, siehe Hawighorst, Schweiker & Wagner, 2012).

Auch Veitch (2001) weist auf die Bedeutung der Selbstwirksamkeit hin: Bei Probanden, die keine Möglichkeit hatten, einen störenden Zustand zu beenden, wurden negative Auswirkungen dieser Störung auf die Leistungsfähigkeit beobachtet. Bei Probanden, die die Möglichkeit hatten, den störenden Zustand zu beenden, wurde diese negative Auswirkung nicht beobachtet, auch wenn sie von der Möglichkeit keinen Gebrauch machten (ebd., S. 126).

Individuelle Faktoren wie die Blendempfindlichkeit der Probanden und das Tragen einer Brille beeinflussen die Blendungsbewertung ebenfalls. Sie erhöhen zwar den statistischen Analysen zufolge die Vorhersagegüte, können aber für die Planung möglichst blendfreier Arbeitsplätze ebenso wenig herangezogen werden wie die Bewertung der Aussicht, die nur auf Basis von gegebenenfalls vorhandener Verbauung abgeschätzt werden kann.

Die vom Nutzer empfundene Blendung lässt sich somit weder mit dem Daylight Glare Index noch mit der Daylight Glare Probability – zumindest in dieser Stichprobe und bei der Ungenauigkeit der vorliegenden Messwerte – „fehlerfrei“ vorhersagen. Die Bandbreite der DGP-Werte ist für jedes Blendurteil sehr groß.

Für die Planung von Arbeitsplätzen folgt aus den vorliegenden Ergebnissen, dass die Möglichkeit, individuell Abhilfe bei störender Blendung schaffen zu können, für die Zufriedenheit der Nutzer mit der Tageslichtversorgung ihres Arbeitsplatzes von entscheidender Bedeutung ist.

6.2 Auswertung der Nutzereingriffe

Die Analyse der identifizierten Nutzereingriffe diente in erster Linie der Überprüfung der Hypothesen 3 bis 5. Man kann davon ausgehen, dass ein Nutzereingriff im Feld verzögert erfolgt und Nutzer erst dann eine Veränderung herbeiführen, wenn eine Lichtsituation deutlich unangenehm ist (Blendung, zu geringes Tages- oder Kunstlichtangebot). Die Nutzereingriffe im Feld geben Auskunft über die „gelebte“ Toleranzgrenze der Nutzer, die von der in Laboruntersuchungen ermittelten Toleranzgrenze abweichen kann.

Hypothese 3: Der Umgang der Nutzer mit dem Kunstlicht ist abhängig von der Jahreszeit, von der Bedienbarkeit des Systems und von der Bürogröße.

Diese Hypothese wurde teilweise von den Ergebnissen der Untersuchung bestätigt.

Wie bereits von Hunt (1979) und Reinhart (2001) berichtet, erfolgt das Einschalten des Kunstlichts auch in der vorliegenden Untersuchung vor allem morgens beim Betreten des Büros, das Ausschalten erfolgt beim Gang in die Mittagspause und beim Verlassen des Büros am Abend.

Der Umgang der Nutzer mit dem Kunstlicht in der vorliegenden Untersuchung bestätigt dennoch den Einfluss der Jahreszeiten: Im Frühling wird das Kunstlicht eingeschaltet, wenn durchschnittlich 467 lx vorhanden sind (Mittelwert der Beleuchtungsstärke an allen Arbeitsplätzen im Raum). Im Herbst wird das Kunstlicht bei durchschnittlich 246 lx eingeschaltet. Das bedeutet, dass viele Nutzer, die das Kunstlicht im Frühling bei 500 lx am Arbeitsplatz eingeschaltet haben, dieselbe Beleuchtungsstärke im Herbst als ausreichend empfanden und kein zusätzliches Kunstlicht eingeschaltet haben.

Bei manuell geschalteten Anlagen, die das Einschalten unabhängig von der bereits vorhandenen Beleuchtungsstärke zulassen, erfolgt das Einschalten des Kunstlichts im Frühling in 30 % aller Fälle bei einer Beleuchtungsstärke über 500 lx am dunkelsten Arbeitsplatz im Raum.

Die nach DIN 5034-1 zulässige Reduktion der Mindestbeleuchtungsstärke bei Beleuchtung mit Tageslicht, die von Gramm et al. (2013) und Knoop (2014) nicht bestätigt werden konnte, entspricht auch in der vorliegenden Untersuchung nicht dem Umgang der Nutzer mit der künstlichen Beleuchtung, der ein indirektes Nutzerurteil darstellt.

Der große Einfluss der Bedienbarkeit der elektrischen Beleuchtung auf den Umgang der Nutzer mit ihr konnte anhand der Beobachtungen in einem Gebäude ebenfalls gezeigt werden.

Die durchschnittliche Brenndauer des Kunstlichts an Tagen, an denen das Kunstlicht eingeschaltet wurde, betrug in den drei Gebäuden mit manuell geschalteter Beleuchtung 4,8 h und in den drei Gebäuden mit tageslichtabhängiger Regelung 3,8 h. Berücksichtigt man zudem, dass die manuell geschalteten Anlagen an 54 % der Nutzungstage eingeschaltet wurden, während die tageslichtabhängigen Systeme nur an 49 % der Nutzungstage eingeschaltet wurden, ergibt sich für die tageslichtabhängig geregelten Anlagen eine um 28 % kürzere durchschnittliche Brenndauer. Dieser Unterschied entspricht dem in DIN V 18599-4:2011-12 (Tabelle 23, S. 51) angegebenen Unterschied zwischen dem Energiebedarf manuell geschalteter Anlagen und dem von tageslichtabhängig gedimmten und ausschaltenden Systemen.

In einem Gebäude wurden die Lichtschalter nutzerunfreundlich mit teilweise großem Abstand zum Arbeitsplatz angebracht und gleichzeitig Einbauleuchten verwendet, deren Schaltzustand bei hohem Tageslichtangebot nicht ins Auge fällt. In diesem Gebäude wurde eine signifikant größere mittlere Brenndauer von 8,1 h pro Tag mit Kunstlichtnutzung ermittelt.

Ein Einfluss der Bürogröße wie bei Christoffersen et al. (2000, nach Galasiu & Veitch, 2006) wurde in dieser Untersuchung nicht beobachtet. Die untersuchten Großraumbüros waren über-

wiegend mit Stehleuchten ausgestattet. Bei einer solchen arbeitsplatzbezogenen Beleuchtung ist für die Nutzer leicht erkennbar, ob die elektrische Beleuchtung noch von einem Kollegen benötigt wird oder ausgeschaltet werden kann. Das gleichzeitige Einschalten aller Leuchten im Raum wie von Hunt (1979) beobachtet ist in den untersuchten Gebäuden mit Stehleuchten nicht möglich. Dass die Bürogröße die Brenndauer nicht signifikant beeinflusst hat, könnte daher von der Zusammensetzung der Stichprobe beeinflusst worden sein.

Für den architektonischen Parameter „Fensterflächenanteil“ konnte in der vorliegenden Stichprobe kein systematischer Zusammenhang mit der Beleuchtungsstärke beim Einschalten des Kunstlichts nachgewiesen werden. Unterschiede zwischen außenliegenden Büroräumen und Büroräumen an Atrien konnten aufgrund der Zusammensetzung der Stichprobe nicht nachgewiesen werden.

Das beobachtete Nutzerverhalten entspricht in der vorliegenden Untersuchung der Nutzerbewertung. Der Umgang mit dem Kunstlicht legt ebenso wie die präferierte Beleuchtungsstärke nahe, dass tageslichtabhängig gedimmte oder geschaltete Kunstlichtanlagen mit einem Sollwert von ca. 500 lx den Wünschen der Nutzer insbesondere im Frühling weniger nahe kommen als manuell geschaltete Anlagen.

Die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz bei eingeschaltetem Kunstlicht betrug im Mittel ca. 800 lx. Die erfasste Brenndauer der elektrischen Beleuchtung bestätigt die durch tageslichtabhängige Regelung mögliche Energieeinsparung, die jedoch einen negativen Effekt auf die Nutzerzufriedenheit hat. Deutlich stärker wirkte sich in dieser Stichprobe jedoch die „Nutzerunfreundlichkeit“ eines der Systeme auf die Brenndauer aus.

Hypothese 4: Der Umgang der Nutzer mit Sonnen- und Blendschutzsystemen ist abhängig von der Qualität des Außenkontakts (Bewertung des Ausblicks, Einschränkung des Ausblicks durch Sonnen-/Blendschutz) sowie von deren Bedienbarkeit.

Diese Hypothese konnte bestätigt werden, allerdings teilweise nur indirekt.

Die Nutzer ostorientierter Büroräume schließen den Sonnenschutz vor allem morgens/vormittags, während der Sonnenschutz westorientierter Räume vor allem mittags/nachmittags geschlossen wird. Das Schließen des Sonnenschutzes entspricht also dem Sonnenlauf und erfolgt gehäuft jeweils zu den Zeiten, zu denen die entsprechende Fassade direkt besonnt ist und Direktblendung durch die Sonne auftreten kann. Das entspricht den Beobachtungen von Lindsay et al. (1993, nach Reinhart, 2001) und Reinhart (2001) und auch den Antworten der Nutzer, die angeben, die Position des Sonnenschutzes vor allem zum Schutz vor Blendung und zur Anpassung der Helligkeit zu verändern.

Dennoch hat auch der Ausblick Einfluss auf den Umgang mit dem Sonnen- oder Blendschutz: Während der Sonnen- oder Blendschutz beim Blick auf Gebäude im Mittel bei einem $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wert von 0,37 geschlossen wird, wird er beim Blick auf Bäume bei einem DGP-Wert von 0,39 und bei freiem Ausblick bei einem DGP-Wert von 0,42 geschlossen. Dieses Ergebnis entspricht den Beobachtungen von Tuaycharoen und Tregenza (2007) und dem Einfluss des Ausblicks auf die Blendungsbewertung in der vorliegenden Untersuchung.

Die DGP-Werte nach einem Nutzereingriff – also der von den Nutzern im Rahmen der Möglichkeiten „gewählte“ DGP-Wert – liegt im Mittel bei 0,26 und damit in einer Größenordnung, bei der die Blendungswahrscheinlichkeit dem Index zufolge gering ist. Die DGP-Werte nach dem Schließen des Sonnenschutzes sind – bei großer Streuung der Messwerte – signifikant höher als die Werte nach dem Öffnen des Sonnenschutzes.

Das Öffnen des Sonnenschutzes erfolgt in Westbüros vor allem morgens, wenn die Fassade nicht besonnt ist, der Sonnenschutz aber noch vom Vortag geschlossen ist. Bei den übrigen Orientierungen verteilt sich das Öffnen gleichmäßiger über den Arbeitstag. Der Sonnen- oder Blendschutz wird überwiegend vollständig oder fast vollständig geöffnet.

Die Beeinflussung des Nutzerverhaltens durch die Eigenschaften des Sonnenschutzes „Einschränkung des Ausblicks durch den Sonnen-/Blendschutz“ und „Bedienbarkeit“ konnte nur indirekt auf Basis der unterschiedlichen durchschnittlichen Bewertung der verschiedenen Systeme analysiert werden.

Dabei fällt auf, dass bei den Sonnenschutzsystemen „Rollläden“ und „Sonnenschutzrollos“, mit deren „Einschränkung des Ausblicks“ und mit deren „Bedienbarkeit“ die Nutzer mehrheitlich unzufrieden waren, signifikant weniger Veränderungen des Sonnenschutzsystems vorgenommen wurden.

Die Position außenliegender Raffstores, bei denen Bedienbarkeit und Durchsicht durch das System im Mittel positiver bewertet wurden, wurde bei ausschließlich manuell bedienbaren Systemen pro Messzeitraum durchschnittlich 6,1-mal verändert. Bei automatisch gesteuerten und manuell veränderbaren Raffstores wurden 9,1 Veränderungen pro Messzeitraum beobachtet. Möglicherweise dienten die Nutzereingriffe bei den automatisch gesteuerten Systemen – wie von Reinhart (2001) beobachtet – zumindest teilweise der Korrektur von Veränderungen durch die Gebäudeleittechnik, die von den Nutzern mehrheitlich nicht geschätzt wird: 69 % der Bewertungen der automatischen Steuerung sind negativ.

Da einige dieser Sonnenschutzsysteme in der vorliegenden Felduntersuchung nur in wenigen Räumen eingesetzt wurden, konnten diese Sonnenschutzsysteme nicht unabhängig von anderen gebäudespezifischen Einflussfaktoren untersucht werden. Rückschlüsse aus den Nutzereingriffen können daher keine belastbaren Aussagen über die Systeme liefern, sie können jedoch als Hinweis dienen, dass Systeme, die aus Sicht der Nutzer den Ausblick behindern oder die nicht einfach zu bedienen sind, möglicherweise weniger genutzt werden, und dass die automatische Steuerung in der Regel nicht den Nutzerwünschen entspricht.

Hypothese 5: Die Blendungstoleranz der Nutzer ist abhängig von der Jahreszeit.

Diese Hypothese konnte – trotz großer Streuung der Messwerte – bestätigt werden.

Neben den jahreszeitlichen Unterschieden im Blendungsempfinden, die aus den Nutzerurteilen ersichtlich werden, kann der Umgang der Nutzer mit dem Sonnen- oder Blendschutzsystem Aufschluss über jahreszeitliche Unterschiede der Blendungstoleranz geben. Den Angaben der Nutzer zufolge ist die Reduktion von Blendung der häufigste Anlass für eine Veränderung des Sonnen- oder Blendschutzes. Das Schließen des Sonnenschutzes kann daher als indirektes Nutzerurteil interpretiert werden, dass die Situation vor dem Eingriff als blendend empfunden wurde.

Dabei zeigen sich nur kleine jahreszeitliche Unterschiede. Im Sommer wird der Sonnenschutz bei niedrigeren DGP-Werten geschlossen als in den anderen Jahreszeiten.

Das frühere Eingreifen im Sommer entspricht vermutlich eher der von den Nutzern in dieser Jahreszeit angegebenen Absicht, unerwünschte Wärmeeinträge zu vermeiden, als einer jahreszeitlich veränderten Blendungstoleranz.

Die Situation nach dem Nutzereingriff kann als eine den Nutzerwünschen entsprechende Situation interpretiert werden. Auch hier zeigen sich nur kleine jahreszeitliche Unterschiede. Im Frühling ist der von den Nutzern „gewählte“ $DGP_{\text{lowlight, viewratio}}$ -Wert nach dem Öffnen des Sonnenschutzes mit 0,24 etwas höher als in den anderen Jahreszeiten (Sommer 0,23, Herbst 0,22, Winter 0,20). Das entspricht den Ergebnissen zur jahreszeitlichen Abhängigkeit der von den

Nutzern präferierten Beleuchtungsstärke und der jahreszeitlich unterschiedlichen Blendungsbewertung.

Ein Einfluss der Jahreszeit auf die Blendungstoleranz zeigt sich somit im Blendurteil der Nutzer und – wenn auch nur schwach – bei den jahreszeitlichen Unterschieden beim Öffnen des Sonnenschutzes.

6.3 Einflüsse der Raumklimabedingungen und der Architektur

In umfangreichen Nutzerbefragungen konnten Wagner und Schakib-Ekbatan (2011) die Relevanz der Zufriedenheit mit thermischen und visuellen Bedingungen, Luftqualität und Akustik bzw. Geräuschpegel für das Wohlbefinden der Nutzer am Arbeitsplatz nachweisen. Sie führen aus, dass neben individuell unterschiedlichen Präferenzen auch gebäudespezifische Parameter die Zufriedenheit beeinflussen: „Dazu zählen z. B. schlecht funktionierender oder fehlender Sonnen- und Blendschutz, der den thermischen und visuellen Komfort beeinträchtigt, Ganzglasfassaden, die das Risiko der Überhitzung erhöhen, nicht zu öffnende Fenster und damit fehlende individuelle Lüftungsmöglichkeit oder auch Büros, die zu einem Atrium orientiert sind und insbesondere in den unteren Geschossen oft schlechtere Tageslichtqualität bieten – alles Aspekte, die bekannt sind [...]“ (ebd., S. 56)

Der Einfluss der Raumklimabedingungen und der Einfluss architektonischer Parameter auf den visuellen Komfort wurden anhand der Hypothesen 6 und 7 geprüft.

Hypothese 6: Die Zufriedenheit mit Raumklimabedingungen wie Temperatur, Luftqualität und Schallpegel beeinflusst den visuellen Komfort.

Diese Hypothese wird – zumindest für den thermischen Komfort – von den Ergebnissen bestätigt.

Die Zufriedenheit mit dem Raumklima insgesamt wird auch in dieser Stichprobe von allen untersuchten Aspekten des Raumklimas beeinflusst. „Raumklima“ beinhaltet dabei „Belichtung, Temperatur, Luftfeuchte, Luftqualität, Geräusche etc.“ (Frage 60 im Fragebogen).

Besonders stark ist der Einfluss der Zufriedenheit mit der Luftqualität, mit dem Geräuschpegel und mit der Temperatur am Arbeitsplatz. Die Bewertung der Tageslichtversorgung und des Kunstlichts sowie die Häufigkeit störender Blendung beeinflusst die Zufriedenheit mit dem „Raumklima insgesamt“ ebenfalls signifikant.

Dieses Ergebnis entspricht dem Ergebnis von Gossauer (2008), wo mit Ausnahme der Zufriedenheit mit dem Kunstlicht ein signifikanter Einfluss derselben Parameter ermittelt wurde, und dem Ergebnis von Schakib-Ekbatan et al. (2012).

Die Bewertung der Beleuchtung mit Tageslicht, die Zufriedenheit mit der Temperatur und mit der Luftqualität und die Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel weisen geringe bis mittlere Zusammenhänge auf, der Einfluss dieser Faktoren auf die Zufriedenheit mit der Beleuchtung ist nur gering.

Der Regressionsanalyse zufolge erklärt der Einfluss der Zufriedenheit mit der Temperatur und mit der Luftqualität 18 % der Varianz der Bewertung der Beleuchtung mit Tageslicht.

Dieser signifikante Einfluss der Zufriedenheit mit der Temperatur auf den visuellen Komfort wird von der Beobachtung gestützt, dass Nutzer – insbesondere in Gebäuden mit Ganzglasfassaden – den Sonnenschutz im Sommer weiter schließen als in den anderen Jahreszeiten. Das deckt sich

mit der Angabe der Nutzer, den Sonnenschutz im Sommer auch zum Schutz vor unerwünschten Wärmeeinträgen zu verwenden, und mit den Beobachtungen von Mahdavi et al. (2008).

Nutzer, die sich mit dem Sonnenschutz vor Wärmeeinträgen schützen möchten, bevorzugen eine geringere Beleuchtungsstärke. Das stimmt mit der Vermutung von Laurentin et al. (2000) überein.

Der Einfluss des thermischen Komforts wird in dieser Untersuchung also sowohl bei der Befragung der Nutzer deutlich als auch bei der Auswertung des Nutzerverhaltens, während die Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel nicht von praktischer Relevanz zu sein scheint.

Die Bewertung der Luftqualität wird von der Temperaturbewertung beeinflusst und von der Zufriedenheit mit der Luftfeuchtigkeit in der entsprechenden Jahreszeit, die allerdings keinen deutlichen Zusammenhang mit der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit aufweist.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Unzufriedenheit mit der Luftqualität – zumindest bei manchen Nutzern – als „Sammelbegriff“ für Störungen diene, welche die Nutzer nicht eindeutig einer anderen Kategorie zuordnen konnten.

Ob ein direkter Einfluss der Luftqualität auf den visuellen Komfort besteht oder ob der statistisch nachgewiesene Einfluss eher der einer allgemeinen Unzufriedenheit ist, kann nicht geklärt werden.

Die Angaben der Nutzer und der beobachtete Einfluss des thermischen Komforts auf den Umgang der Nutzer mit dem Kunstlicht und mit dem Sonnenschutz deuten darauf hin, dass bei beiden Systemen eine Steuerung, die den thermischen Komfort und die Jahreszeiten berücksichtigt, größere Akzeptanz bei den Nutzern finden könnte.

Wirksame Eingriffsmöglichkeiten zur Anpassung von Kunstlicht und Sonnen- oder Blendschutz an die individuellen Bedürfnisse wären aufgrund der großen individuellen Unterschiede auch bei einer solchen Steuerung unverzichtbar für eine hohe Nutzerzufriedenheit.

Hypothese 7: Die Architektur (Fensterflächenanteil, Fassadenart, Größe und Proportion der Räume, Materialität und Farbgebung der Oberflächen der Gebäude) beeinflusst den visuellen Komfort.

Die Hypothese, dass architektonische Faktoren den visuellen Komfort beeinflussen, wird durch die Ergebnisse bestätigt.

Der Fensterflächenanteil beeinflusst die präferierte Beleuchtungsstärke: Je größer der Fensterflächenanteil, desto höhere Beleuchtungsstärkewerte werden als „gerade richtig“ empfunden – möglicherweise spielt hier die Erwartung der Nutzer, dass große Fensterflächen viel Licht bieten, die entscheidende Rolle. Nur im Sommer wird die gewünschte Helligkeit vom Schutz vor hohen Wärmeeinträgen beeinflusst.

Fensterflächenanteil und Tageslichtquotient sind miteinander korreliert, entsprechend weist auch der Tageslichtquotient in der vorliegenden Stichprobe einen mittleren Zusammenhang mit der Bewertung der Tageslichtversorgung auf.

Aus Nutzersicht ist eine „gute Tageslichtversorgung“ am ehesten bei fensternahen Arbeitsplätzen mit Fensterflächenanteilen um 60 % gegeben (Rohbauöffnung). Dieser präferierte Fensterflächenanteil liegt deutlich über dem Mindestfensterflächenanteil nach Keighley (1973, nach Galasiu & Veitch, 2006) von 25 % und über den Ergebnissen von Christoffersen et al. (2000, ebd.) von 20 % bis 35 %, was von der untersuchten Bürogröße und dem üblichen Arbeitsumfeld der Probanden beeinflusst sein kann.

Der Medianwert der Tageslichtquotienten an Arbeitsplätzen, an denen die Nutzer die Beleuchtung mit Tageslicht als weder zu hell noch zu dunkel empfanden, lag bei 2,4 %. Die Mess-

genauigkeit dieses Wertes ist allerdings eingeschränkt, die Bandbreite der als gut befundenen Tageslichtquotienten ist sehr groß.

Die Anforderungen der Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR, 2011), dass der Tageslichtquotient am Arbeitsplatz größer als 2 % sein muss, liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die Nutzerwünsche in dieser Stichprobe.

In einem Gebäude mit vergleichbaren Tageslichtquotienten in Räumen an Atrien und in außenliegenden Räumen wurden die außen liegenden Räume als besser tageslichtversorgt empfunden als die Räume an Atrien.

Der Einfluss der Proportion der Räume und von Materialität und Farbgebung konnte nicht untersucht werden, da sich Materialien und Farbgebung in den untersuchten Räumen nicht deutlich unterschieden. Die untersuchten Räume in Alt- und Neubauten unterschieden sich zwar in ihren Proportionen, aber auch in ihrem Fensterflächenanteil. Eine unabhängige Betrachtung dieser Faktoren war daher mit der vorliegenden Stichprobe nicht möglich.

Umgekehrt zeigte sich aber, dass die Bewertung der Dimensionen eines Raums – neben dem großen Einfluss der tatsächlichen Abmessungen – von der künstlichen Beleuchtung beeinflusst wird. In der vorliegenden Stichprobe werden Räume als größer bewertet, die als gleichmäßig beleuchtet empfunden werden, und es werden Räume als höher bewertet, deren Beleuchtung des fensterfernen Bereichs als heller empfunden wird.

Auch zwischen der Bewertung der Schönheit eines Gebäudes und der Zufriedenheit mit den untersuchten Komfortparametern bestehen signifikante Zusammenhänge. Je schöner ein Gebäude empfunden wird, desto positiver werden die Beleuchtung des Arbeitsplatzes durch Tageslicht (ohne Verschattung), das Kunstlicht, die Temperatur und Luftqualität, der Geräuschpegel und die Zufriedenheit mit der Arbeitstätigkeit im Betrieb bewertet.

Mit den angewandten statistischen Verfahren kann nicht geklärt werden, ob die Zufriedenheit in „schönen“ Gebäuden größer ist, diese also milder beurteilt werden, oder ob Gebäude, in denen die Nutzer mit dem Raumklima zufriedener sind, im Mittel als schöner empfunden werden.

Eine weiterer Parameter, dessen Einfluss auf die Zufriedenheit der Nutzer bereits aus anderen Untersuchungen bekannt ist, ist die Büroform. In der vorliegenden Stichprobe wurden in den Gebäuden, in denen sowohl Zellen- als auch Großraumbüros untersucht wurden, fast alle identifizierten Einflussfaktoren der Zufriedenheit mit dem Raumklima in den Großraumbüros signifikant schlechter bewertet als in den Zellenbüros.

Wagner und Schakib-Ekbatan (2011) begründen die größere Unzufriedenheit in Großraumbüros folgendermaßen: „In [Großraumbüros] sind insbesondere mangelnde Privatheit und fehlende Rückzugsmöglichkeiten relevante Einflussfaktoren für die Bewertung der räumlichen Arbeitsplatzbedingungen. Glaselemente zum Flur werden häufig sowohl unter dem Aspekt des Gesehenwerdens als auch des Sehens als unangenehm empfunden. Was unter den Schlagwörtern Flächeneffizienz oder Transparenz zunächst griffig und erfolgversprechend klingt, kann also durchaus hohes Störungspotenzial enthalten.“ (ebd., S. 56)

Die von Hawighorst et al. (2012) und Veitch (2001) angesprochene Möglichkeit der (wirksamen) Einflussnahme ist in Mehrpersonenbüros naturgemäß geringer als in Einzel- oder Zweipersonenbüros, da mehr Abstimmung mit Kollegen erforderlich ist.

In der vorliegenden Untersuchung wird insbesondere die Zufriedenheit der Nutzer mit dem Geräuschpegel stark von der Büroform beeinflusst. Sie ist in Großraumbüros signifikant geringer, dort wurden bei den orientierenden Messungen des Schallpegels auch signifikant höhere Werte gemessen.

Zusammenfassend konnte in der vorliegenden Untersuchung gezeigt werden, dass die architektonischen Parameter Fensterflächenanteil und Büroform die Zufriedenheit der Nutzer mit der

Belichtung des Arbeitsplatzes stark beeinflussen – möglicherweise weil diese Parameter die Erwartungen der Nutzer beeinflussen.

Die Zufriedenheit mit zahlreichen Komfortaspekten ist in als schön empfundenen Gebäuden größer. Die Bewertung, wie geräumig oder hoch ein Raum ist, wird vor allem von den tatsächlichen Abmessungen des Raumes beeinflusst, die künstliche Beleuchtung beeinflusst diese Bewertung aber ebenfalls signifikant.

6.4 Auswertung der Messungen des Lichtspektrums

Die Messung des Lichtspektrums an den Arbeitsplätzen und der Vergleich der spektralen Zusammensetzung des Lichts an den Arbeitsplätzen mit dem Tageslichtspektrum außen diente der Überprüfung der Hypothese 8.

Hypothese 8: Die Gesundheit der Nutzer, ihr Wohlbefinden und ihre empfundene Leistungsfähigkeit sind abhängig von der spektralen Zusammensetzung des Lichts.

Der vom verwendeten Messgerät ausgewiesene circadiane Wirkungsfaktor a_{cv} entspricht a_{biol} . Für alle untersuchten Räume wurde das Verhältnis von a_{cv} -Wert innen zu a_{cv} -Wert außen gebildet, der s_{ak} -Quotient. Dieser Wert zeigt, in welchem Maße die derzeit als aktivierend betrachteten Wellenlängen an den Arbeitsplatz gelangen.

Die Messung der spektralen Zusammensetzung des Tageslichts an den Arbeitsplätzen ergab, dass der a_{cv} -Wert als Maß der Aktivierung mit Licht im Gebäude bei natürlicher Beleuchtung durchschnittlich bei 90 % des a_{cv} -Wertes außen lag. Der Anteil kurzwelliges Tageslichts, der die Arbeitsplätze erreicht, ist also etwas geringer als der Anteil der anderen Wellenlängen.

Die Vermessung verschiedener Wärmeschutz- und Sonnenschutzverglasungen an der TU Berlin 2013 bestätigte, dass die Beschichtungen der Verglasungen die spektralen Transmissionsgrade beeinflussen. Der sichtbare blaue und rote Wellenlängenbereich wird im Vergleich zu unbeschichteten Gläsern reduziert. Dadurch ergeben sich etwas niedrigere a_{cv} -Werte und eine schlechtere Farbwiedergabe für die beschichteten Gläser. Die an der TU Berlin untersuchten Sonnenschutzgläser sperren im sichtbaren roten Wellenlängenbereich so deutlich, dass die Rotwiedergabe eingeschränkt wird (Gramm et al., 2013).

In den neun Gebäuden war der Einfluss des Sonnen- bzw. Blendschutzes sehr viel größer als der Einfluss von Verglasung und Raumbooberflächen. Auffällig war ein Gebäude mit braunen Sonnen- und Blendschutzrollos, die den a_{cv} -Wert an den betroffenen Arbeitsplätzen bei geschlossenem Rollo auf 64,4 % bzw. 41,1 % des außen vorhandenen a_{cv} -Wertes reduzierten. Die von Aydınli (nach Gall et al., 2000, S.15) formulierte Erwartung an einen Sonnenschutz, die spektrale Zusammensetzung des Tageslichts im Innenraum und damit die Farb- und Farbwiedergabeeigenschaften unwesentlich zu beeinflussen, wird von diesem System nicht erfüllt. Die Zufriedenheit der betroffenen Nutzer mit dem Material des Sonnenschutzes ist vergleichsweise gering.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Verglasung und des Sonnen- oder Blendschutzsystems die spektrale Zusammensetzung des Tageslichts am Arbeitsplatz stark beeinflussen kann. Die „natürliche“ Beleuchtung an den Arbeitsplätzen unterscheidet sich unter Umständen also nicht nur hinsichtlich der Beleuchtungsstärke sondern auch hinsichtlich ihrer spektralen Zusammensetzung deutlich vom natürlichen Tageslicht außen.

Ein statistisch signifikanter Einfluss des Lichtspektrums auf die Gesundheit der Nutzer, ihr Wohlbefinden oder ihre empfundene Leistungsfähigkeit konnte in dieser Untersuchung jedoch nicht

nachgewiesen werden. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Büroräumen sind nicht sehr groß, sofern kein Sonnen- oder Blendschutz eingesetzt wird. Zudem ist nicht bekannt, wie lange sich die Nutzer an ihren Arbeitsplätzen aufgehalten haben und welchen Beleuchtungsstärken und Spektren sie während der übrigen Zeit ausgesetzt waren. Dieses Ergebnis kann daher in der Stichprobe begründet sein.

Trotz der geringen Unterschiede zwischen den Gebäuden zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Nutzerbewertung der Tageslichtversorgung und seiner spektralen Zusammensetzung, wobei die Beleuchtung des Arbeitsplatzes mit Tageslicht umso heller bzw. besser bewertet wurde, je höher der entsprechende s_{ak} -Quotient war, je weniger sich also das Spektrum am Arbeitsplatz vom natürlichen Spektrum außen unterschied.

Dieses Ergebnis deutet in dieselbe Richtung wie Ergebnisse von Gudd, Vandahl, Rudolph und Schierz (2008), die beobachteten, dass Lichtfarben mit höheren Farbtemperaturen (also höheren Blauanteilen) eher als hell beurteilt wurden als niedrigere Farbtemperaturen.

Um die spektrale Zusammensetzung des Lichts in unterschiedlichen Gebäuden und an unterschiedlichen Arbeitsplätzen einfach vergleichen zu können, wurde die an jedem Arbeitsplatz gemessene spektrale Bestrahlungsstärke normiert und ein „normierter spektraler Bestrahlungsstärkequotient“ gebildet (siehe Formel (7) in Abschnitt „5.4.2 Lichtspektrum an den Arbeitsplätzen“). Dieses Vorgehen hat sich bewährt. Durch die Normierung entfallen die Unterschiede in der Tageslichtversorgung, wodurch der Vergleich der spektralen Zusammensetzung erleichtert wird.

6.5 Weitere Befunde

Bei der Auswertung der Fragebögen und Analyse der Messwerte wurden weitere Zusammenhänge beobachtet, die nicht eigentliches Ziel der Arbeit waren und hier nur kurz dargestellt werden.

In den Kommentaren der Nutzer zur künstlichen Beleuchtung wird deutlich, dass einige Nutzer diese mit gesundheitlichen Beschwerden wie Kopfschmerzen oder Augentrockenheit in Verbindung bringen.

Diese Beobachtung stimmt mit Ergebnissen einer Untersuchung von Veitch und Gifford (1996) überein, die viele Jahre zurückliegt. Sie befragten 318 Personen zu deren Überzeugungen bezüglich der Wirkungen von Beleuchtung. 65 % der Befragten hielten die Lichtqualität für wichtig für ihr Wohlbefinden, 81 % gaben an, dass Tageslicht in Innenräumen ihre Stimmung verbessere. Das Licht von Leuchtstofflampen dagegen hielten 15 % für ungesund, einige brachten es mit Kopfschmerzen in Verbindung und 42 % brachten es mit Augenschmerzen in Verbindung (ebd., S. 454–455).

Schierz und Krueger (2002) erläutern, dass Sehbeschwerden durch zu wenig Licht oder durch eine fehlerhafte optische Korrektur zustande kommen können. Sie weisen darauf hin, dass manche Nutzer der Beleuchtung krankmachende Wirkungen zuschreiben, obwohl dafür kein objektiver Grund vorliegt, was als Negativattribution bezeichnet wird.

Ob die in der vorliegenden Untersuchung genannten Beschwerden tatsächlich von der Beleuchtung verursacht werden oder ob eine Negativattribution vorliegt, wurde nicht untersucht.

Weitere Befunde ergaben sich bei der Analyse des thermischen Komforts zur Klärung seines Einflusses auf den visuellen Komfort.

Die Zufriedenheit mit der Temperatur am Arbeitsplatz in der jeweiligen Jahreszeit wird vor allem davon beeinflusst, wie wirksam die Temperaturveränderung empfunden wird, auch die Häufigkeit störender Zugluft spielt eine Rolle.

Die Analyse der Innentemperaturen, mit denen die Nutzer zufrieden waren, zeigt deutliche Abweichungen vom Komfortbereich II nach DIN EN 15251. Die als komfortabel bewerteten Innentemperaturen liegen während der Heizperiode oberhalb des Komfortbereichs II.

Bei der Kühlperiode unterscheidet die Norm zwischen Gebäude mit maschineller Kühlung mit einem außentemperaturunabhängigen Komfortbereich und nicht maschinell gekühlten Gebäuden, in denen der Komfortbereich außentemperaturabhängig ansteigt. Die Nutzer empfanden die Innentemperaturen im Sommer mehrheitlich als eher zu warm, obwohl nur wenige Überschreitungen des jeweiligen Komfortbereichs gemessen wurden. Die als komfortabel bewerteten Innentemperaturen steigen im Sommer in der vorliegenden Stichprobe sowohl für gekühlte als auch für nicht gekühlte Gebäude in Abhängigkeit von der Außentemperatur leicht an. Die Beeinflussung der akzeptierten Innentemperaturen durch die Außentemperatur ist in dieser Stichprobe deutlich geringer als in der Norm für nicht maschinell gekühlte Gebäude angegeben. Dagegen wird auch im Tagesverlauf ein Anstieg der Temperaturen akzeptiert, was sich mit Ergebnissen einer früheren Untersuchung deckt (Wagner et al., 2007).

Der Fensterflächenanteil der Fassade beeinflusst die als komfortabel bewertete Innentemperatur ebenfalls: Bei einer Ganzglasfassade (100 % Fensterflächenanteil) liegen die akzeptierten Innentemperaturen in dieser Stichprobe ca. 0,5 °C höher als bei einem Fensterflächenanteil von 50 %.

Die Einflussfaktoren Uhrzeit, gleitender Tagesmittelwert der Außentemperatur und Fensterflächenanteil können in der vorliegenden Stichprobe 80 % der Varianz der Nutzerurteile der Temperatur erklären, was für eine Felduntersuchung eher viel ist. Ihr quantitativer Einfluss wurde im Abschnitt „5.2.7 Raumtemperatur“ in Formel (6) festgehalten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit diente der Ermittlung und Gewichtung von Faktoren, welche die Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung und den visuellen Komfort an Büroarbeitsplätzen im Alltag beeinflussen. Dabei wurden insbesondere jahreszeitliche Unterschiede und der Einfluss architektonischer Parameter auf den Umgang der Nutzer mit Kunstlicht und Sonnenschutz, auf die Ansprüche an das Beleuchtungsstärkeniveau und auf die Blendungstoleranz berücksichtigt. Laboruntersuchungen können zwar den Einfluss isolierter Parameter sehr genau ermitteln. Die Störgrößen, die dabei gezielt ausgeschlossen werden, beeinflussen die Nutzer jedoch potenziell in der Realität. Daher wurde eine Felduntersuchung in neun architektonisch sehr unterschiedlichen Bürogebäuden durchgeführt, in der die fraglichen Faktoren integral betrachtet werden konnten.

Zentrales Ergebnis der Auswertung der Nutzerbefragungen, der Messungen und des beobachteten Nutzerverhaltens ist, dass die Nutzer mehrheitlich Beleuchtungsstärken oberhalb der normativen Mindestanforderung von 500 lx horizontal bevorzugen. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu der nach DIN 5034-1 zulässigen Reduktion der Mindestbeleuchtungsstärke bei Beleuchtung mit Tageslicht.

Welches Beleuchtungsstärkeniveau als komfortabel empfunden wird, hängt in erster Linie von der Außenbeleuchtungsstärke ab. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Jahreszeit – im Frühling werden besonders hohe Beleuchtungsstärkewerte bevorzugt, im Herbst niedrigere –, das Alter der Nutzer und bauliche Faktoren wie der Fensterflächenanteil oder ein Atrium.

Möglicherweise ist der Wunsch nach hohen Beleuchtungsstärken im Frühling in der Erfahrung des Mangels an Tageslicht im Winter bei – in Deutschland – kürzeren Tagen und geringerer Sonnenschein-Wahrscheinlichkeit begründet, während im Herbst die Erfahrung des Lichtüberangebotes im Sommer nachwirkt.

Die Bevorzugung höherer Beleuchtungsstärken bei größeren Fensterflächenanteilen und die Akzeptanz geringerer Beleuchtungsstärken in Räumen an Atrien könnten darin begründet sein, dass die Nutzer Erfahrung mit dem Einfluss dieser Faktoren auf die Tageslichtversorgung haben und mit einer Helligkeit der Räume zufrieden sind, die ihren Erwartungen entspricht.

Ein Einfluss des thermischen Komforts wurde nur im Sommer nachgewiesen, wenn insbesondere bei großen Fensterflächenanteilen und als zu warm empfundener Innentemperatur der Sonnenschutz regelmäßig weiter geschlossen wird und – möglicherweise beeinflusst durch ein aufgrund des geschlossenen Sonnenschutzsystems verändertes Adaptationsniveau – niedrigere Beleuchtungsstärken bevorzugt werden.

Ebenso wie der Fensterflächenanteil weist der Tageslichtquotient, der vom Fensterflächenanteil entscheidend beeinflusst wird, in der vorliegenden Stichprobe einen mittleren Zusammenhang mit der Bewertung der Tageslichtversorgung auf: Arbeitsplätze mit höherem Tageslichtquotienten wurden als heller bewertet.

Die beiden untersuchten Blendungsbewertungsverfahren DGI und DGP konnten Blendung durch Tageslicht in der vorliegenden Stichprobe nur mit relativ geringer Genauigkeit prognostizieren. Faktoren wie die Blendempfindlichkeit der Nutzer, die mit dem Alter zunimmt, oder der Ausblick beeinflussen die Blendungsbewertung signifikant, sind aber für die Planung möglichst blendfreier Arbeitsplätze nur begrenzt nutzbar.

Auch bei der Blendung durch Tageslicht wurden jahreszeitliche Unterschiede beobachtet: Im Frühling werden höhere Blendungsindexwerte toleriert als in den anderen Jahreszeiten. Die Analyse des Nutzerverhaltens bestätigt dabei die Ergebnisse der Nutzerbefragung.

Die Möglichkeit, individuell Abhilfe bei störender Blendung schaffen zu können, ist für die Zufriedenheit der Nutzer mit der Tageslichtversorgung ihres Arbeitsplatzes von entscheidender Bedeutung.

Die Messung der spektralen Verteilung des Tageslichts an den Arbeitsplätzen zeigt, dass insbesondere Sonnenschutzverglasungen und farbige Sonnenschutzsysteme den Blauanteil des Tageslichts deutlich reduzieren können.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass der visuelle Komfort, die Ansprüche und Bedürfnisse der Nutzer sowie ihre Toleranz von ihrem Alter aber auch von baulichen Faktoren und von Außenbedingungen wie Ausblick, Tageslichtangebot und Jahreszeit beeinflusst werden. Die Architektur hat demzufolge – möglicherweise durch ihren Einfluss auf die Erwartungen der Nutzer – über die Fassadengestaltung hinaus einen großen Einfluss auf die Zufriedenheit der Nutzer mit den Lichtbedingungen.

Über die Ursachen von einigen der beobachteten Einflüsse können auf Basis dieser Untersuchung nur Vermutungen angestellt werden. Weitere Untersuchungen unter möglichst realistischen Bedingungen sind notwendig, um „visuellen Komfort“ an tageslichtversorgten Büroarbeitsplätzen besser zu verstehen.

Die angewandte Methode einer Felduntersuchung mit Nutzerbefragung, Messung und – auf Basis der aus den Messungen abgeleiteten Nutzereingriffe – Beobachtung des Nutzerverhaltens ist mit einigen Nachteilen verbunden, die zum Teil auch die Auswertung einschränken.

Der Arbeits- und Zeitaufwand für die Entwicklung der eingesetzten Messgeräte aus kostengünstigen Bauteilen, für die Durchführung der Felduntersuchung und für die Auswertung der gewonnenen Daten war hoch. Die Genauigkeit der eingesetzten Messgeräte ist hinreichend, ebenso die Genauigkeit der Messung des Tageslichtquotienten an den Arbeitsplätzen. Die Messungen können aufgrund der eingeschränkten Genauigkeit jedoch nur als orientierende Messung interpretiert werden. Position und „Blickrichtung“ der Leuchtdichtekameras weichen von Position und Blickrichtung der Probanden ab. Aufgrund der begrenzten Auflösung der Leuchtdichtebilder konnten Leuchtdichte-Peaks bei geschlossenen Raffstores, die die Blendwirkung stark beeinflussen können, nicht berücksichtigt werden.

Die Anwesenheit der Nutzer konnte nicht erfasst werden. Das schränkt sowohl die Auswertung der Nutzereingriffe ein, die keinem der Nutzer direkt zugeordnet werden können, als auch die Auswertung der Brenndauer des Kunstlichts oder der aufgetretenen Leuchtdichte- oder Beleuchtungsstärkewerte.

Aufgrund der begrenzten Anzahl Gebäude konnten nicht alle fraglichen baulichen Faktoren unabhängig von anderen Einflussfaktoren untersucht werden, wie beispielsweise der Einfluss von Eigenschaften der Sonnenschutzsysteme.

Die Messung und Befragung zu vier Jahreszeiten ermöglichte zwar, Unterschiede zwischen den Jahreszeiten zu identifizieren. Eine genauere Unterscheidung, ab welchem Zeitpunkt im Frühjahr höhere Beleuchtungsstärken gewünscht werden und ab wann der thermische Komfort und die Angst vor Überhitzung das gewünschte Helligkeitsniveau beeinflussen, ist auf Basis dieser Stichprobe jedoch nicht möglich.

Dennoch hat sich die Methodik bewährt. Das Ziel, Einflussgrößen zu identifizieren, die im Alltag der Nutzer von Büroarbeitsplätzen mit Fenstern von praktischer Relevanz für den visuellen Komfort sind, wurde erreicht.

Das war nur möglich durch die Kombination aus einer umfangreichen Erfassung physikalischer Werte und der Nutzerbewertung der erfassten Situation. Die begrenzte Genauigkeit der Messungen ist für die Auswertung nicht entscheidend, da das gewählte statistische Verfahren, die Paneldatenanalyse, nicht einzelne absolute Messwerte berücksichtigt sondern Gruppenunterschiede zwischen Messwerten. Da alle Messwerte mit denselben Messgeräten erfasst wurden, kann man davon ausgehen, dass die Messfehler aller Messungen sich ähnlich sind und dass die Gruppenunterschiede der Messungen weniger von den Messfehlern beeinflusst werden als einzelne Absolutwerte.

Die Qualität der Vorgehensweise besteht darin, dass die zahlreichen Einflüsse einer Felduntersuchung nicht einzeln und unabhängig voneinander betrachtet wurden sondern – der Realität am Arbeitsplatz entsprechend – gemeinsam. Wegen der nicht kontrollierten „Störgrößen“ bleiben zwar regelmäßig große Anteile der beobachteten Streuung unerklärt. Die Einflussfaktoren, die sich trotz der Störgrößen als relevant erweisen, sind aber nicht nur unter künstlichen Laborbedingungen von Bedeutung, sondern auch im Alltag.

Die Architektur, das Baujahr, die Ausstattung und der Fensterflächenanteil der Gebäude unterscheiden sich. Die als Nutzer der Gebäude beteiligten Unternehmen reichen von Privatwirtschaft bis Öffentlicher Dienst und von Ingenieurbüro bis Großbank, die Probanden sind relativ gleichmäßig über die an Büroarbeitsplätzen typischen Altersklassen verteilt. Die vorliegende Stichprobe ist mit 977 Fragebögen, 539 Messreihen verschiedener Licht- und Raumklimaparameter und über 900 000 Leuchtdichtebildern vergleichsweise groß. Das spricht für eine hohe externe Validität der Ergebnisse, also für ihre Generalisierbarkeit auf andere Nutzer von tageslichtorientierten Büroarbeitsplätzen.

Trotz der noch offenen Fragen und ungeklärten Einflüsse können daher Hinweise für die Planung von nutzerfreundlichen Gebäuden abgeleitet werden:

Die Nutzer von Großraumbüros bewerteten alle untersuchten Aspekte der Beleuchtung und des Raumklimas schlechter als die Nutzer von Zellenbüros, darunter Luftqualität, Geräuschpegel, Blendung und das Raumklima insgesamt – eine hohe Nutzerzufriedenheit ist in Zellenbüros offensichtlich eher gegeben als in Großraumbüros.

Trotz der überwiegend positiven ästhetischen Bewertung von Ganzglasfassaden werden Fensterflächenanteile über 75 % im Mittel als „eher zu groß“ bewertet – viele Nutzer präferieren moderate Fensterflächenanteile um 60 %, die eine gute Tageslichtversorgung bieten können und im Sommer mit einem geringeren Überhitzungsrisiko für die Räume verbunden sind, auch wenn Nutzer den Sonnenschutz nicht (thermisch ideal) schließen, um den Sichtbezug nach außen nicht zu verlieren.

Bei der Wahl der Verglasung sollte nicht nur der Schutz vor Wärmeverlusten im Winter und vor Solareinträgen im Sommer beachtet werden, sondern auch die Auswirkungen auf das Lichtspektrum, ebenso bei Sonnen- und Blendschutzsystemen, wo in der Planungspraxis häufig gestalterische Überlegungen dominieren. Bei der Planung einer biologisch wirksamen (künstlichen) Beleuchtung sollte neben der Tageslichtversorgung auch die spektrale Transmission der Verglasung und des Sonnen- oder Blendschutzes beachtet werden.

Wenn die Wünsche der Nutzer – neben individuellen Bedürfnissen oder Vorlieben – an tageslichtversorgten Arbeitsplätzen von sich ändernden äußeren Einflüssen abhängen und somit nicht statisch sind, werden statische Systeme wie eine energieeffiziente Konstantlichtregelung kaum zur Zufriedenheit der Nutzer beitragen.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine möglichst einfach zu bedienende, in ihrer Helligkeit individuell anpassbare Kunstlichtlösung, die eine Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz deutlich oberhalb der normativen Mindestanforderungen zulässt, bei gutem Tageslichtangebot und individuell anpassbarem Sonnen- bzw. Blendschutz eine hohe Akzeptanz unter den Nutzern finden kann.

Die Untersuchung zeigt allerdings auch, dass einige Fragen noch nicht oder nicht abschließend geklärt sind.

An erster Stelle ist zu nennen, dass auch das Blendungsbewertungsverfahren DGP Blendung durch Tageslicht im Alltag in dieser Untersuchung nur mit begrenzter Zuverlässigkeit prognostizieren konnte. Der große Anteil der unerklärten Varianz deutet darauf hin, dass nicht alle relevanten Einflussgrößen berücksichtigt wurden.

Viele Nutzer sind unzufrieden mit der tageslichtabhängigen Regelung ihrer elektrischen Beleuchtung und mit der automatischen Steuerung ihres Sonnenschutzsystems. Sowohl die Einsparung von elektrischer Energie für die Beleuchtung als auch der Schutz vor Überhitzung im

Sommer sind für den Energieverbrauch von Gebäuden relevant. Die Lösung sollte daher nicht sein, auf die Regelung bzw. Steuerung zu verzichten, um Unzufriedenheit der Nutzer zu vermeiden, sondern sie zu optimieren:

Sonnen- bzw. Blendschutzsysteme sollten den großen Wunsch nach Aussicht berücksichtigen und gleichzeitig vor Blendung und Überhitzung schützen können. Die Steuer- bzw. Regelalgorithmen müssen einen für die Nutzer nachvollziehbaren Kompromiss der verschiedenen Anforderungen darstellen und sollten nicht einseitig auf den Schutz vor Solarstrahlung abzielen. Die Ergebnisse dieser Felduntersuchung zeigen auch das Optimierungspotential der tageslichtabhängigen Regelung von Kunstlicht. Bestehende statische Regelstrategien berücksichtigen weder individuelle Bedürfnisse der Nutzer noch Einflussfaktoren wie Außenbeleuchtungsstärke und Alter.

Hinsichtlich der jahreszeitlichen Unterschiede und des Einflusses des thermischen Komforts auf den visuellen Komfort konnte diese Untersuchung erste Hinweise geben. Falls sich in anderen Untersuchungen der Einfluss des thermischen Komforts und der Jahreszeiten auf den visuellen Komfort bestätigen sollte, wäre entgegen der Argumentation von Boyce (2001) eine Berücksichtigung des thermischen Komforts und auch der Jahreszeiten bei der Steuerung der Beleuchtung wünschenswert.

Eine weitere Untersuchung der Zusammenhänge ist notwendig, um Tageslicht möglichst weitgehend nutzen zu können und energieeffiziente Gebäude mit großer Nutzerakzeptanz planen zu können. Dabei sollten die Erfahrungen und Erwartungen der Nutzer ebenso berücksichtigt werden wie der Einfluss von wirksamen Eingriffsmöglichkeiten.

8 Literaturverzeichnis

- Abromeit, A. & Wagner, A. (2009). Low-cost Luminance Cameras with CMOS-Sensors. In A. K. Yener & L. D. Öztürk (Hrsg.), *Proceedings of Lux Europa 2009. Lighting and the environment*. 11th European Lighting Conference. (S. 1083–1086). Istanbul: Turkish National Committee on Illumination (ATMK).
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R. (2011). *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung* (Springer-Lehrbuch, 13., überarb. Aufl). Berlin [u.a.]: Springer.
- Begemann, S. H. A., van den Beld, G. J. & Tenner, A. D. (1997). Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20 (3), 231–239.
- Bikos, A. (2009). *QUANTA – Messtechnikentwicklung: kostengünstige multifunktionale Sensoren für Felduntersuchungen. Interner Bericht*.
- Boivin, D. B. & Czeisler, C. A. (1998). Resetting of circadian melatonin and cortisol rhythms in humans by ordinary room light. *NeuroReport*, 9 (5), 779–782.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler* (Springer-Lehrbuch, 4., überarbeitete Aufl). Heidelberg: Springer.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7., vollst. überarb. und erw. Aufl). Berlin [u.a.]: Springer.
- Boyce, P. (2001). Discussion of previously published papers: Comment 1 on 'Effect of thermal conditions and light source type on visual comfort appraisal' by C Laurentin, V Berrutto and M Fontoynt. *Lighting Research and Technology*, 33 (2), 137.
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. et al. (2001). Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *The Journal of Neuroscience*, 21 (16), 6405–6412.
- Brosius, F. (2004). *SPSS 12. Das mitp-Standardwerk* (Datenbanken). Bonn: Mitp.
- Brüderl, J. (2010). Kausalanalyse mit Paneldaten. In C. Wolf & H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (1. Aufl, S. 963–994). Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.
- Bühl, A. (2008). *SPSS 16. Einführung in die moderne Datenanalyse* (Scientific tools, Bd. 7332, 11., überarb. und erw. Aufl). München [u.a.]: Pearson Studium.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin BAuA. *Büroarbeit*. Zugriff am 13.03.2014. Verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Bueroarbeit/Bueroarbeit.html>
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (2011). Technische Regeln für Arbeitsstätten - Beleuchtung. ASR A3.4.
- Bundesregierung. (2014). Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. In *Bundesgesetzblatt* (S. 3951–3990).
- Chauvel, P., Collins, J. B., Dogniaux, R. & Longmore, J. (1982). Glare from windows: current views of the problem. *Lighting Research and Technology*, 14 (1), 31–46.
- Collins, B. L. (1975). *Windows and people: A literature survey. Psychological reaction to environments with and without windows*. : National Bureau of Standards, Washington, DC (USA) US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Institute for Applied Technology, Washington, DC 20234.

- Croissant, Y. & Millo, G. (2008). Panel data econometrics in R: The plm package. *Journal of Statistical Software*, 27 (2), 1–43.
- Daan, S., Albrecht, U., Van der Horst, G. T.J., Illnerova, H., Roenneberg, T., Wehr, T. A. et al. (2001). Assembling a Clock for All Seasons: Are There M and E Oscillators in the Genes? *Journal of Biological Rhythms*, 16 (2), 105–116.
- DIN 5034-2:1985-02 (1985-02). *Tageslicht in Innenräumen - Teil 2: Grundlagen*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 9241-6 (2001-03). *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 6: Leitsätze für die Arbeitsumgebung*. Berlin: Beuth.
- PrEN 15251:2005-07 (2005-07). *Bewertungskriterien für den Innenraum einschließlich Temperatur, Raumluftqualität, Licht und Lärm*. Berlin: Beuth.
- DIN 5035-6:2006-11 (2006-11). *Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 6: Messung und Bewertung*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 15251:2007-08 (2007-08). *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. Berlin: Beuth.
- DIN V 5031-100 (2009-06). *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren*. Berlin: Beuth.
- DIN 5034-5:2010-11 (2010-11). *Tageslicht in Innenräumen - Teil 5: Messung*. Berlin: Beuth.
- DIN 5034-1:2011-07 (2011-07). *Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 12464-1:2011-08 (2011-08). *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*. Berlin: Beuth.
- DIN V 18599-10:2011-12 (2011-12). *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth.
- DIN V 18599-4:2011-12 (2011-12). *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung*. Berlin: Beuth.
- Dostal, W. (2005). Beschäftigungsentwicklung und Beschäftigungsverhältnisse im Büro. In W. Schneider, A. Windel & B. Zwingmann (Hrsg.), *Die Zukunft der Büroarbeit. Bewerten, Vernetzen, Gestalten*. Initiativkreis INQA-Büro: Beiträge zu einer Konvention "Neue Qualität der Büroarbeit" im Rahmen der A+A 2003 (INQA-Bericht, Bd. 4, S. 69–84). Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für Neue Wiss.
- Duffy, J. F. & Wright, K. P. (2005). Entrainment of the human circadian system by light. *Journal of biological rhythms*, 20 (4), 326–338.
- Dumont, M. & Carrier, J. (1997). Daytime sleep propensity after moderate circadian phase shifts induced with bright light exposure. *Sleep*, 20 (1), 11–17.
- Ehrenstein, W. (1995). Circadian lighting systems. *International Lighting Review*, 2, 64–67.
- Ehrenstein, W. (2002). Das Auge stellt die biologische Uhr des Menschen. Konsequenzen für Lichtnutzung und Lichttechnik. In H. Kaase (Hrsg.), *Konferenzband Drittes Symposium Licht und Gesundheit*. Eine Sondertagung der TU Berlin und der Deutschen Gesellschaft für Photobiologie. Berlin: Kistmacher.
- Engel, U. & Reinecke, J. (1994). *Panelanalyse. Grundlagen, Techniken, Beispiele* (De Gruyter Lehrbuch). Berlin: Walter de Gruyter.

- Fan, D., Painter, B. & Mardaljevic, J. (2009). A data collection method for long-term field studies of visual comfort in real-world daylight office environments. In C. Demers & A. Potvin (Hrsg.), *Architecture energy and the occupant's perspective. PLEA 2009; proceedings of the 26th International Conference on Passive and Low Energy Architecture* (S. 251–256). Québec: Les Presses de L'Université Laval.
- Figueiro, M. G., Rea, M. S., Stevens, R. G. & Rea, A. C. (2002). Daylight and productivity - A possible link to circadian regulation. In EPRI/LRO (Hrsg.), *Light and Human Health: EPRI/LRO 5th International Lighting Research Symposium, The Lighting Research Office of the Electric Power Research Institute*. (S. 185–193). Palo Alto, CA.
- Galasiu, A. D. & Veitch, J. A. (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review. *Energy and Buildings*, 38 (7), 728–742.
- Gall, D. (2002). Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung. *Licht*, 54 (11/12), 1292–1297.
- Gall, D. (2004). Die Messung Circadianer Strahlungsgrößen. In H. Kaase (Hrsg.), *Konferenzband Viertes Symposium Licht und Gesundheit*. Eine Sondertagung der TU Berlin und der Deutschen Gesellschaft für Photobiologie. Berlin: Kistmacher.
- Gall, D., Vandahl, C., Jordanow, W. & Jordanowa, S. (2000). *Tageslicht und künstliche Beleuchtung. Bewertung von Lichtschutzeinrichtungen* (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschung, Fb, Bd. 882). Dortmund/Berlin: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Glickman, G., Hanifin, J. P., Rollag, M. D., Wang, J., Cooper, H. & Brainard, G. C. (2003). Inferior Retinal Light Exposure Is More Effective than Superior Retinal Exposure in Suppressing Melatonin in Humans. *Journal of Biological Rhythms*, 18 (1), 71–79.
- Gossauer, E. (2008). *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden. Eine Feldstudie*. Verfügbar unter <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000007727>
- Gramm, S., Aydınli, S., Völker, S. & Kaase, H. (2013). *Tageslichtnutzung in Wohn- und Arbeitsräumen zur Verbesserung der visuellen Behaglichkeit und der Aufenthaltsqualität. Abschlussbericht für die Zeit vom 01.09.2011 bis 31.03.2013 zum Forschungsprojekt*. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, TU Berlin.
- Gudd, N., Vandahl, C., Rudolph, H. & Schierz, C. (2008). Subjektive Bewertung der Helligkeit in Räumen mit unterschiedlichen Lichtfarben. In LiTG Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), *Licht 2008. Ilmenau, 10. bis 13. September 2008; 18. Gemeinschaftstagung* (S. 63–70). Berlin: LiTG.
- Halonen, L. & Lehtovaara, J. (1995). Need of individual control to improve daylight utilization and user's satisfaction in integrated lighting systems. In CIE Commission Internationale de l'Éclairage (Hrsg.), *Proceedings of the 23rd session of the CIE* (CIE, Bd. 119, Bd. 119, S. 200–203). Vienna: CIE Central Bureau.
- Hawighorst, M., Schweiker, M. & Wagner, A. (2012). Thermal Comfort in Naturally Ventilated Offices: Combined Analysis of Psychological and Physiological Aspects with Regard to Control. In *Proceedings of the 5th International Building Physics Conference (IBPC)* (S. 1019–1025).
- Hirning, M. B., Isoardi, G. L., Coyne, S., Garcia Hansen, V. R. & Cowling, I. (2013). Post occupancy evaluations relating to discomfort glare: A study of green buildings in Brisbane. *Building and Environment*, 59, 349–357.

- Hoepke, K.-P. (2007). *Geschichte der Fridericiana. Stationen in der Geschichte der Universität Karlsruhe (TH) von der Gründung 1825 bis zum Jahr 2000* (Veröffentlichungen aus dem Universitätsarchiv Karlsruhe, Bd. 1). Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe.
- Hopkinson, R. G. (1972). Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics*, 3 (4), 206–215.
- Hubalek, S. (2007). *LuxBlick. Messung der täglichen Lichtexposition zur Beurteilung der nicht-visuellen Lichtwirkungen über das Auge*. Dissertation, ETH Zürich. Zürich.
- Hubalek, S., Brink, M. & Schierz, C. (2010). Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood. *Lighting Research and Technology*, 42 (1), 33–50.
- Humboldt, W. v. (1864). *Briefe von Wilhelm von Humboldt an eine Freundin* (2. Aufl. d. Ausg. in einem Bande). Leipzig: Brockhaus.
- Hunt, D. (1979). The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy. *Building and Environment*, 14 (1), 21–33.
- Iwata, T. & Tokura, M. (1997). Position Index for a glare source located below the line of vision. *Lighting Research and Technology*, 29 (3), 172–178.
- Iwata, T., Kimura, K.-I., Shukuya, M. & Takano, K. (1990). Discomfort caused by wide-source glare. *Energy and Buildings*, 15 (3-4), 391–398.
- Jewett, M. E., Rimmer, D. W., Duffy, J. F., Klerman, E. B., Kronauer, R. E. & Czeisler, C. A. (1997). Human circadian pacemaker is sensitive to light throughout subjective day without evidence of transients. *The American journal of physiology*, 273 (5 Pt 2), R1800-9.
- Kaufman, J. (1984). *IES Lighting Handbook. Reference Volume*. New York.
- Klingenberg, H. & Seidl, M. (1978). Forderungen an Anstandsflächen und Fenster in Hinblick auf Kommunikation und Privatheit. *Kurzberichte aus der Bauforschung* (11), 857–862.
- Knoop, M. (2014). Innovative Beleuchtungssysteme für Sanierungen und Neubau. In Projektträger Jülich (Hrsg.), *EnOB-Symposium 2014 - Energieinnovationen in Neubau und Sanierung. Neues aus der Forschung für mehr Energieeffizienz, Raumkomfort, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit* (S. 77–81).
- Kokoschka, S. (1989). *Beleuchtung, Bildschirm, Sehen. Experimentelle und theoretische Untersuchungen*. Habilitation, Universität Karlsruhe. Karlsruhe.
- Laurentin, C., Berrutto, V. & Fontoyont, M. (2000). Effect of thermal conditions and light source type on visual comfort appraisal. *Lighting Research and Technology*, 32 (4), 223–233.
- Logadóttir, A., Christoffersen, J. & Fotios, S. (2011). Investigating the use of an adjustment task to set the preferred illuminance in a workplace environment. *Lighting Research and Technology*, 43 (4), 403–422.
- Mahdavi, A., Mohammadi, A., Kabir, E. & Lambeva, L. (2008). Occupants' operation of lighting and shading systems in office buildings. *Journal of Building Performance Simulation*, 1 (1), 57–65.
- Maniccia, D., Rutledge, B., Rea, M. S. & Morrow, W. (1999). Occupant Use of Manual Lighting Controls in Private Offices. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 28 (2), 42–56. Verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1080/00994480.1999.10748274>
- Moosmann, C. (2003). *Leuchtdichteverteilung an Bildschirmarbeitsplätzen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe. Karlsruhe. Zugriff am 06.04.2014.
- Moosmann, C. (2004). Feldstudie zur Blendungsbewertung am Bildschirmarbeitsplatz. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft GfA (Hrsg.), *Arbeit + Gesundheit in effizienten Arbeitssystemen. 50. Frühjahrskongress Zürich* (2004], S. 369–372). Dortmund: GfA-Press.

- Moosmann, C., Wienold, J., Wagner, A. & Wittwer, V. (2012). *Ermittlung relevanter Einflussgrößen auf die subjektive Bewertung von Tageslicht zur Bewertung des visuellen Komforts in Büroräumen*. Abschlussbericht. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie KIT (Karlsruhe). Verfügbar unter urn:nbn:de:swb:90-349684
- Morris, J. D. (1995). Observations: SAM: the Self-Assessment Manikin an efficient cross-cultural measurement of emotional response. *Journal of advertising research*, 35 (6), 63–68.
- Nicol, J. F. & Humphreys, M. A. (1973). Thermal comfort as part of a self-regulating system. *Building Research and Practice*, 1 (3), 174–179.
- Ohr, D. (2010). Lineare Regression: Modellannahmen und Regressionsdiagnostik. In C. Wolf & H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (1. Aufl, S. 639–675). Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.
- Plesser, S., Bremer, C., Hemminger, U. & Fisch, M. N. (2007). EVA – Forschungsprojekt Evaluierung von Energiekonzepten: Auf dem Prüstand IX. *Xia. Intelligente Architektur. Zeitschrift für Architektur und Technik* (59), 58–64.
- Rea, M. S. (1984). Window blind occlusion: a pilot study. *Building and Environment*, 19 (2), 133–137.
- Rea, M. S., Bullough, J. D. & Figueiro, M. G. (2001). Human melatonin suppression by light: a case for scotopic efficiency. *Neuroscience Letters*, 299 (1-2), 45–48.
- Reinhart, C. F. (2001). *Daylight availability and manual lighting control in office buildings. Simulation studies and analysis of measurement*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Schakib-Ekbatan, K., Wagner, A. & Lützkendorf, T. (2012). *Bewertung von Aspekten der soziokulturellen Nachhaltigkeit im laufenden Gebäudebetrieb auf Basis von Nutzerbefragungen* (Forschungsinitiative ZukunftBau, F 2813). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.
- Schierz, C. (2002). Leben wir in der „biologischen Dunkelheit“? In Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde (NSVV) (Hrsg.), *Licht 2002. Maastricht, 22. bis 25. September 2002; 15. Gemeinschaftstagung* (S. 381–389). Maastricht: LiTG.
- Schierz, C. (2004). Wahrnehmung und Bewertung künstlich beleuchteter Räume. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 58 (2), 74–83.
- Schierz, C. (2008). Licht für die ältere Bevölkerung – physiologische Grundlagen und ihre Konsequenzen. In LiTG Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (Hrsg.), *Licht 2008. Ilmenau, 10. bis 13. September 2008; 18. Gemeinschaftstagung* (S. 32–41). Berlin: LiTG.
- Schierz, C. & Krueger, H. (2002). Vor- und Nachteile intensiver Beleuchtung am Büroarbeitsplatz. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft - Sonderausgabe ERGONOMIE IM BÜRO*, 56 (4), 269–274.
- Schmitz, H. J. (2003). *Tageslicht im Atrium. Akzeptanz von Arbeitsplatzbedingungen in Büros an Atrien unter besonderer Berücksichtigung der Tageslichtverhältnisse*. Marburg: Tectum-Verlag.
- Schotte, W. (2011). *Bildverarbeitung von Leuchtdichtebildern. Interner Bericht*.
- Seidl, M. (1978). *Ausreichendes Tageslicht und akzeptable Fensterabmessungen in Wohnräumen*. Dissertation, Technische Universität. Berlin.
- Smolders, K. C. H. J. & Kort, Y. A. W. de. (2012). Bright Light Effects on Mental Fatigue. In Y. A. W. de Kort, M. P. J. Aarts, F. Beute, A. Haans, W. A. IJsselsteijn, D. Lakens et al. (Hrsg.), *Proceedings of Experiencing Light 2012. International conference on the Effects of Light on Wellbeing*.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2004). *Demographische Standards. Eine gemeinsame Empfehlung des Arbeitskreises Deutscher Markt und Sozialforschungsinstitute e. V. (ADM), der*

Arbeitsgemeinschaft Sozialwissenschaftlicher Institute e. V. (ASI) und des Statistischen Bundesamtes (Methoden – Verfahren – Entwicklungen, 4. Aufl.).

Statistisches Bundesamt. (2014, 13. März). *Staat & Gesellschaft - Zeitverwendung. Tabellenband I zur Zeitbudgeterhebung 2001/02. Aktivitäten in Stunden und Minuten nach Geschlecht, Alter und Haushaltstyp.* Zugriff am 13.03.2014. Verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Zeitverwendung/Zeitverwendung.html>

Tuaycharoen, N. & Tregenza, P. R. (2005). Discomfort glare from interesting images. *Lighting Research and Technology*, 37 (4), 329–338.

Tuaycharoen, N. & Tregenza, P. R. (2007). View and discomfort glare from windows. *Lighting Research and Technology*, 39 (2), 185–200.

Veitch, J. A. & Gifford, R. (1996). Assessing Beliefs about Lighting Effects on Health, Performance, Mood, and Social Behavior. *Environment and Behavior*, 28 (4), 446–470.

Veitch, J. A. (2001). Psychological processes influencing lighting quality. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 30 (1), 124–140.

Völkle, M. C. & Erdfelder, E. (2010). Varianz- und Kovarianzanalyse. In C. Wolf & H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (1. Aufl, S. 455–493). Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.

Wagner, A., Gossauer, E., Moosmann, C., Gropp, T. & Leonhart, R. (2007). Thermal comfort and workplace occupant satisfaction - Results of field studies in German low energy office buildings. *Energy and Buildings*, 39 (7), 758–769.

Wagner, A. & Schakib-Ekbatan, K. (2011). Nutzerzufriedenheit als Maß zur Arbeitsplatzbewertung im Büro. In C. Schittich (Hrsg.), *im DETAIL: Arbeitswelten. Raumkonzepte, Mobilität, Kommunikation* (Edition Detail, neue Ausg, S. 54–57). München: Institut f. intern. Architektur-Dok.

Wambsganß, M., Fröhlich, S., Klingele, M. & Wagner, A. (2004). *enerkenn. Energiekennwerte und Gebäudeanalysen für neun Verwaltungsgebäude der Deutsche Bahn AG - Geschäftsbereich Netz. Abschlussbericht.* Karlsruhe: fbta, Universität Karlsruhe.

Weins, C. (2010). Uni- und bivariate deskriptive Statistik. In C. Wolf & H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (1. Aufl, S. 65–89). Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.

Wienold, J. (2008). Blendschutz. In C. Russ, H. R. Wilson, J. de Boer, A. Georg, T. Kuhn, E. Lindauer et al. (Hrsg.), *Sonnenschutz. Schutz vor Überwärmung und Blendung.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Wienold, J. (2009). *Daylight glare in offices*, Universität Karlsruhe. Karlsruhe.

Wienold, J. & Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*, 38 (7), 743–757.

Wirz-Justice, A. & Fournier, C. (2010). Light, Health and Wellbeing: Implications from chronobiology for architectural design. *World Health Design*, 8, 44–49.

Wirz-Justice, A. (2009). From the basic neuroscience of circadian clock function to light therapy for depression: on the emergence of chronotherapeutics. *Journal of affective disorders*, 116 (3), 159–160.

Wolf, C. & Best, H. (Hrsg.). (2010a). *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (1. Aufl). Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.

- Wolf, C. & Best, H. (2010b). Lineare Regressionsanalyse. In C. Wolf & H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (1. Aufl, S. 607–638). Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.
- Youngstedt, S. D., Kripke, D. F. & Elliott, J. A. (2002). Circadian phase-delaying effects of bright light alone and combined with exercise in humans. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 282 (1), R259-66.
- Zagreus, L., Huizenga, C., Arens, E. & Lehrer, D. (2004). Listening to the occupants: a Web-based indoor environmental quality survey. *Indoor air*, 14 Suppl 8, 65–74.
- Zeitzer, J. M., Dijk, D. J., Kronauer, R., Brown, E. & Czeisler, C. (2000). Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *The Journal of physiology*, 526 (8), 695–702.

Anhang

I. Fragebogen und Formulare der Auf- und Abbauprotokolle

A1 Fragebogen



Nutzerakzeptanz von Tageslicht in Bürogebäuden

Liebe Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter,

im Rahmen des Forschungsprojektes Quanta, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird, führen wir in Ihrem Büro **Komfort-Messungen** zu Helligkeit, Raumtemperatur, Luftfeuchte und Schalldruckpegel durch. Diese Messungen finden im Zeitraum von einem Jahr insgesamt vier Mal im Abstand von 3 Monaten statt – also in jeder Jahreszeit einmal – und dauern jeweils ca. 2 Wochen.

Am Ende jeder Messperiode, also vier Mal, werden wir einen Fragebogen austeilen, der Ihre persönliche Einschätzung des Raumklimas erfassen soll.

Ziel der Untersuchung ist es, optimale Lichtbedingungen bzw. Probleme mit vorhandenen Situationen kennen zu lernen, um Bildschirmarbeitsplätze so planen zu können, dass sie den Wünschen der NutzerInnen besser entsprechen. Dafür sollen Sie **heute**, am Ende der zweiwöchigen Messungen, Ihre Arbeitsplätze im Alltag beurteilen.

Bitte füllen Sie den Fragebogen im Lauf des Vormittags aus und lassen Sie ihn an Ihrem Arbeitsplatz liegen. Gegen 11:00 Uhr beginnen wir mit dem Abbau der Messgeräte und sammeln auch die Fragebögen ein, die wir den Arbeitsplätzen zuordnen müssen.

Ihre Mitarbeit ist freiwillig. Für eine aussagekräftige Auswertung ist es jedoch äußerst wichtig, dass möglichst **alle** Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, in deren Büros Messungen stattfindenden, den Fragebogen ausfüllen und auch an den weiteren Befragungen teilnehmen.

Füllen Sie bitte den Fragebogen aus, und antworten Sie offen und ehrlich. Zögern Sie nicht, sich an uns zu wenden, wenn Sie irgendwelche Fragen oder Zweifel haben. Ihre eigene Meinung ist von größtem Interesse für uns und wird **diskret** ausschließlich dem wissenschaftlichen Personal zugänglich sein, welches sich um die Statistiken kümmert. Einige Fragen zu Ihrer Person und die Zuordnung von Befragung und Messwerten sind notwendig, die Auswertung der Daten erfolgt **anonym**.

Die **Ergebnisse der Befragung** werden sicherlich spannende und neue Informationen zu Ihrem Gebäude beinhalten, die Sie nach Abschluss der Untersuchung erhalten. So können Ihre Angaben helfen, künftig Arbeitsplätze nutzerfreundlicher zu gestalten.

Bei Fragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung!

Cornelia Moosmann

Dipl.-Ing. Cornelia Moosmann

Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Architektur
Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau
Englerstr. 7, 76131 Karlsruhe
Tel: 0721 608 6442
Mobil: 0163-3848906
E-mail: cornelia.moosmann@fbta.uni-karlsruhe.de

Viel Spaß beim Ausfüllen und vielen Dank schon jetzt für Ihre Mitarbeit!

Hinweise zum Fragebogen

Der Fragebogen ist unterteilt in Fragen zum Gebäude, zur Lichtsituation, dem Fenster, Ihrer Zufriedenheit mit Temperatur, Feuchte, Lüftung, Geräusche, mit Gestaltung und Sauberkeit sowie Fragen über Sie selbst. Die Beantwortung des Bogens dauert ca. 20-30 Minuten.

Bitte gehen Sie die Fragen der Reihe nach durch, und beantworten Sie die Fragen, indem Sie die entsprechende Antwort ankreuzen.

Wenn Sie ein Kreuz falsch gesetzt haben, streichen Sie das falsche Kreuz bitte deutlich durch, und setzen Sie ein Kreuz an die gewünschte Stelle.

Bitte setzen Sie die Kreuze in die Kästchen. Kreuze zwischen oder neben den Kästchen können nicht ausgewertet werden.

Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten, Ihr **persönlicher Eindruck** ist uns wichtig.

Beachten Sie bitte, dass sich die Fragen auf unterschiedliche Zeiträume beziehen. Teilweise geht es um Ihr momentanes Befinden, teilweise um die vergangenen zwei Wochen, also den Messzeitraum.

Bitte beantworten Sie jede Frage. Wenn Sie eine Frage nicht beantworten möchten, kreuzen Sie bitte „keine Angabe“ an.

Mein persönlicher Code:

- 1. ___ erster Buchstabe des Geburtsortes
- 2. ___ zweiter Buchstabe des Vornamens der Mutter
- 3. ___ zweiter Buchstabe des eigenen Vornamens
- 4. ___ erster Buchstabe des Vornamens des Vaters

Sinn des Codes ist, aus Forschungsgründen eine Zuordnung der von Ihnen ausgefüllten Bögen untereinander und zu den Messdaten vornehmen zu können.

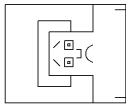
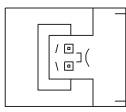
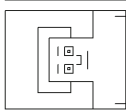
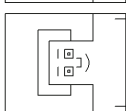
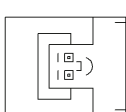

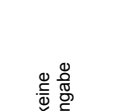
Bitte tragen Sie hier das **Datum** und die **Uhrzeit** ein, wann Sie mit dem Ausfüllen beginnen.

Datum _____ Uhrzeit _____

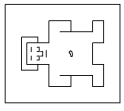
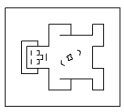
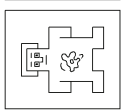
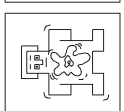
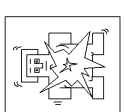

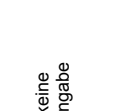
Allgemeine Fragen zu Ihrer Befindlichkeit und zu Ihrer Arbeit

1. Welches der Bilder in jeder Reihe beschreibt Ihr Befinden im Moment am besten? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz unter ein Bild oder zwischen zwei Bilder)

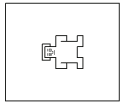
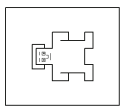
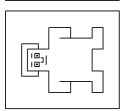
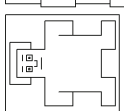
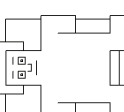

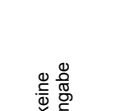
Welches dieser Bilder beschreibt am besten, wie unglücklich oder glücklich Sie sich im Moment fühlen?

							keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welches dieser Bilder beschreibt am besten, wie ruhig oder aufgeregt Sie sich im Moment fühlen?

							keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welches dieser Bilder beschreibt am besten, wie selbstbestimmt Sie sich im Moment fühlen?

							keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2. Seit wann arbeiten Sie in diesem Gebäude? (Bitte geben Sie auch den Monat an, falls Sie kürzer als 1 Jahr in diesem Gebäude arbeiten.)

Jahr _____ Monat _____ keine Angabe

3. Seit wann arbeiten Sie an diesem Platz in diesem Raum?

(Bitte geben Sie auch den Monat an, falls Sie kürzer als 1 Jahr in diesem Raum arbeiten. Bitte kreuzen Sie an, wenn dies nicht Ihr üblicher Arbeitsplatz ist und geben Sie an, seit wie vielen Tagen Sie hier arbeiten.)

Jahr _____ Monat _____ keine Angabe

Dies ist nicht mein üblicher Arbeitsplatz, ich arbeite hier seit _____ Tag/en.

4. Zu welchem Anteil sind die folgenden **Tätigkeiten** Teil Ihrer üblichen Arbeit?
(Angaben in %)

% Bildschirmarbeit
 % Schreibtischarbeit einschließlich Telefonieren
 % Besprechungen in diesem Raum
 % Tätigkeiten außerhalb dieses Raumes und zwar: _____

keine Angabe

5. Wie stark haben folgende Faktoren in den **letzten 2 Wochen** Ihre Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz **beeinträchtigt**? (Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

	sehr stark beeinträchtigt	überhaupt nicht beeinträchtigt	keine Angabe
Beleuchtung.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Geräusche.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Raumtemperatur.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Luftqualität.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gerüche.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Büroausstattung.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Probleme mit Computern.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sauberkeitszustand.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sonstiges und zwar: _____

6. Wie stark fühlen Sie sich im **Moment** durch das **Raumklima** (einschließlich Belichtung, Temperatur, Luftfeuchte, Luftqualität, Geräusche etc.) in Ihrer Arbeitsleistung **beeinträchtigt**?

sehr stark beeinträchtigt	überhaupt nicht beeinträchtigt	keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz

7. Wie empfinden Sie im **Moment** das Licht an Ihrem **Arbeitsplatz**?
(Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

sehr dunkel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr hell	keine Angabe
sehr gleichmäßig beleuchtet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr ungleichmäßig beleuchtet	<input type="checkbox"/>
Ich hätte es lieber... deutlich dunkler	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	deutlich heller	<input type="checkbox"/>

8. Wie bewerten Sie das Beleuchtungsniveau im **fensterfernen** Teil des Raumes im **Moment**? (Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

sehr dunkel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr hell	keine Angabe
Ich hätte es lieber... deutlich dunkler	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	deutlich heller	<input type="checkbox"/>

9. Wie beurteilen Sie die **Größe der gesamten Fensterfläche** in Ihrem Raum?
keine Angabe

zu klein zu groß

10. Wie oft empfanden Sie **während der letzten zwei Wochen**?
(Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

	eigentlich immer	eigentlich nie	keine Angabe
Blendung durch das Fenster...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf dem Bildschirm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf dem Tisch.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf den Wänden.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

11. Empfinden Sie im **Moment**? (Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

nicht tolerierbar	störend	wahr- nehmbar	nicht wahr- nehmbar	keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Blendung durch das Fenster...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf dem Bildschirm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf dem Tisch.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf den Wänden.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich hätte im **Moment** lieber viel ein bisschen unver-
ändert

weniger	weniger	unver- ändert	keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Blendung durch das Fenster...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf dem Bildschirm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf dem Tisch.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Reflexionen auf den Wänden.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

12. Wie wichtig sind Ihnen in **dieser Jahreszeit**...? (Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

gar nicht wichtig	sehr wichtig	keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Blend- bzw. Sonnenschutz.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
der Ausblick nach draußen.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
das Wahrnehmen des Wetters.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
das Wahrnehmen des Sonnenstands.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

13. Wenn Sie aus dem Fenster sehen, empfinden Sie Ihre **Aussicht in dieser Jahreszeit**
als eingeschränkt durch.....? (Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

sehr stark eingeschränkt	überhaupt nicht eingeschränkt	keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fenstergröße.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sonnenschutz.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nachbargebäude / Gebäudeteile.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bäume.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

14. Wie empfinden Sie **den Blick aus Ihrem Fenster** in dieser Jahreszeit?
(Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

unangenehm	angenehm	keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
langweilig	interessant	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

15. Wie zufrieden sind Sie mit der **Orientierung** Ihres Arbeitsplatzes **zum Fenster** / zu den Fenstern?

sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

16. **Insgesamt** betrachten Sie **innerhalb der letzten zwei Wochen** die Beleuchtungssituation durch **Tageslicht**...? *(bitte in jeder Zeile ein Kreuz)*

an Ihrem Arbeitsplatz..... zu dunkel keine Angabe

im gesamten Raum..... zu hell keine Angabe

am Bildschirm.....

Sonnenschutz, Blendschutz

17. Falls Sie in den **letzten zwei Wochen** den Sonnen- oder Blendschutz **verändert** haben, was waren die **Gründe** dafür?

Grund für die Veränderung war meistens *(bitte alles Zutreffende ankreuzen)*:
 Es war zu dunkel / zu hell im Raum.
 Es war zu dunkel / zu hell am Schreibtisch.
 Das Tageslicht hat geblendet.
 Es war zu warm.
 Ich wollte eine bessere Aussicht haben.
 Sonstiges und zwar: _____
 keine Angabe

18. In welcher Stellung waren die **Lamellen im Sichtbereich** in den **vergangenen zwei Wochen** meistens? *(Bitte nur 1 Fall ankreuzen)*

keine Angabe

keine Lamellen im Sichtbereich (Lamellen nur oberhalb des Sichtbereiches oder überhaupt nicht heruntergefahren)
 Lamellen im Sichtbereich offen (waagrecht)
 Lamellen im Sichtbereich teilweise geschlossen (schräg)
 Lamellen im Sichtbereich vollständig geschlossen (senkrecht)

19. Wie zufrieden sind Sie mit folgenden Aspekten des **Sonnenschutzes (Außenjalousie)**? *(bitte in jeder Zeile ein Kreuz)*

Anpassung der Lichtmenge.....	sehr unzufrieden <input type="checkbox"/>	zufrieden <input type="checkbox"/>	keine Angabe <input type="checkbox"/>
Schutz vor Blendung.....	sehr unzufrieden <input type="checkbox"/>	zufrieden <input type="checkbox"/>	keine Angabe <input type="checkbox"/>
Ausblick bei heruntergelassenem Sonnenschutz.....	sehr unzufrieden <input type="checkbox"/>	zufrieden <input type="checkbox"/>	keine Angabe <input type="checkbox"/>
Material des Sonnenschutzes.....	sehr unzufrieden <input type="checkbox"/>	zufrieden <input type="checkbox"/>	keine Angabe <input type="checkbox"/>

Falls Ihr Büro auch mit einem **Blendschutz (innenliegendes Rollo)** ausgestattet ist: Wie zufrieden sind Sie mit folgenden Aspekten des **Blendschutzes**?

Schutz vor Blendung.....	sehr unzufrieden <input type="checkbox"/>	zufrieden <input type="checkbox"/>	keine Angabe <input type="checkbox"/>
Ausblick bei geschlossenem Blendschutz.....	sehr unzufrieden <input type="checkbox"/>	zufrieden <input type="checkbox"/>	keine Angabe <input type="checkbox"/>

20. Wie zufrieden sind Sie mit der **Bedienbarkeit** Ihres Sonnenschutzes (Außenjalousie)?

sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

Falls Ihr Büro auch mit einem **Blendschutz (innenliegendes Rollo)** ausgestattet ist: Wie zufrieden sind Sie mit der **Bedienbarkeit** Ihres **Blendschutzes**?

sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

21. Wie zufrieden sind Sie mit der **automatischen Steuerung** Ihres Sonnenschutzes?

sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

22. Wie beurteilen Sie **ganz allgemein** die Beleuchtung Ihres Arbeitsplatzes durch **Tageslicht ohne Verschattung** der Fenster in dieser Jahreszeit? *(Bitte geben Sie bei „sehr schlecht“ bis „mittelmäßig“ den Grund an.)*

sehr schlecht mittelmäßig sehr gut keine Angabe

Grund: _____

23. Wie beurteilen Sie **ganz allgemein** die Beleuchtung Ihres Arbeitsplatzes durch **Tageslicht mit Verschattung** der Fenster in dieser Jahreszeit? *(Bitte geben Sie bei „sehr schlecht“ bis „mittelmäßig“ den Grund an.)*

sehr schlecht mittelmäßig sehr gut keine Angabe

Grund: _____

Künstliche Beleuchtung

24. Wie häufig wurden Sie in den **letzten zwei Wochen** durch die **künstliche Beleuchtung** geblendet? *(bitte in jeder Zeile ein Kreuz)*

durch die Leuchte(n).....	immer <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	keine Angabe <input type="checkbox"/>
durch Reflexionen auf der Tischfläche.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
durch Reflexionen auf dem Bildschirm.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

durch Sonstiges und zwar: _____

25. **Insgesamt** betrachten Sie **innerhalb der letzten zwei Wochen** die Beleuchtungssituation durch **Kunstlicht**...? *(bitte in jeder Zeile ein Kreuz)*

an Ihrem Arbeitsplatz.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	keine Angabe <input type="checkbox"/>
im gesamten Raum.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
am Bildschirm.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Gesundheitliche Beschwerden und Arbeitssituation

54. Wie häufig litt Sie in den vergangenen 2 Wochen während Ihrer Arbeitszeit unter folgenden gesundheitlichen Beschwerden? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

	fast immer	fast nie	keine Angabe
rasche Ermüdung.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kopfschmerzen.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
trockene Nase.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
trockene Augen.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
trockene Haut/ Kopfhaut.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Halsschmerzen.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
laufende Nase.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
tränen Augen.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verspannungen: wo?.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Anmerkung _____

55. Wie stark haben Sie in den vergangenen 2 Wochen folgende Bedingungen an Ihrem Arbeitsplatz belastet? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

	sehr stark	überhaupt nicht	keine Angabe
häufiger Leerlauf.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ständiger Wechsel von Tätigkeiten.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zeitdruck, Hektik.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
häufige Störungen / Unterbrechungen.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
hohe Verantwortung.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

56. Wie oft mussten Sie sich bei folgenden Punkten in den vergangenen zwei Wochen mit Kollegen abstimmen? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

	immer	nie	keine Angabe
Betätigung des Sonnen-/Blendschutzes.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ein- / Ausschalten des Kunstlichtes.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einstellung der Raumtemperatur.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lüftung des Büros.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Öffnen / Schließen der Bürotür.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sonstiges und zwar: _____

57. Bei welchen der folgenden Punkte wünschen Sie sich, dass Sie sich weniger mit Kollegen abstimmen müssen? (Mehrfachauswahl möglich)

	lieber viel weniger abstimmen	nicht weniger abstimmen	keine Angabe
Betätigung des Sonnen-/Blendschutzes.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ein- / Ausschalten des Kunstlichtes.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Einstellung der Raumtemperatur.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lüftung des Büros.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Öffnen / Schließen der Bürotür.....	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sonstiges und zwar: _____

58. Wie zufrieden sind Sie alles in allem mit Ihrer Arbeitstätigkeit in diesem Betrieb?

sehr unzufrieden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr zufrieden	<input type="checkbox"/>	keine Angabe	<input type="checkbox"/>
------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------	--------------------------	--------------	--------------------------

59. Wie zufrieden sind Sie alles in allem mit Ihrem Platz in Ihrem Büroraum (einschließlich aller abgefragter Faktoren wie Beleuchtung, Luftqualität, räumliche Gegebenheiten etc...)?

sehr unzufrieden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr zufrieden	<input type="checkbox"/>	keine Angabe	<input type="checkbox"/>
------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------	--------------------------	--------------	--------------------------

60. Wie zufrieden sind Sie im Moment insgesamt mit dem Raumklima (einschließlich Belichtung, Temperatur, Luftfeuchte, Luftqualität, Geräusche etc.)?

sehr unzufrieden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr zufrieden	<input type="checkbox"/>	keine Angabe	<input type="checkbox"/>
------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------	--------------------------	--------------	--------------------------

61. Was würden Sie, wenn Sie die Möglichkeit hätten, momentan am ehesten an Ihrem Platz in Ihrem Büroraum verändern? (bitte maximal 4 Punkte benennen)

<input type="checkbox"/> überhaupt nichts	<input type="checkbox"/>	keine Angabe	<input type="checkbox"/>
---	--------------------------	--------------	--------------------------

1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

Persönliche Angaben

62. Was ist Ihr Geschlecht?

<input type="checkbox"/> weiblich	<input type="checkbox"/>	keine Angabe	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> männlich	<input type="checkbox"/>		

63. In welchem Jahr sind Sie geboren?

_____	<input type="checkbox"/>	keine Angabe	<input type="checkbox"/>
-------	--------------------------	--------------	--------------------------

64. Tragen Sie während der Arbeit eine Sehhilfe?

<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/>	keine Angabe	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> ja, und zwar.....	<input type="checkbox"/>		

immer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
eine Brille	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kontaktlinsen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

65. Halten Sie sich für empfindlich gegenüber hellem Licht?

<input type="checkbox"/> sehr empfindlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	überhaupt nicht empfindlich	<input type="checkbox"/>	keine Angabe	<input type="checkbox"/>
---	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	-----------------------------	--------------------------	--------------	--------------------------

66. Leiden Sie unter einer Augenkrankheit?

- nein, keine Augenkrankheit bekannt
 ja, Farbenblindheit oder Farbfehlsichtigkeit (z.B. Rot-Grün-Sehschwäche)
 ja, sonstige Augenkrankheit und zwar _____

keine Angabe

67. Sind Sie Links- oder Rechtshänder?

- Rechtshänder
 Linkshänder

keine Angabe

68. In welcher beruflichen Stellung sind Sie derzeit beschäftigt?

keine Angabe

- Akademiker/in in freiem Beruf (Arzt/Ärztin, Rechtsanwalt/-anwältin, Steuerberater/in)
 Selbständig im Handel, Gewerbe, Handwerk, Industrie, Dienstleistung
Beamter/Beamtin, und zwar ...
 im einfachen Dienst (bis einschl. Oberamtsmeister/in)
 im mittleren Dienst (von Assistent/in bis einschl. Hauptsekretär/in, Amtsinspektor/in)
 im gehobenen Dienst (von Inspektor/in bis einschl. Oberamtsrat/-rätin)
 im höheren Dienst (von Rat/Rätin aufwärts)

Angestellter, und zwar ...

- mit ausführender Tätigkeit nach allgemeinen Anweisung (z.B. Kontorist/in, Datentypist/in)
 mit einer qualifizierten Tätigkeit, die nach Anweisung erledigt werden (z.B. Sachbearbeiter/in, Buchhalter/in, technischer Zeichner/in)
 mit eigenständiger Leistung in verantwortlicher Tätigkeit bzw. mit Fachverantwortung für Personal (z.B. wissenschaftlicher Mitarbeiter/in, Prokurist/in, Abteilungsleiter/in bzw. Meister/in im Angestelltenverhältnis)
 mit umfassenden Führungsaufgaben und Entscheidungsbefugnissen (z.B. Direktor/in, Geschäftsführer/in, Mitglied des Vorstandes)
 Auszubildender/
 Sonstiges: _____

69. Wie sind Ihre üblichen Arbeitszeiten?

keine Angabe

von _____ Uhr bis _____ Uhr an folgenden Wochentagen _____
von _____ Uhr bis _____ Uhr an folgenden Wochentagen _____
Anmerkungen _____

70. Haben Sie in den letzten 2 Wochen zu Ihren üblichen Arbeitszeiten gearbeitet?

keine Angabe

- ja
 nein, ... ich hatte Urlaub von _____ bis _____
 Sonstiges, und zwar: _____

71. Wenn Sie uns noch irgend etwas über Ihren Arbeitsplatz oder diesen Fragebogen mitteilen möchten, können Sie dies hier tun:

Mängel im Gebäude:

positive Anmerkungen zum Gebäude:

Kommentare zum Fragebogen

Uhrzeit bei Beendigung des Fragebogens: _____:_____:____ Uhr

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

Anhang

A2 Formulare der Auf- und Abbauprotokolle



Quanta – Fragebogen für Interviewer (Aufbau)

Gebäude: _____ Datum: ____ . ____ . ____ : ____ Uhr

Protokollführer: _____

1. Geschoss _____
2. Raumnummer _____
3. Anzahl Arbeitsplätze _____

Messtechnik - Abstand der aufgebauten Messtechnik zum Fenster festhalten!

4. Leuchtlichte-Kamera Nr.: _____ elcam-_____ Entfernung vom Fenster _____m
Datum und Zeit einstellen!
5. zyl. Beleuchtungsstärke: zyl-_____
6. Temperatur, Feuchte, Schall: schall-_____ Entfernung vom Fenster _____m
7. spektrale Verteilung: rgb-_____ Entfernung vom Fenster _____m
8. Kunstlicht: licht-_____ fensterfern fensternah
9. Temperatur, Feuchte zusätzl.: temp-_____ Entfernung vom Fenster _____m

Kunstlicht, Sonnenschutz, Ausblick

(Licht einschalten für Messwert, falls es nicht an ist)

10. Leuchtenanzahl + -art, Anzahl Lampen im Raum + Wattage
- | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| _____ x Ein-/Anbaudeckenleuchte | <input type="checkbox"/> direkt | <input type="checkbox"/> dir/indir. | <input type="checkbox"/> indirekt | _____ x _____W |
| _____ x Deckenleuchte abgehängelt | <input type="checkbox"/> direkt | <input type="checkbox"/> dir/indir. | <input type="checkbox"/> indirekt | _____ x _____W |
| _____ x Stehleuchte | <input type="checkbox"/> direkt | <input type="checkbox"/> dir/indir. | <input type="checkbox"/> indirekt | _____ x _____W |
| _____ x Arbeitsplatzleuchte | <input type="checkbox"/> direkt | <input type="checkbox"/> dir/indir. | <input type="checkbox"/> indirekt | _____ x _____W |
| _____ x _____ | <input type="checkbox"/> direkt | <input type="checkbox"/> dir/indir. | <input type="checkbox"/> indirekt | _____ x _____W |

11. Gruppierung Kunstlicht

eine Gruppe

 getrennt fensterfern / fensternah

12. Steuerung Kunstlicht

- nur schaltbar
 präsenzabhängig geschaltet
 manuell dimmbar

 tageslichtabhängig geschaltet
 tageslichtabhängig gedimmt

13. Verschattung ist ...

- automatisch gesteuert (GLT), überstimbar
 automatisch gesteuert (GLT), nicht überstimbar
 nur manuell bedienbar
 nicht vorhanden

14. Blendschutz ist ...

- manuell bedienbar
 nicht vorhanden

15. Der Ausblick ist behindert durch

- Gebäude

 Bäume
 nicht behindert

16. Heizung

- freie Heizflächen
 bauteilintegriert (Fußboden-, Wand-, Deckenheizung)
 Heizung mit Zuluft

17. Heizungsregelung

- Thermostatventil

18. Fensterlüftung möglich?

- ja, Fensterlüftung möglich
 nein, Fenster nicht öffenbar

19. Lüftungsanlage vorhanden?

- ja, _____
 nein

20. Ventilator vorhanden?

- ja, _____
 nein

Raumgeometrie

21. Anzahl Fenster im Format a / b / c / d

Anzahl Format a _____ Anzahl Format b _____
Anzahl Format c _____ Anzahl Format d _____

22. Fenster Maße Format a / b / c / d

Breite [m] a _____ Breite [m] b _____
Höhe [m] a _____ Höhe [m] b _____
Breite [m] c _____ Breite [m] d _____
Höhe [m] c _____ Höhe [m] d _____

23. Himmelsrichtung der Fenster _____

24. Foto vom Raum (nur mit Erlaubnis der Probanden!) Nr. _____

Skizze mit Raummaßen, Fenster, Einrichtungsgegenständen + Nummerierung der Arbeitsplätze:

Messungen

25. Beleuchtungsstärke bei max. Lichtstrom: Messwert um _____: _____ Uhr
Licht in den Originalzustand versetzen

Beschreibung des einzelnen Arbeitsplatzes

1. Arbeitsplatz-Nummer _____

2. Welche Sensoren befinden sich an diesem Arbeitsplatz?

- Elcam Schall RGB
 licht-_____ fensterfern fenstermah
 Temperatur kein Messgerät

3. Monitor

- Flachbildschirm Röhrenbildschirm
 beides kein Bildschirm

4. Darstellungsart

- positiv (heller Hintergrund) negativ (dunkler Hintergrund)

5. Wie ist der Bildschirm ausgerichtet ?

- Der Bildschirm steht parallel zur Fassade mit Blick auf die Fassade.
 Der Monitor steht parallel zur Fassade. Die Fassade ist hinter dem Probanden.
 Der Monitor steht in einem Winkel von etwa _____° zur Fassade, die Fassade ist seitlich.

6. Orientierung zur Tür

- im Gesichtsfeld seitlich im Rücken

7. Befinden sich Pflanzen am Arbeitsplatz?

- ja nein

8. Befinden sich Bilder / persönliche Gegenstände am Arbeitsplatz?

- ja nein

9. Abstand Proband - Fenster [m] _____

10. längere Abwesenheit (Dienstreise oder Urlaub) beabsichtigt?

- nein ja, _____



Quanta – Fragebogen für Interviewer (Abbau)

Gebäude: _____ Datum: ____ : ____ : ____ Uhr

Protokollführer: _____

1. Geschoss _____
2. Raumnummer _____
3. Anzahl Arbeitsplätze _____

Messtechnik - Abstand der aufgebauten Messtechnik zum Fenster festhalten!

4. Leuchtdichte-Kamera Nr.: elcam- _____
5. zyl. Beleuchtungsstärke: zyl- _____
6. Temperatur, Feuchte, Schall: schall- _____
7. spektrale Verteilung: rgb- _____
8. Kunstlicht: licht- _____
9. Temperatur, Feuchte zusätzl.: temp- _____

Skizze mit Fenster, Einrichtungsgegenständen + Nummerierung der Arbeitsplätze:

Beschreibung des einzelnen Arbeitsplatzes

1. Arbeitsplatz-Nummer _____
2. Probandencode
1. ___ erster Buchstabe des Geburtsortes
2. ___ zweiter Buchstabe des Vornamens der Mutter
3. ___ zweiter Buchstabe des eigenen Vornamens
4. ___ erster Buchstabe des Vornamens des Vaters
3. Beleuchtungsstärke am Sensor / Arbeitsplatz
 Schall _____ lx RGB _____ lx Arbeitsplatz/Tastatur _____ lx
4. Dienstreise oder Urlaub gehabt? (falls Fragebogen nicht ausgefüllt wurde)
 nein ja, _____

Beschreibung des einzelnen Arbeitsplatzes

1. Arbeitsplatz-Nummer _____
2. Probandencode
1. ___ erster Buchstabe des Geburtsortes
2. ___ zweiter Buchstabe des Vornamens der Mutter
3. ___ zweiter Buchstabe des eigenen Vornamens
4. ___ erster Buchstabe des Vornamens des Vaters
3. Beleuchtungsstärke am Sensor / Arbeitsplatz
 Schall _____ lx RGB _____ lx Arbeitsplatz/Tastatur _____ lx
4. Dienstreise oder Urlaub gehabt? (falls Fragebogen nicht ausgefüllt wurde)
 nein ja, _____

A3 Fragebogen mit statistischen Kennwerten der Antworten

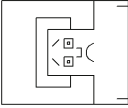
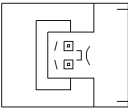
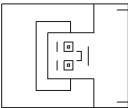
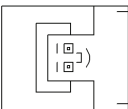
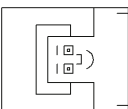
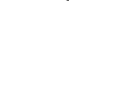
Bitte tragen Sie hier das **Datum** und die **Uhrzeit** ein, wann Sie mit dem Ausfüllen beginnen.

Datum _____ : _____ : _____ Uhrzeit _____ : _____

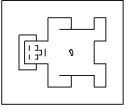
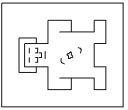
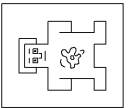
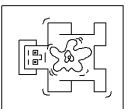
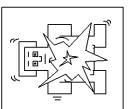
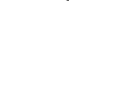
Allgemeine Fragen zu Ihrer Befindlichkeit und zu Ihrer Arbeit

1. Welches der Bilder in jeder Reihe beschreibt Ihr Befinden im Moment am besten?
(bitte in jeder Zeile ein Kreuz unter ein Bild oder zwischen zwei Bilder)

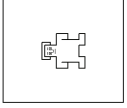
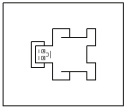
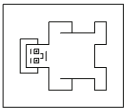
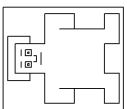
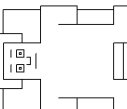
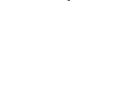
Welches dieser Bilder beschreibt am besten, wie unglücklich oder glücklich Sie sich im Moment fühlen?

						keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welches dieser Bilder beschreibt am besten, wie ruhig oder aufgeregt Sie sich im Moment fühlen?

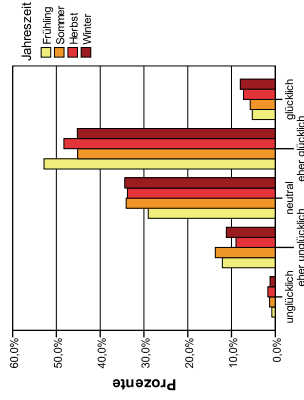
						keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welches dieser Bilder beschreibt am besten, wie selbstbestimmt Sie sich im Moment fühlen?

						keine Angabe
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

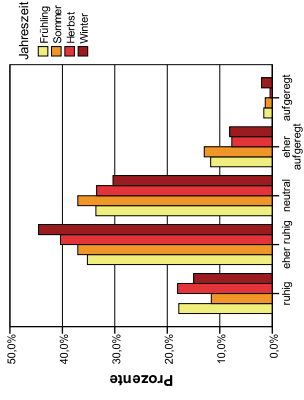
Bericht

Uhrzeit Fragebogenbeginn			
Mittelwert	N	Std.abw.	
10.34	923		01:59



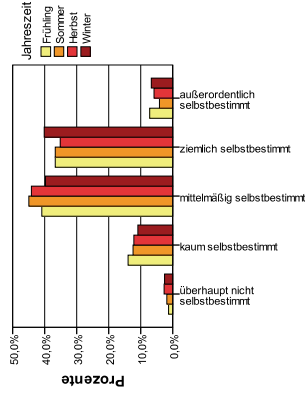
Bericht

SAM unglücklich-glücklich			
Mittelwert	N	Std.abw.	
3.47	958		.828



Bericht

SAM ruhig-aufgeregt			
Mittelwert	N	Std.abw.	
2.42	951		.918



Bericht

SAM kontrolliert-kontrollierend			
Mittelwert	N	Std.abw.	
3.33	916		.844

2. Seit wann arbeiten Sie in diesem **Gebäude**?
 (Bitte geben Sie auch den Monat an, falls Sie kürzer als 1 Jahr in diesem Gebäude arbeiten.)

Jahr _____ Monat _____
 keine Angabe

3. Seit wann arbeiten Sie an diesem **Platz** in diesem Raum?
 (Bitte geben Sie auch den Monat an, falls Sie kürzer als 1 Jahr in diesem Raum arbeiten.
 Bitte kreuzen Sie an, wenn dies nicht Ihr üblicher Arbeitsplatz ist und geben Sie an, seit wie vielen Tagen Sie hier arbeiten.)

Jahr _____ Monat _____
 keine Angabe

Dies ist nicht mein üblicher Arbeitsplatz, ich arbeite hier seit _____ Tag/en.

4. Zu welchem Anteil sind die folgenden **Tätigkeiten** Teil Ihrer üblichen Arbeit?
 (Angaben in %)

_____ % Bildschirmarbeit
 _____ % Schreibscharbeit einschließlich Telefonieren
 _____ % Besprechungen in diesem Raum
 _____ % Tätigkeiten außerhalb dieses Raumes und zwar: _____
 keine Angabe

5. Wie stark haben folgende Faktoren in **den letzten 2 Wochen** Ihre Leistungsfähigkeit am Arbeitsplatz **beeinträchtigt**? (Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

Beleuchtung.....
 sehr stark beeinträchtigt überhaut nicht beeinträchtigt
 keine Angabe

Geräusche.....

Raumtemperatur.....

Bericht

F2 Arbeitsdauer

Mittelwert	N	Std.abw.
4,5736	936	4,66977

Bericht

F3 Arbeitsdauer

Mittelwert	N	Std.abw.
2,3761	923	2,38156

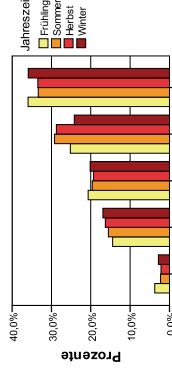
Bericht

	%	% Schreibscharbeit	% Besprechungen in diesem Raum	% Tätigkeiten außerhalb dieses Raumes
Mittelwert	62,8828	26,3584	8,0699	16,5772
N	949	914	552	657
Std.abw.	21,25413	20,11260	6,82866	17,28336

Bericht

Beleuchtung

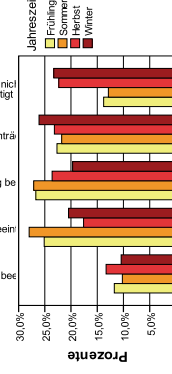
Mittelwert	N	Std.abw.
3,75	942	1,169



Bericht

Geräusche

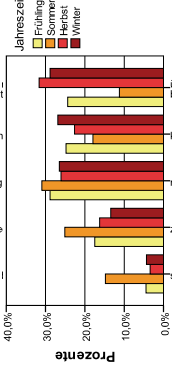
Mittelwert	N	Std.abw.
3,14	954	1,275



Bericht

Raumtemperatur

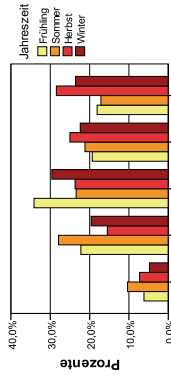
Mittelwert	N	Std.abw.
3,41	956	1,217



Luftqualität.....

Bericht

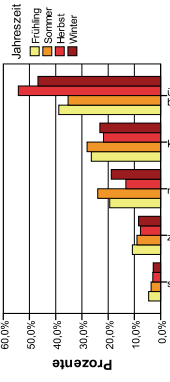
Luftqualität		
Mittelwert	N	Std.abw.
3,30	947	1,224



Gerüche.....

Bericht

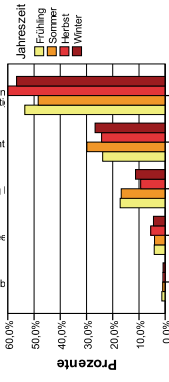
Gerüche		
Mittelwert	N	Std.abw.
3,97	947	1,140



Büroausstattung.....

Bericht

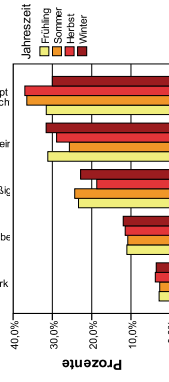
Büroausstattung		
Mittelwert	N	Std.abw.
4,29	942	,932



Probleme mit Computern.....

Bericht

Probleme mit Computern		
Mittelwert	N	Std.abw.
3,79	951	1,124



Sauberkeitszustand.....

Bericht

Sauberkeitszustand		
Mittelwert	N	Std.abw.
4,10	952	1,036



Sonstiges und zwar: _____

6. Wie stark fühlen Sie sich im Moment durch das Raumklima (einschließlich Belichtung, Temperatur, Luftfeuchte, Geräusche etc.) in Ihrer Arbeitsleistung beeinträchtigt?

sehr stark beeinträchtigt

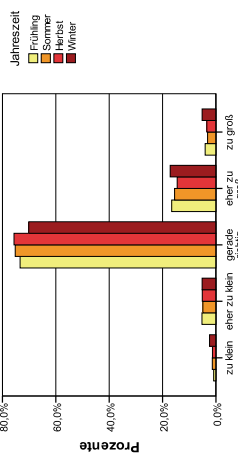
überhaupt nicht beeinträchtigt

keine Angabe

9. Wie beurteilen Sie die Größe der gesamten Fensterfläche in Ihrem Raum? keine Angabe
 zu klein zu groß

Bericht

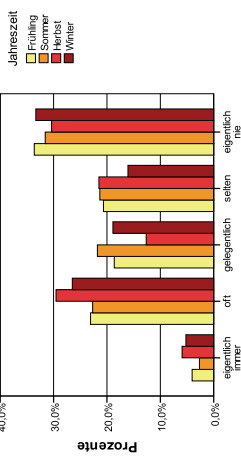
Größe der gesamten Fensterfläche	
Mittelwert	Std.abw.
3,16	,635



10. Wie oft empfanden Sie während der letzten zwei Wochen ? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)
eigentlich immer eigentlich nie keine Angabe

Bericht

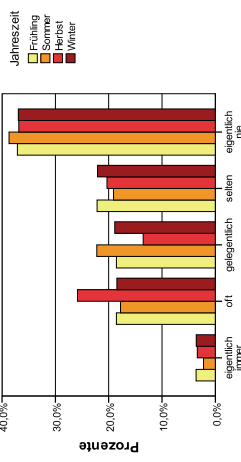
Blendung durch das Fenster	
Mittelwert	Std.abw.
3,50	1,294



Reflexionen auf dem Bildschirm

Bericht

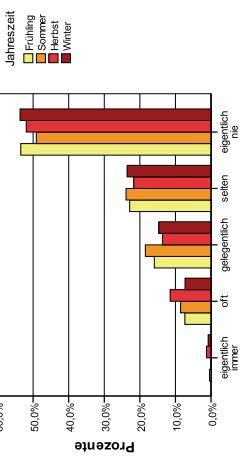
Reflexionen auf dem Bildschirm	
Mittelwert	Std.abw.
3,69	1,249



Reflexionen auf dem Tisch.....

Bericht

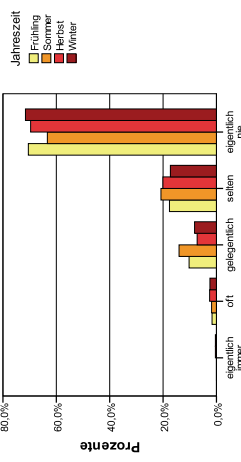
Reflexionen auf dem Tisch	
Mittelwert	Std.abw.
4,17	1,025



Reflexionen auf den Wänden...

Bericht

Reflexionen auf den Wänden	
Mittelwert	Std.abw.
4,54	,774

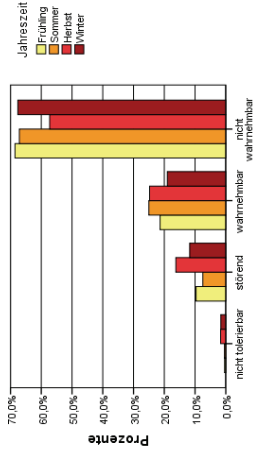


11. Empfinden Sie im Moment? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

Blendung durch das Fenster... nicht tolerierbar störend wahrnehmbar nicht wahrnehmbar keine Angabe

Bericht

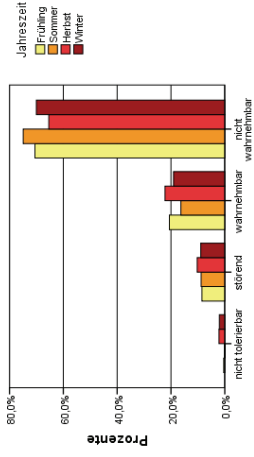
Blendung durch das Fenster als	
Mittelwert	Std.abw.
3,52	,734
N	957



Reflexionen auf dem Bildschirm

Bericht

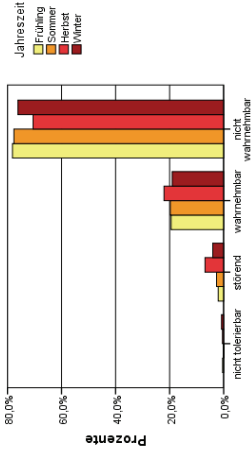
Reflexionen auf dem Bildschirm als	
Mittelwert	Std.abw.
3,59	,703
N	956



Reflexionen auf dem Tisch.....

Bericht

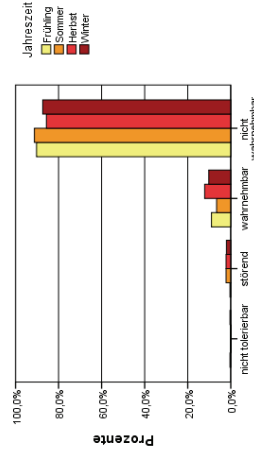
Reflexionen auf dem Tisch als	
Mittelwert	Std.abw.
3,71	,556
N	953



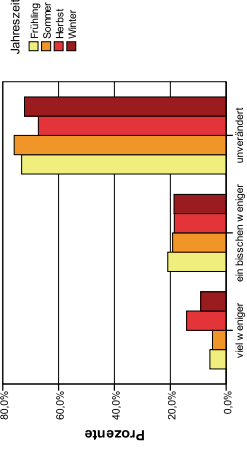
Reflexionen auf den Wänden...

Bericht

Reflexionen auf den Wänden als	
Mittelwert	Std.abw.
3,86	,404
N	948



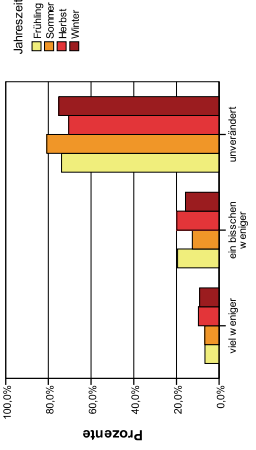
Ich hätte im Moment lieber...
 Blending durch das Fenster...
 viel weniger ein bisschen weniger unverändert keine Angabe



Bericht

Blending durch das Fenster		
Mittelwert	N	Std.abw.
2,64	930	,634

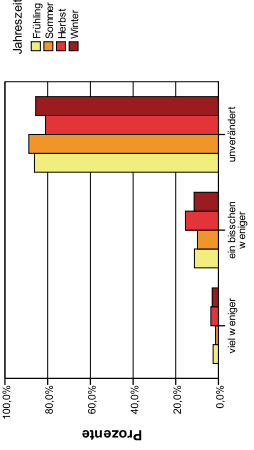
Reflexionen auf dem Bildschirm



Bericht

Reflexionen auf dem Bildschirm		
Mittelwert	N	Std.abw.
2,67	932	,619

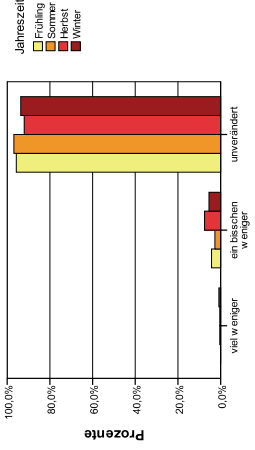
Reflexionen auf dem Tisch.....



Bericht

Reflexionen auf dem Tisch		
Mittelwert	N	Std.abw.
2,83	926	,441

Reflexionen auf den Wänden...



Bericht

Reflexionen auf den Wänden		
Mittelwert	N	Std.abw.
2,94	920	,253

12. Wie wichtig sind Ihnen in dieser Jahreszeit...? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

Blend- bzw. Sonnenschutz

gar nicht wichtig

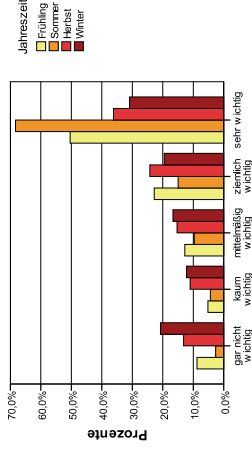
sehr wichtig

keine Angabe

Bericht

Blend- bzw. Sonnenschutz

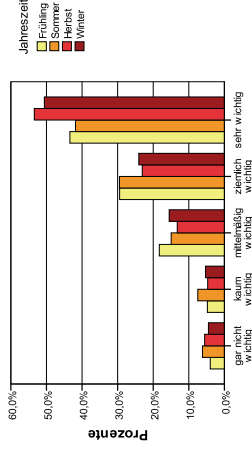
Mittelwert	N	Std.abw.
3,82	958	1,389



der Ausblick nach draußen

Bericht

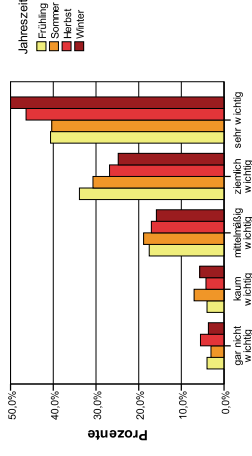
Mittelwert	N	Std.abw.
4,06	957	1,140



das Wahrnehmen des Weiters

Bericht

Mittelwert	N	Std.abw.
4,04	960	1,091

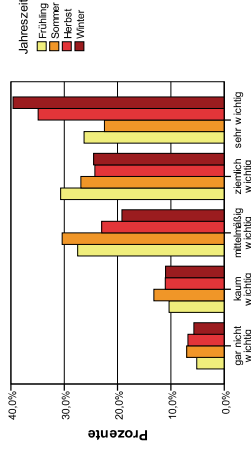


das Wahrnehmen des Sonnenstands...

Bericht

das Wahrnehmen des Sonnenstands

Mittelwert	N	Std.abw.
3,65	958	1,202

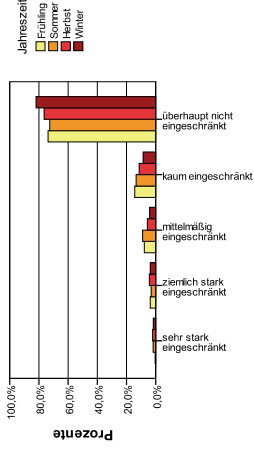


13. Wenn Sie aus dem Fenster sehen, empfinden Sie Ihre Aussicht in dieser Jahreszeit als eingeschränkt durch...? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

Fenstergröße..... sehr stark eingeschränkt überhaut nicht eingeschränkt keine Angabe

Bericht

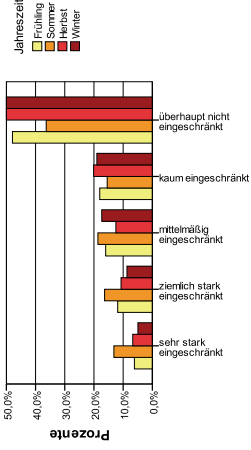
Fenstergröße	N	Std.abw.
Mittelwert	940	,883



Sonnenschutz.....

Bericht

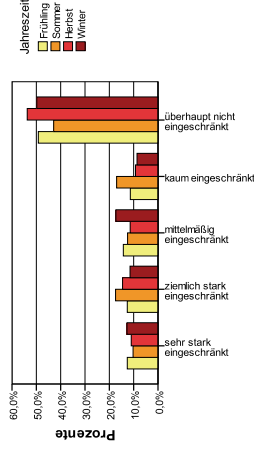
Sonnenschutz	N	Std.abw.
Mittelwert	930	1,326



Nachbargebäude / Gebäudeteile.....

Bericht

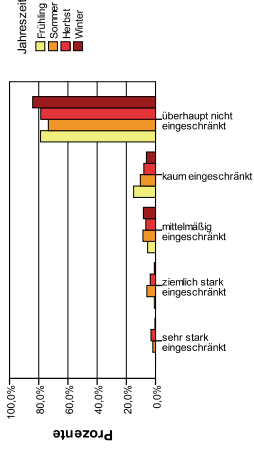
Nachbargebäude / Gebäudeteile	N	Std.abw.
Mittelwert	940	1,471



Bäume.....

Bericht

Bäume	N	Std.abw.
Mittelwert	927	,835



14. Wie empfinden Sie den Blick aus Ihrem Fenster in dieser Jahreszeit?
(bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

unangenehm
keine Angabe

Bericht

Blick aus dem Fenster

Mittelwert	N	Std.abw.
3,85	934	1,104



langweilig
interessant

Bericht

Blick aus dem Fenster

Mittelwert	N	Std.abw.
3,17	931	1,235



15. Wie zufrieden sind Sie mit der Orientierung Ihres Arbeitsplatzes zum Fenster / zu den Fenstern?

sehr unzufrieden
keine Angabe

Bericht

Orientierung des Arbeitsplatzes zum Fenster

Mittelwert	N	Std.abw.
3,59	953	1,173



16. **Insgesamt** betrachten: Wie bewerten Sie innerhalb der **letzten zwei Wochen** die Beleuchtungssituation durch **Tageslicht...?** (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

an Ihrem Arbeitsplatz..... zu dunkel zu hell keine Angabe

im gesamten Raum.....

am Bildschirm.....

Bericht

Tageslicht an Ihrem Arbeitsplatz

Mittelwert	N	Std.abw.
2,94	947	,870

Bericht

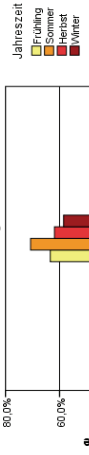
Tageslicht im gesamten Raum

Mittelwert	N	Std.abw.
2,80	940	,765

Bericht

Tageslicht am Bildschirm

Mittelwert	N	Std.abw.
3,08	940	,776

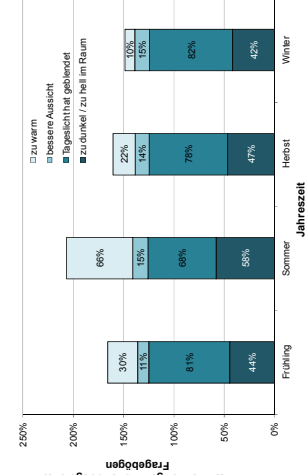


Sonnenschutz, Blendschutz

17. Falls Sie in den letzten zwei Wochen den Sonnen- oder Blendschutz verändert haben, was waren die Gründe dafür?

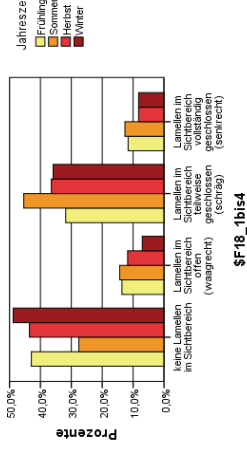
Grund für die Veränderung war meistens (bitte alles Zutreffende ankreuzen):
 Es war zu dunkel / zu hell im Raum.
 Es war zu dunkel / zu hell am Schreibtisch.
 Das Tageslicht hat geblendet.
 Es war zu warm.
 Ich wollte eine bessere Aussicht haben.
 Sonstiges und zwar: _____

	Fälle		Prozent
	Eingeschlossen	N	
zu dunkel / zu hell im Raum		326	33,4%
zu dunkel / zu hell am Schreibtisch		355	36,3%
Tageslicht hat geblendet		524	53,6%
zu warm		224	22,9%
bessere Aussicht		94	9,6%
Sonstiges		43	4,4%



18. In welcher Stellung waren die Lamellen im Sichtbereich in den vergangenen zwei Wochen meistens? (Bitte nur 1 Fall ankreuzen)

- keine Angabe
- keine Lamellen im Sichtbereich (Lamellen nur oberhalb des Sichtbereiches oder überhaupt nicht heruntergefahren)
- Lamellen im Sichtbereich offen (waagrecht)
- Lamellen im Sichtbereich teilweise geschlossen (schräg)
- Lamellen im Sichtbereich vollständig geschlossen (senkrecht)



19. Wie zufrieden sind Sie mit folgenden Aspekten des Sonnenschutzes (Außenrollo oder Lamellen)? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

- keine Angabe
- sehr unzufrieden unzufrieden sehr zufrieden zufrieden sehr zufrieden keine Angabe

Bericht

Anpassung der Lichtmenge	N	Std.abw.
Mittelwert	782	1,072

Schutz vor Blendung.....

Bericht

Blendschutz	N	Std.abw.
Mittelwert	793	1,157

Ausblick bei heruntergelassenem / geschlossenem Sonnenschutz

Bericht

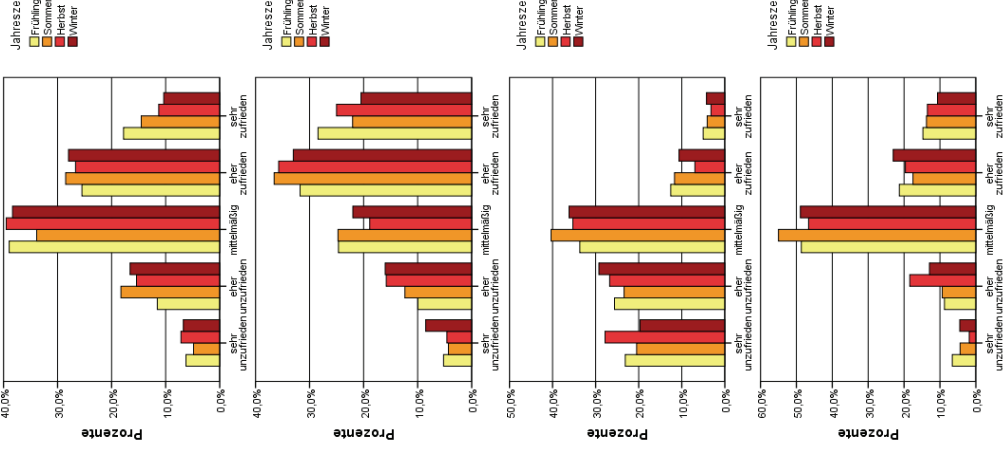
Ausblick bei heruntergelassenem Sonnenschutz	N	Std.abw.
Mittelwert	745	1,060

Material des Sonnenschutzes.....

Bericht

Material des Sonnenschutzes	N	Std.abw.
Mittelwert	684	,982

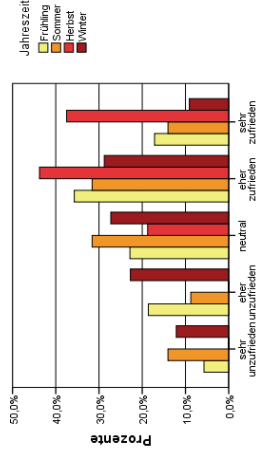
\$F18_1bis4



Falls Ihr Büro auch mit einem Blendschutz (innenliegendes Rollo) ausgestattet ist:
 Wie zufrieden sind Sie mit folgenden Aspekten des Blendschutzes?

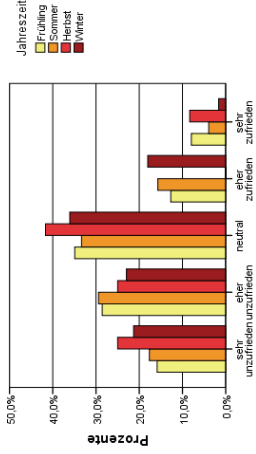
Schutz vor Blendung..... sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

Bericht		
innenliegendes Rollo: Schutz vor Blendung		
Mittelwert	N	Std.abw.
3,29	209	1,186



Ausblick bei geschlossenem Blendschutz keine Angabe

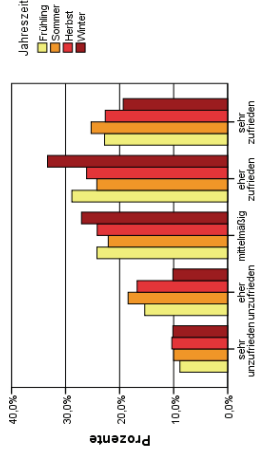
Bericht		
innenliegendes Rollo: Ausblick bei geschlossenem Blendschutz		
Mittelwert	N	Std.abw.
2,60	187	1,095



20. Wie zufrieden sind Sie mit der Bedienbarkeit Ihres Sonnenschutzes (Außenrollo oder Lamellen)?

sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

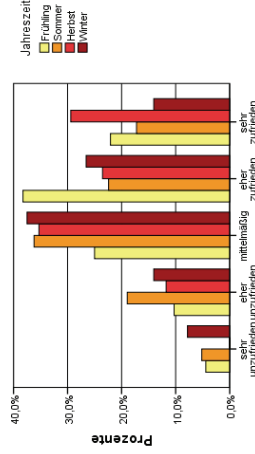
Bericht		
Bedienbarkeit des Sonnenschutzes		
Mittelwert	N	Std.abw.
3,38	815	1,256



Falls Ihr Büro auch mit einem Blendschutz (innenliegendes Rollo) ausgestattet ist:
 Wie zufrieden sind Sie mit der Bedienbarkeit Ihres Blendschutzes?

sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

Bericht		
innenliegendes Rollo: Bedienbarkeit des Blendschutzes		
Mittelwert	N	Std.abw.
3,42	207	1,107



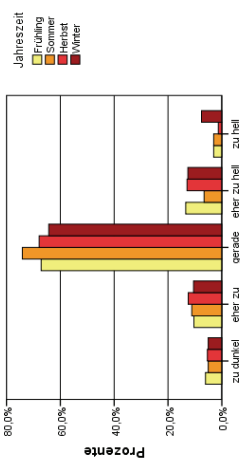
25. **Insgesamt** betrachten: Wie bewerten Sie innerhalb der letzten zwei Wochen die Beleuchtungssituation durch **Kunstlicht**...? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

an Ihrem Arbeitsplatz..... zu dunkel zu hell keine Angabe

Bericht

Beleuchtungssituation durch Kunstlicht: an Ihrem Arbeitsplatz

Mittelwert	N	Std.abw.
2,97	890	,772

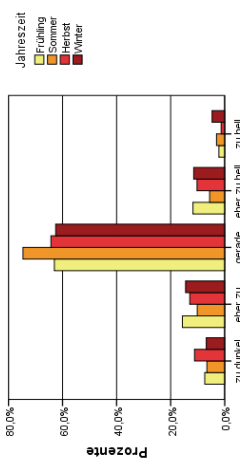


im gesamten Raum.....

Bericht

Beleuchtungssituation durch Kunstlicht: im gesamten Raum

Mittelwert	N	Std.abw.
2,86	886	,805

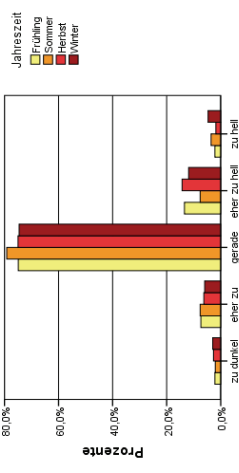


am Bildschirm.....

Bericht

Beleuchtungssituation durch Kunstlicht: am Bildschirm

Mittelwert	N	Std.abw.
3,06	888	,636



26. Wie beurteilen Sie **ganz allgemein** die Beleuchtung Ihres Arbeitsplatzes durch **Kunstlicht**? (Bitte geben Sie bei „sehr schlecht“ bis „mittelmäßig“ den Grund an.)

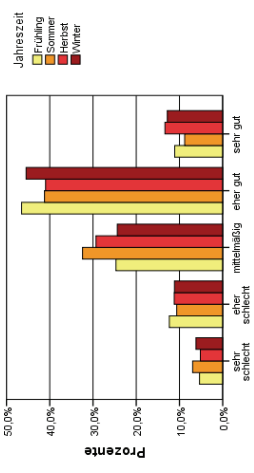
sehr schlecht mittelmäßig sehr gut keine Angabe

Grund: _____

Bericht

Beurteilung Kunstlicht am Arbeitsplatz allgemein

Mittelwert	N	Std.abw.
3,44	933	1,029

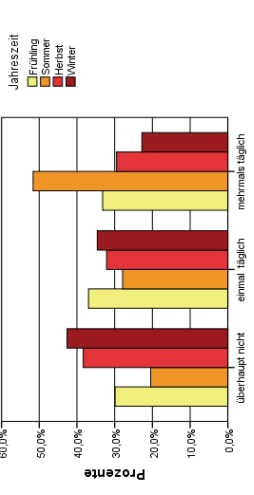


29. Wie oft haben Sie ungefähr in den vergangenen 2 Wochen versucht, etwas an der Temperatur in Ihrem Büro zu verändern?

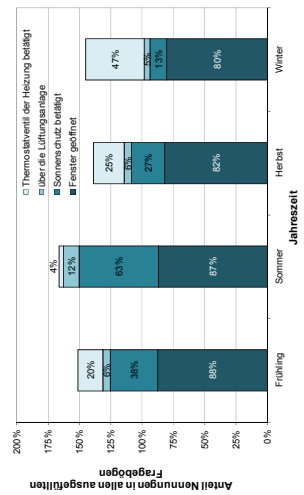
überhaupt nicht einmal täglich mehrmals täglich keine Angabe

Bericht
Versuche die Temperatur zu ändern in den letzten 2 Wochen

Mittelwert	N	Std.abw.
2,01	920	,819



	Fälle		Prozent
	N	Eingeschlossen	
Fenster geöffnet	645		66,0%
Sonnenschutz betätigt	271		27,7%
Thermostatventil der Heizung betätigt	179		18,3%
über die Lüftungsanlage	55		5,6%
Sonstiges	135		13,8%



Wenn Sie die Temperatur ändern wollten, wie haben Sie das meistens getan?
(bitte alles Zutreffende ankreuzen)

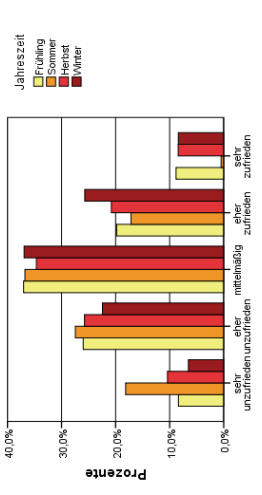
Fenster geöffnet
 Sonnenschutz betätigt
 Thermostatventil der Heizung betätigt
 über die Lüftungsanlage
 Sonstiges und zwar: _____

30. Wie zufrieden sind Sie mit der Wirksamkeit der Temperaturänderung?

sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

Bericht
Wirksamkeit der Temperaturveränderung

Mittelwert	N	Std.abw.
2,87	847	1,069

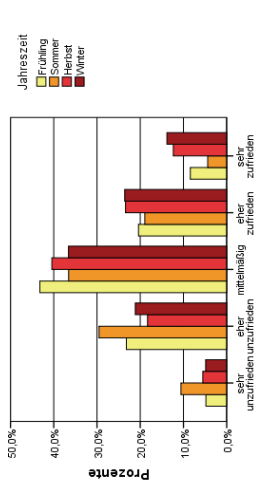


31. Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit der Temperatur an Ihrem Arbeitsplatz in dieser Jahreszeit?

sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

Bericht
Zufriedenheit mit der Temperatur insgesamt in dieser Jahreszeit

Mittelwert	N	Std.abw.
3,06	958	1,044



Belüftungsmöglichkeit, Luftqualität und Geräusche

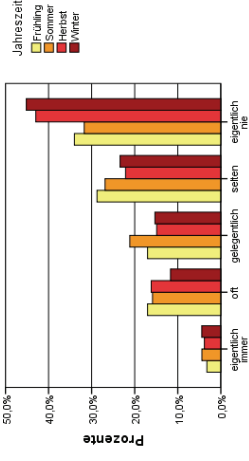
32. Wie häufig spüren Sie in dieser Jahreszeit üblicherweise **störende Zuglufterscheinungen** an Ihrem Arbeitsplatz?

eigentlich immer eigentlich nie keine Angabe

Bericht

störende Zuglufterscheinungen

Mittelwert	N	Std.abw.
3,79	957	1,216



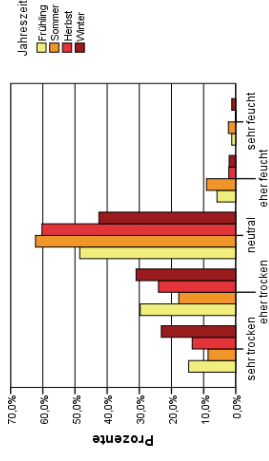
33. Wie empfinden Sie **in dieser Jahreszeit** üblicherweise die **Luffeuchte** in Ihrem Büro?

sehr trocken sehr feucht keine Angabe

Bericht

Luffeuchte in dieser Jahreszeit

Mittelwert	N	Std.abw.
2,51	930	,848



34. Wie empfinden Sie **im Moment** die **Luffeuchte** in Ihrem Büro?

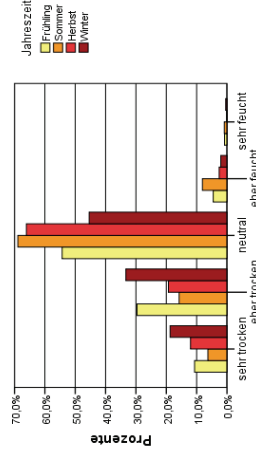
(bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

sehr trocken sehr feucht keine Angabe

Bericht

Luffeuchte im Moment

Mittelwert	N	Std.abw.
2,57	938	,778



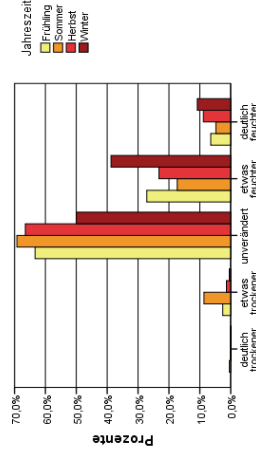
Ich hätte es lieber...

deutlich trockener deutlich feuchter

Bericht

Luffeuchte: Ich hätte lieber...

Mittelwert	N	Std.abw.
3,39	877	,681



35. Wie störend empfanden Sie in den vergangenen zwei Wochen **Gerüche** an Ihrem

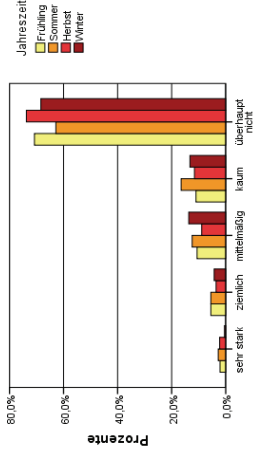
Arbeitsplatz? (Bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

Gerüche von Teppich/Möbeln... sehr stark überhaupt nicht keine Angabe

Bericht

Gerüche von Teppich/Möbel

Mittelwert	N	Std.abw.
4,43	913	,990

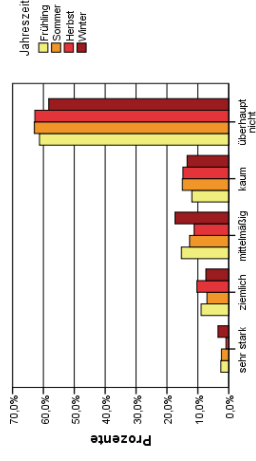


Speisen.....

Bericht

Speisen

Mittelwert	N	Std.abw.
4,23	901	1,118

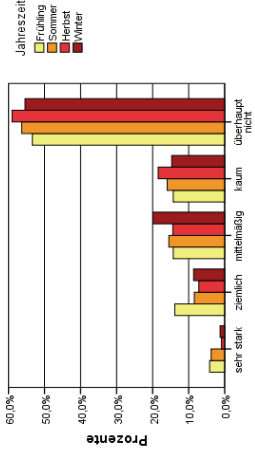


Ein Gemisch aus Gerüchen....

Bericht

Gemisch aus Gerüchen

Mittelwert	N	Std.abw.
4,13	904	1,148



Sonstige Gerüche _____

Lage und Gestaltung des Gebäudes, Möblierung und Gestaltung Ihres Büros, Sauberkeit im Gebäude

44. Wie zufrieden sind Sie mit der **Lage des Gebäudes**, in dem Sie arbeiten?
(bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

Verkehrsanbindung sehr unzufrieden sehr zufrieden keine Angabe

Einkaufsmöglichkeiten

Erholungsmöglichkeiten.....

Stadtviertel

insgesamt

Bericht

Verkehrsanbindung	
Mittelwert	Std.abw.
3,98	1,242
N	949

Bericht

Einkaufsmöglichkeiten	
Mittelwert	Std.abw.
3,24	1,363
N	894

Bericht

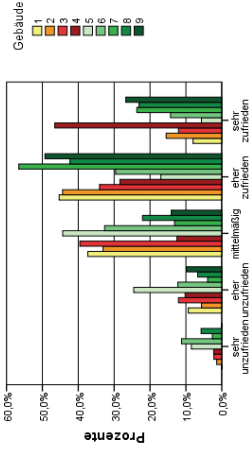
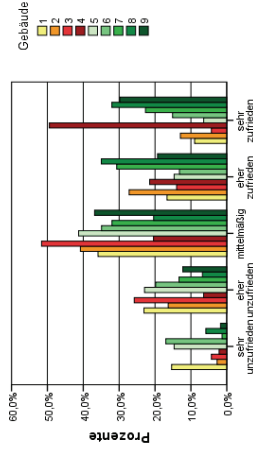
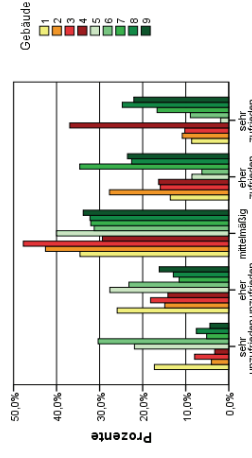
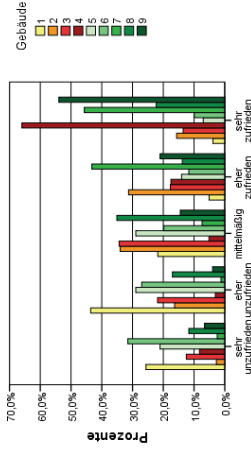
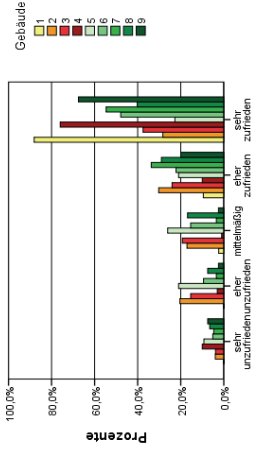
Erholungsmöglichkeiten	
Mittelwert	Std.abw.
3,07	1,196
N	865

Bericht

Stadtviertel	
Mittelwert	Std.abw.
3,29	1,170
N	861

Bericht

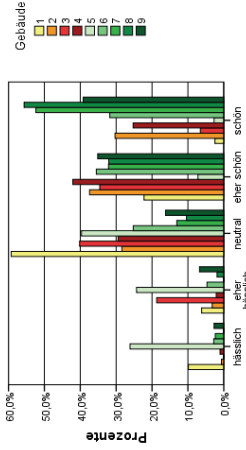
Lage des Gebäudes insgesamt	
Mittelwert	Std.abw.
3,57	1,037
N	851



45. Wie empfinden Sie das **Gebäude**, in dem Sie arbeiten? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

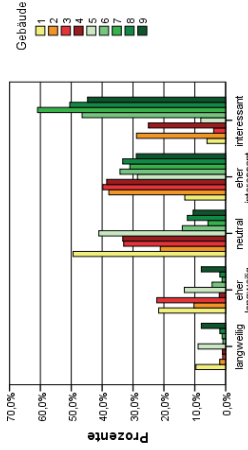
von außen hässlich schön keine Angabe

Bericht		
Gebäude von außen	N	Std.abw.
Mittelwert	920	1,103



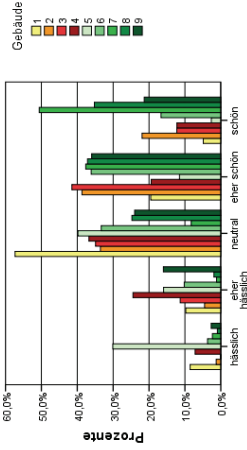
langweilig interessant

Bericht		
Gebäude von außen	N	Std.abw.
Mittelwert	932	1,089



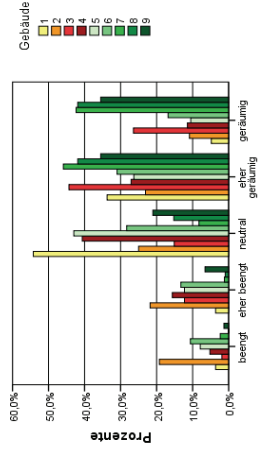
innen hässlich schön

Bericht		
Gebäude innen	N	Std.abw.
Mittelwert	927	1,107



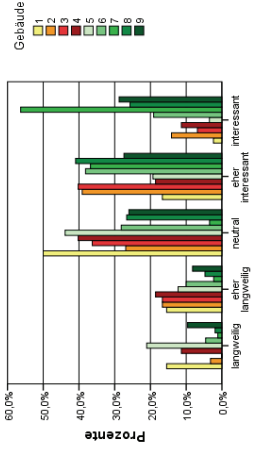
beengt geräumig

Bericht		
Gebäude innen	N	Std.abw.
Mittelwert	935	1,142



langweilig interessant

Bericht		
Gebäude innen	N	Std.abw.
Mittelwert	928	1,130

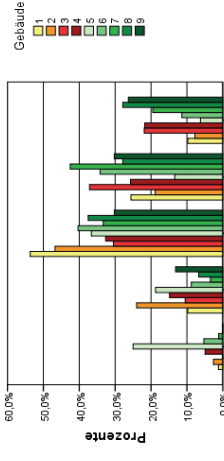


46. Wie empfinden Sie den Raum, in dem Sie arbeiten? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

hässlich keine Angabe

Bericht

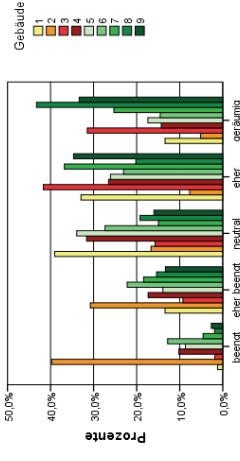
Raumempfinden I	
Mittelwert	N
3,37	935
Std.abw. 1,052	



beengt geräumig

Bericht

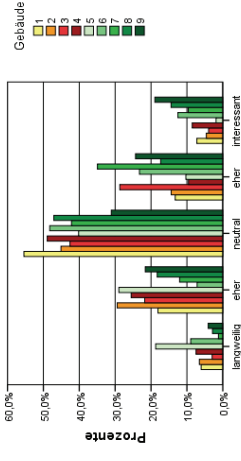
Raumempfinden II	
Mittelwert	N
3,27	942
Std.abw. 1,289	



langweilig interessant

Bericht

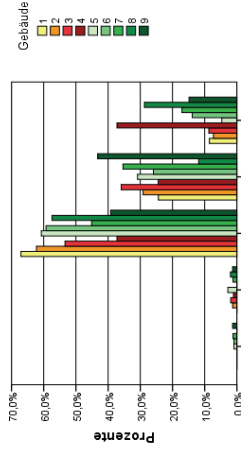
Raumempfinden III	
Mittelwert	N
3,02	911
Std.abw. 1,007	



niedrig hoch

Bericht

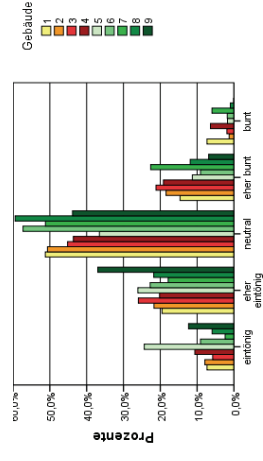
Raumempfinden IV	
Mittelwert	N
3,57	902
Std.abw. ,775	



einförmig bunt

Bericht

Raumempfinden V	
Mittelwert	N
2,78	915
Std.abw. ,917	



Gesundheitliche Beschwerden und Arbeitssituation

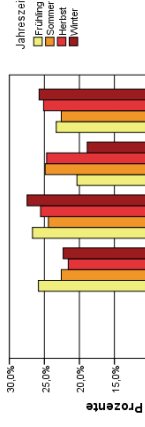
54. Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen während Ihrer Arbeitszeit unter folgenden gesundheitlichen Beschwerden? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

rasche Ermüdung..... fast immer fast nie keine Angabe

Bericht

Gesundheit: rasche Ermüdung

Mittelwert	N	Std.abw.
3,38	913	1,206

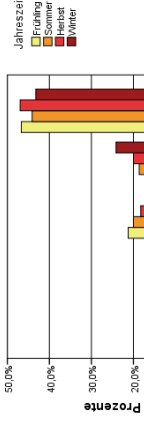


Kopfschmerzen..... fast nie

Bericht

Gesundheit: Kopfschmerzen

Mittelwert	N	Std.abw.
3,92	926	1,175

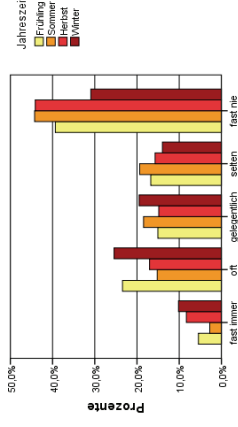


trockene Nase..... fast nie

Bericht

Gesundheit: trockene Nase

Mittelwert	N	Std.abw.
3,62	921	1,357

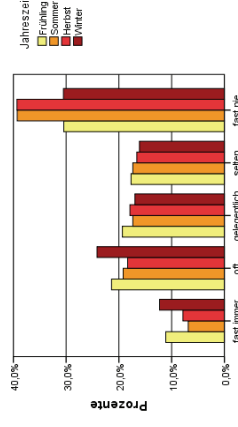


trockene Augen..... fast nie

Bericht

Gesundheit: trockene Augen

Mittelwert	N	Std.abw.
3,46	927	1,392

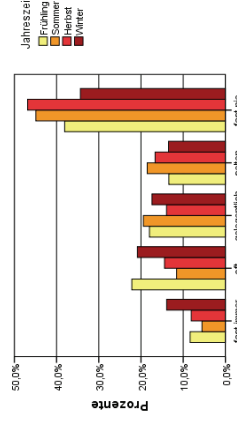


trockene Haut/ Kopfhaut..... fast nie

Bericht

Gesundheit: trockene Haut/Kopfhaut

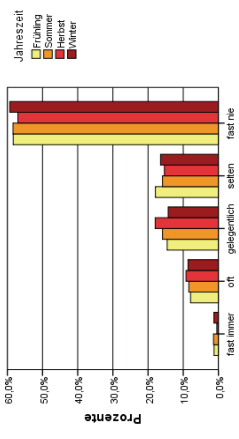
Mittelwert	N	Std.abw.
3,62	907	1,395



Halschmerzen.....

Bericht

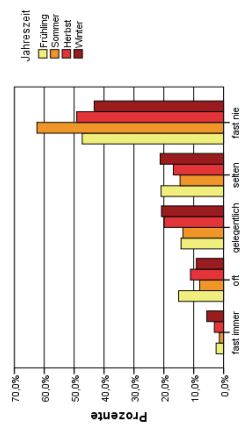
Gesundheit: Halschmerzen		
Mittelwert	N	Std.abw.
4,22	913	1,064



laufende Nase.....

Bericht

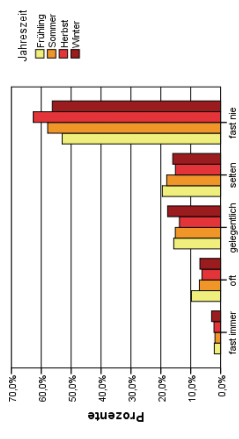
Gesundheit: laufende Nase		
Mittelwert	N	Std.abw.
4,02	909	1,183



trärende Augen.....

Bericht

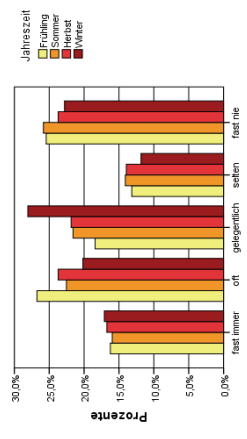
Gesundheit: trärende Augen		
Mittelwert	N	Std.abw.
4,20	903	1,097



Verspannungen: wo?.....

Bericht

Gesundheit: Verspannungen		
Mittelwert	N	Std.abw.
3,06	884	1,415



wo?.....

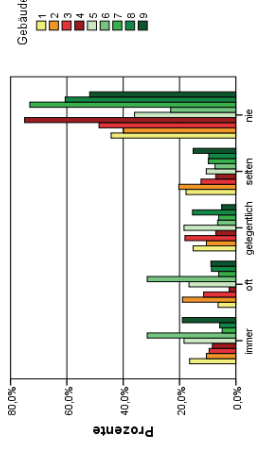
Anmerkung.....

56. Wie oft mussten Sie sich bei folgenden Punkten in den vergangenen zwei Wochen mit Kollegen abstimmen? (bitte in jeder Zeile ein Kreuz)

Betätigung des Sonnen-/Blendschutzes immer oft gelegentlich selten nie keine Angabe

Bericht

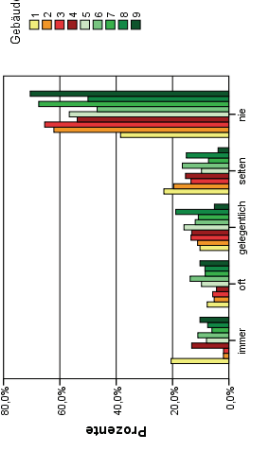
Betätigung des Sonnen-/Blendschutzes	
Mittelwert	N
3,68	908
	Std.abw. 1,513



Ein- / Ausschalten des Kunstlichtes.....

Bericht

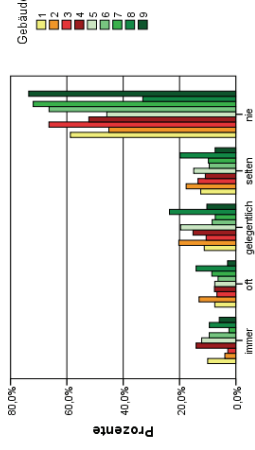
Ein-/Ausschalten des Kunstlichtes	
Mittelwert	N
4,04	915
	Std.abw. 1,325



Einstellung der Raumtemperatur.....

Bericht

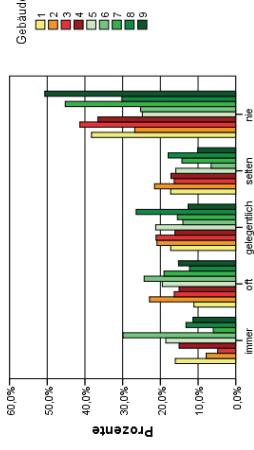
Einstellung der Raumtemperatur	
Mittelwert	N
4,00	887
	Std.abw. 1,321



Lüftung des Büros.....

Bericht

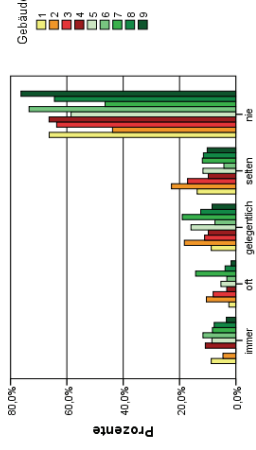
Lüftung des Büros	
Mittelwert	N
3,39	920
	Std.abw. 1,447



Öffnen / Schließen der Bürotür.....

Bericht

Öffnen/Schließen der Bürotür	
Mittelwert	N
4,14	860
	Std.abw. 1,264



Sonstiges und zwar: _____

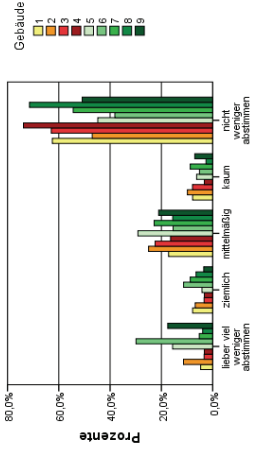
57. Bei welchen der folgenden Punkte wünschen Sie sich, dass Sie sich **weniger mit Kollegen abstimmen** müssen? (*Mehrfachauswahl möglich*)

lieber viel weniger abstimmen
 nicht weniger abstimmen
 keine Angabe

Bericht

Abstimmung: Betätigung des Sonnen-/Blendschutzes

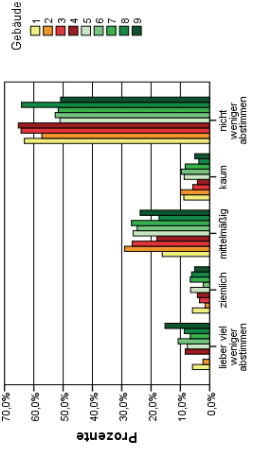
Mittelwert	N	Std.abw.
3,87	730	1,420



Bericht

Abstimmung: Ein-/Ausschalten des Kunstlichtes

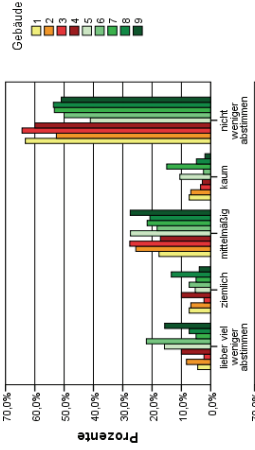
Mittelwert	N	Std.abw.
4,05	743	1,262



Bericht

Abstimmung: Einstellung der Raumtemperatur

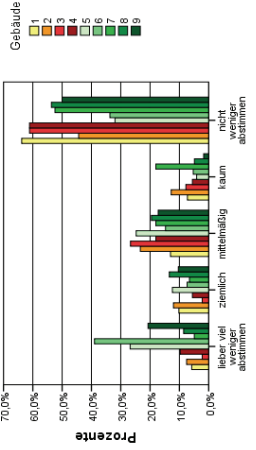
Mittelwert	N	Std.abw.
3,87	728	1,390



Bericht

Abstimmung: Lüftung des Büros

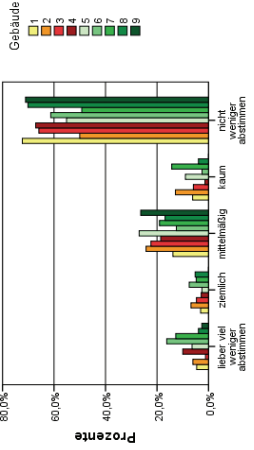
Mittelwert	N	Std.abw.
3,68	757	1,496



Bericht

Abstimmung: Öffnen/Schließen der Bürotür

Mittelwert	N	Std.abw.
4,10	688	1,277



Sonstiges und zwar: _____

Persönliche Angaben

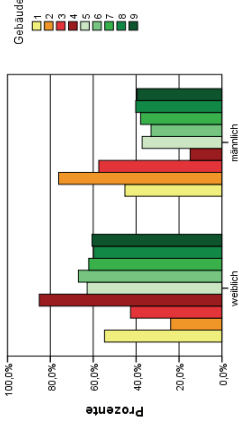
62. Was ist Ihr Geschlecht?

- weiblich
 männlich

keine Angabe

Bericht

Geschlecht	
Mittelwert	1,44
N	969
Std.abw.	,497

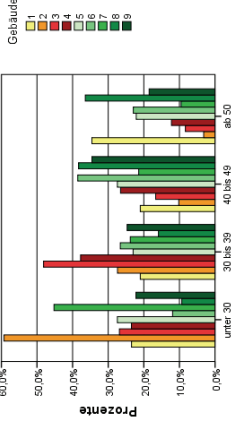


63. In welchem Jahr sind Sie geboren?

_____ keine Angabe

Bericht

Alter	
Mittelwert	37,6141
N	938
Std.abw.	10,76668



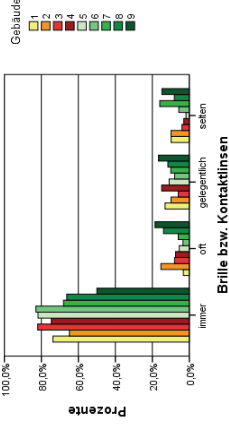
64. Tragen Sie während der Arbeit eine Sehhilfe?

- nein
 ja, und zwar.....

- eine Brille immer nie
 Kontaktlinsen

keine Angabe

Fälle	
Eingeschlossen	
N	Prozent
Keine Sehhilfe	400 40,9%
Brille	471 48,2%
Kontaktlinsen	204 20,9%



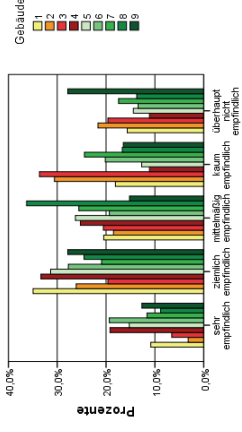
65. Halten Sie sich für empfindlich gegenüber hellem Licht?

keine Angabe

- sehr empfindlich überhaupt nicht empfindlich

Bericht

Empfindlich gegenüber hellem Licht	
Mittelwert	3,05
N	950
Std.abw.	1,277



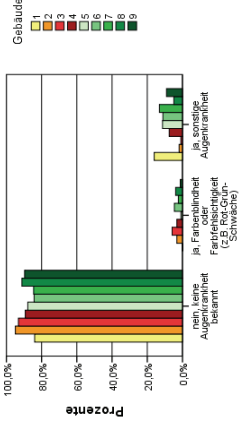
66. Leiden Sie unter einer Augenkrankheit?

- nein, keine Augenkrankheit bekannt
 ja, Farbenblindheit oder Farbfehlsichtigkeit (z.B. Rot-Grün-Sehchwäche)
 ja, sonstige Augenkrankheit und zwar _____

keine Angabe

Bericht

Augenkrankheit	
Mittelwert	1,19
N	919
Std.abw.	,555



67. Sind Sie Links- oder Rechtshänder?

Rechtshänder
 Linkshänder
 keine Angabe

68. In welcher beruflichen Stellung sind Sie derzeit beschäftigt?

keine Angabe

- Akademiker/in in freiem Beruf (Arzt/Ärztin, Rechtsanwält/-anwältin, Steuerberater/in)
- Selbstständig im Handel, Gewerbe, Handwerk, Industrie, Dienstleistung
- Beamter/Beamtin, und zwar ...
 - im einfachen Dienst (bis einschl. Oberamtsmeister/in)
 - im mittleren Dienst (von Assistent/in bis einschl. Hauptsekretär/in, Amtsinspektor/in)
 - im gehobenen Dienst (von Inspektor/in bis einschl. Oberamtsrat/-rätin)
 - im höheren Dienst (von Rat/Rätin aufwärts)

- Angestellte/r, und zwar ...
 - mit ausführender Tätigkeit nach allgemeinen Anweisung (z.B. Kontorist/in, Datentypist/in)
 - mit einer qualifizierten Tätigkeit, die nach Anweisung erledigt werden (z.B. Sachbearbeiter/in, Buchhalter/in, technische/r Zeichner/in)
 - mit eigenständiger Leistung in verantwortlicher Tätigkeit bzw. mit Fachverantwortung für Personal (z.B. wissenschaftlicher Mitarbeiter/in, Prokurist/in, Abteilungsleiter/in bzw. Meister/in im Angestelltenverhältnis)
 - mit umfassenden Führungsaufgaben und Entscheidungsbefugnissen (z.B. Direktor/in, Geschäftsführer/in, Mitglied des Vorstandes)

- Auszubildende/r
- Sonstiges: _____

69. Wie sind Ihre üblichen Arbeitszeiten?

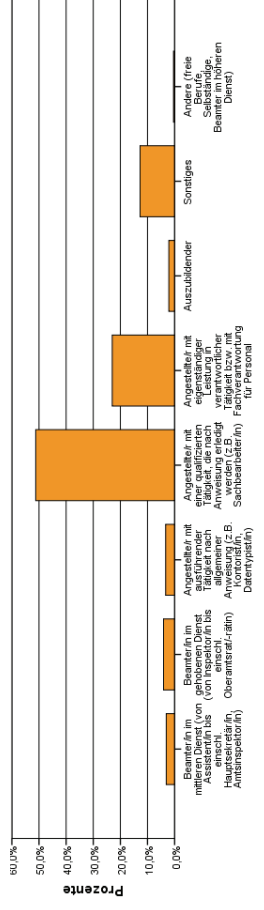
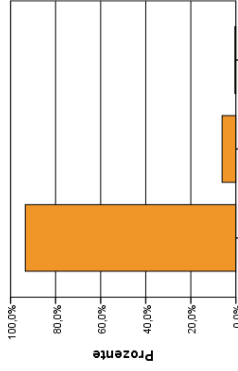
keine Angabe
 von _____ Uhr bis _____ Uhr an folgenden Wochentagen _____
 von _____ Uhr bis _____ Uhr an folgenden Wochentagen _____
 Anmerkungen: _____

70. Haben Sie in den letzten 2 Wochen zu Ihren üblichen Arbeitszeiten gearbeitet?

ja
 nein, ... ich hatte Urlaub von _____ bis _____
 Sonstiges, und zwar: _____
 keine Angabe

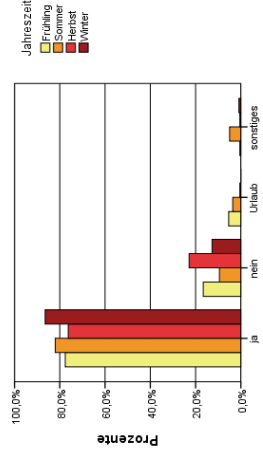
71. Wenn Sie uns noch irgend etwas über Ihren Arbeitsplatz oder diesen Fragebogen mitteilen möchten, können Sie dies hier tun:

Uhrzeit bei Beendigung des Fragebogens: _____: _____ Uhr



Bericht

üblicher Arbeitsende (spätestens)	N	Std.abw.
Mittelwert	16:46	917
		1:27



Bericht

üblicher Arbeitsbeginn (frühestens)	N	Std.abw.
Mittelwert	7:59	918
		0:48

Bericht

übliche Arbeitszeit in den letzten 2 Wochen gearbeitet	N	Std.abw.
Mittelwert	1,25	935
		,576

Bericht

Uhrzeit Fragebogenende	N	Std.abw.
Mittelwert	11:04	938
		1:58

II. Ergebnisse der statistischen Analysen

A4 Stichprobe – Kreuztabelle Geschlecht und Alter der Probanden in Abhängigkeit des Gebäudes für alle ausgefüllten Fragebogen

Gebäude	Geschlecht		Altersgruppe				Gesamt
			unter 30	30 bis 39	40 bis 49	ab 50	
DB, KA	weiblich	Anzahl	14	14	5	10	43
		% der Gesamtzahl	17,3%	17,3%	6,2%	12,3%	53,1%
	männlich	Anzahl	5	3	12	18	38
		% der Ges.	6,2%	3,7%	14,8%	22,2%	46,9%
	Gesamt	Anzahl	19	17	17	28	81
		% der Ges.	23,5%	21,0%	21,0%	34,6%	100,0%
ISE, FR	weiblich	Anzahl	16	16	3	1	36
		% der Ges.	10,2%	10,2%	1,9%	0,6%	22,9%
	männlich	Anzahl	77	27	13	4	121
		% der Ges.	49,0%	17,2%	8,3%	2,5%	77,1%
	Gesamt	Anzahl	93	43	16	5	157
		% der Ges.	59,2%	27,4%	10,2%	3,2%	100,0%
SIC, FR	weiblich	Anzahl	12	11	14	9	46
		% der Ges.	11,1%	10,2%	13,0%	8,3%	42,6%
	männlich	Anzahl	17	41	4	0	62
		% der Ges.	15,7%	38,0%	3,7%	0,0%	57,4%
	Gesamt	Anzahl	29	52	18	9	108
		% der Ges.	26,9%	48,1%	16,7%	8,3%	100,0%
Uni, KA	weiblich	Anzahl	23	27	24	9	83
		% der Ges.	23,5%	27,6%	24,5%	9,2%	84,7%
	männlich	Anzahl	0	10	2	3	15
		% der Ges.	0,0%	10,2%	2,0%	3,1%	15,3%
	Gesamt	Anzahl	23	37	26	12	98
		% der Ges.	23,5%	37,8%	26,5%	12,2%	100,0%
LBBW, KA	weiblich	Anzahl	16	20	25	11	72
		% der Ges.	14,2%	17,7%	22,1%	9,7%	63,7%
	männlich	Anzahl	15	6	6	14	41
		% der Ges.	13,3%	5,3%	5,3%	12,4%	36,3%
	Gesamt	Anzahl	31	26	31	25	113
		% der Ges.	27,4%	23,0%	27,4%	22,1%	100,0%
LBBW, S	weiblich	Anzahl	12	24	26	15	77
		% der Ges.	11,0%	22,0%	23,9%	13,8%	70,6%
	männlich	Anzahl	1	5	16	10	32
		% der Ges.	0,9%	4,6%	14,7%	9,2%	29,4%
	Gesamt	Anzahl	13	29	42	25	109
		% der Ges.	11,9%	26,6%	38,5%	22,9%	100,0%

UBA, DE	weiblich	Anzahl	23	13	7	8	51
		% der Ges.	27,4%	15,5%	8,3%	9,5%	60,7%
	männlich	Anzahl	15	7	11	0	33
		% der Ges.	17,9%	8,3%	13,1%	0,0%	39,3%
	Gesamt	Anzahl	38	20	18	8	84
		% der Ges.	45,2%	23,8%	21,4%	9,5%	100,0%
LBBW, MA	weiblich	Anzahl	4	16	23	21	64
		% der Ges.	3,7%	15,0%	21,5%	19,6%	59,8%
	männlich	Anzahl	6	1	18	18	43
		% der Ges.	5,6%	0,9%	16,8%	16,8%	40,2%
	Gesamt	Anzahl	10	17	41	39	107
		% der Ges.	9,3%	15,9%	38,3%	36,4%	100,0%
Braun, HG	weiblich	Anzahl	16	12	16	5	49
		% der Ges.	19,8%	14,8%	19,8%	6,2%	60,5%
	männlich	Anzahl	2	8	12	10	32
		% der Ges.	2,5%	9,9%	14,8%	12,3%	39,5%
	Gesamt	Anzahl	18	20	28	15	81
		% der Ges.	22,2%	24,7%	34,6%	18,5%	100,0%
Gesamt	weiblich	Anzahl	136	153	143	89	521
		% der Ges.	14,5%	16,3%	15,2%	9,5%	55,5%
	männlich	Anzahl	138	108	94	77	417
		% der Ges.	14,7%	11,5%	10,0%	8,2%	44,5%
	Gesamt	Anzahl	274	261	237	166	938
		% der Gesamtzahl	29,2%	27,8%	25,3%	17,7%	100,0%

A5 Beeinträchtigung durch das Raumklima

Variablen:

F6	1 = „sehr stark beeinträchtigt“ ... 5 = „überhaupt nicht beeinträchtigt“
F62_Geschlecht	1 = „weiblich“, 2 = „männlich“
F7_3a	1 = „sehr dunkel / sehr hell“ ... 3 = „weder dunkel noch hell“
F27_2a	1 = „sehr kalt / sehr warm“ ... 3 = „weder kalt noch warm“
F38	1 = „sehr schlecht“ ... 5 = „sehr gut“
F43	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F6 ~ factor(F62_Geschlecht) + F7_3a.within + F7_3a.between + F27_2a.within + F27_2a.between
+ F38.within + F38.between + F43.within + F43.between

Unbalanced Panel: n=312, T=0-4, N=620

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.5756	0.7587	0.665
individual	0.2894	0.5380	0.335

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.2939	0.2939	0.3156	0.3686	0.4237

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.67000	-0.52000	0.02950	-0.00657	0.55500	2.26000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	-0.0950228	0.3235751	-0.2937	0.7691135	
factor(F62_Geschlecht)2	0.1998429	0.0929452	2.1501	0.0319385	*
F7_3a.within	0.2906706	0.0914719	3.1777	0.0015595	**
F7_3a.between	0.3619185	0.0876365	4.1298	4.138e-05	***
F27_2a.within	0.3051379	0.0976322	3.1254	0.0018601	**
F27_2a.between	0.3922441	0.1034001	3.7935	0.0001634	***
F38.within	-0.0065374	0.0668401	-0.0978	0.9221174	
F38.between	0.3691472	0.0588536	6.2723	6.742e-10	***
F43.within	0.1770030	0.0619201	2.8586	0.0044009	**
F43.between	0.1586331	0.0442644	3.5838	0.0003657	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 581.78
Residual Sum of Squares: 357.94
R-Squared: 0.38565
Adj. R-Squared: 0.37943
F-statistic: 42.3856 on 9 and 610 DF, p-value: < 2.22e-16

A6 Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz, bei der keine Veränderung gewünscht wird, für Räume mit Außenfassaden (ohne Atrium)

Variablen:

lx_Arbeitsplatz_korr Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz 12 lx ... 6636 lx
 aussen_lx Außenbeleuchtungsstärke 0 lx ... 115372 lx
 Alter 14 Jahre (Praktikant) ... 62 Jahre
 F14_1 1 = „unangenehm“ ... 5 = „angenehm“
 F56_1 1 = „immer“ ... 5 = „nie“
 F56_2 1 = „immer“ ... 5 = „nie“
 AnteilFensterflächeanderNettofassade 21% ... 100%
 Jahreszeit 1 = „Frühling“ ab 01.03. ... 4 = „Winter“ ab 01.12.

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula (log = natürlicher Logarithmus):

$\log(\text{lx_Arbeitsplatz_korr}) \sim \log(\text{ausse_lx}) + \text{Alter} + \text{F14_1} + \text{F56_1} + \text{F56_2} + \text{AnteilFensterflächeanderNettofassade} + \text{factor}(\text{Jahreszeit})$

Unbalanced Panel: n=217, T=1-4, N=342

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.3532	0.5943	0.663
individual	0.1794	0.4236	0.337

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.1857	0.1857	0.2957	0.2790	0.3706	0.4257

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-3.3900	-0.3420	0.0349	0.0043	0.3890	1.6500

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	4.45337144	0.45337318	9.8228	< 2.2e-16	***
log(ausse_lx)	0.18841469	0.03742858	5.0340	7.893e-07	***
Alter	-0.00538230	0.00448012	-1.2014	0.230463	
F14_1	0.08864865	0.04092994	2.1659	0.031033	*
F56_1	-0.05397156	0.03497977	-1.5429	0.123799	
F56_2	0.11521841	0.04013766	2.8706	0.004360	**
AnteilFensterflächeanderN.	0.00091613	0.00201810	0.4540	0.650156	
factor(Jahreszeit)2	-0.25524717	0.09678904	-2.6371	0.008754	**
factor(Jahreszeit)3	-0.17957889	0.10789952	-1.6643	0.096993	.
factor(Jahreszeit)4	0.02713037	0.12122501	0.2238	0.823049	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 230.41
 Residual Sum of Squares: 119.97
 R-Squared: 0.48111
 Adj. R-Squared: 0.46704
 F-statistic: 33.9609 on 9 and 332 DF, p-value: < 2.22e-16

A7 Zufriedenheit mit der Tageslichtversorgung (ohne Sonnenschutz)

Variablen:

F22	1 = „sehr schlecht“ ... 5 = „sehr gut“
F9a	1 = „zu klein/zu groß“ ... 3 = „weder zu klein noch zu groß“
F10_2	1 = „eigentlich immer“ ... 5 = „eigentlich nie“
F14_1	1 = „unangenehm“ ... 5 = „angenehm“
F65	1 = „sehr empfindlich“ ... 5 = „überhaupt nicht empfindlich“
AufA9_Abstand	Abstand zwischen Arbeitsplatz und Fensterfassade 0,9 m ... 6,0 m

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F22 ~ F9a.within + F9a.between + F10_2.within + F10_2.between + F14_1.within + F14_1.between + F65.within + F65.between + AufA9_Abstand

Unbalanced Panel: n=331, T=0-4, N=648

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.6535	0.8084	0.644
individual	0.3616	0.6013	0.356

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.3110	0.3110	0.3293	0.3868	0.4421

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-3.01000	-0.45200	0.11300	-0.00013	0.54500	2.32000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	0.303793	0.348843	0.8709	0.384159	
F9a.within	-0.030628	0.108078	-0.2834	0.776974	
F9a.between	0.387372	0.097763	3.9624	8.258e-05	***
F10_2.within	0.049125	0.048073	1.0219	0.307223	
F10_2.between	0.186723	0.047076	3.9664	8.123e-05	***
F14_1.within	-0.013824	0.065597	-0.2107	0.833157	
F14_1.between	0.350023	0.051342	6.8175	2.151e-11	***
F65.within	0.011825	0.068554	0.1725	0.863103	
F65.between	0.130105	0.041057	3.1689	0.001603	**
AufA9_Abstand	-0.133671	0.050825	-2.6300	0.008744	**

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 587.82
 Residual Sum of Squares: 428.38
 R-Squared: 0.27123
 Adj. R-Squared: 0.26704
 F-statistic: 26.3825 on 9 and 638 DF, p-value: < 2.22e-16

A8 Bewertung der Aussicht aus dem Fenster

Variablen:

F14_1	1 = „unangenehm“ ... 5 = „angenehm“
F1_1	1 = „unglücklich“ ... 5 = „glücklich“
Fassadentyp	1 = „Lochfassade“, 2 = „Bandfassade“, 3 = „Ganzglasfassade“
Ausblick	1 = „Gebäude / Gebäudeteile“, 2 = „Bäume“, 3 = „nicht / kaum eingeschränkt“
Jahreszeit	1 = „Frühling“ ab 01.03. ... 4 = „Winter“ ab 01.12.
Atrium_2	1 = „Gebäude ohne Atrium“, 2 = „Gebäude mit Atrium“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

$$F14_1 \sim F1_1.within + F1_1.between + \text{factor}(\text{Fassadentyp}) + \text{factor}(\text{Ausblick}) + \text{factor}(\text{Jahreszeit}) + \text{factor}(\text{Atrium_2})$$

Unbalanced Panel: n=437, T=0-4, N=905

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.5510	0.7423	0.55
individual	0.4500	0.6708	0.45

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.3838	0.4617	0.4082	0.5159	0.5159

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.37000	-0.48000	0.13400	0.00326	0.54600	1.64000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	2.092940	0.234408	8.9286	< 2.2e-16	***
F1_1.within	0.018374	0.051407	0.3574	0.7208651	
F1_1.between	0.305838	0.060980	5.0154	6.384e-07	***
factor(Fassadentyp)2	0.465204	0.104900	4.4347	1.037e-05	***
factor(Fassadentyp)3	0.440682	0.128016	3.4424	0.0006033	***
factor(Ausblick)2	0.589222	0.167248	3.5230	0.0004482	***
factor(Ausblick)3	0.584345	0.093443	6.2535	6.212e-10	***
factor(Jahreszeit)2	0.246378	0.075635	3.2575	0.0011665	**
factor(Jahreszeit)3	0.161174	0.078489	2.0534	0.0403199	*
factor(Jahreszeit)4	-0.065457	0.074340	-0.8805	0.3788215	
factor(Atrium_2)2	-0.589136	0.153849	-3.8293	0.0001375	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 717.12
 Residual Sum of Squares: 506.46
 R-Squared: 0.29405
 Adj. R-Squared: 0.29048
 F-statistic: 37.1858 on 10 and 894 DF, p-value: < 2.22e-16

A9 Blendungsbewertung – DGP viewratio, age, lowlight

Variablen:

F11_1_3Stufen 2 = „nicht tolerierbar / störend“, 3 = „wahrnehmbar“,
4 = „nicht wahrnehmbar“

dgp_viewratio_age_lowlight 0,00 ... 0,93

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F11_1_3Stufen ~ dgp_viewratio_age_lowlight

Unbalanced Panel: n=391, T=1-4, N=751

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.2615	0.5114	0.597
individual	0.1768	0.4205	0.403

theta:

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
	0.2276	0.3480	0.3480	0.3665	0.4253	0.4804

Residuals:

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
	-1.46000	-0.35700	0.21400	0.00308	0.34200	0.85700

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	3.858810	0.052752	73.1503	< 2.2e-16	***
dgp_viewratio_age_lowlight	-1.214645	0.160992	-7.5448	1.316e-13	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 271.55
 Residual Sum of Squares: 198.69
 R-Squared: 0.26954
 Adj. R-Squared: 0.26882
 F-statistic: 274.691 on 1 and 749 DF, p-value: < 2.22e-16

A10 Blendungsbewertung – DGP lowlight

Variablen:

F11_1_3Stufen	2 = „nicht tolerierbar / störend“, 3 = „wahrnehmbar“, 4 = „nicht wahrnehmbar“
dgp_lowlight	0,00 ... 0,97
Alter	17 Jahre (Auszubildender) ... 65 Jahre
viewratio	0,00 ... 1,00

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F11_1_3Stufen ~ dgp_lowlight + Alter + viewratio

Unbalanced Panel: n=391, T=1-4, N=751

Effects:

	var	std.dev	share			
idiosyncratic	0.2625	0.5124	0.613			
individual	0.1660	0.4075	0.387			
theta:						
	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
	0.2173	0.3355	0.3355	0.3543	0.4125	0.4677

Residuals:

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
	-1.51000	-0.33600	0.18600	0.00356	0.35200	0.86400

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	3.9615532	0.1448026	27.3583	< 2.2e-16	***
dgp_lowlight	-0.9120061	0.1221153	-7.4684	2.269e-13	***
Alter	-0.0097270	0.0027377	-3.5530	0.0004048	***
viewratio	0.2983373	0.0955101	3.1236	0.0018554	**

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 273.78
Residual Sum of Squares: 199.18
R-Squared: 0.27407
Adj. R-Squared: 0.27261
F-statistic: 93.2555 on 3 and 747 DF, p-value: < 2.22e-16

A11 Blendungsbewertung „wahrnehmbare Blendung“

Variablen:

dgp_viewratio_age_lowlight 0,01 ... 0,93
 F14_1 1 = „unangenehm“ ... 5 = „angenehm“
 F20 1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
 Fassadentyp 1 = „Lochfassade“, 2 = „Bandfassade“, 3 = „Ganzglasfassade“
 Jahreszeit 1 = „Frühling“ ab 01.03. ... 4 = „Winter“ ab 01.12.
 Atrium_2 1 = „Gebäude ohne Atrium“, 2 = „Gebäude mit Atrium“

Linear Model

Model Formula:

dgp_viewratio_age_lowlight ~ F14_1 + F20 + factor(Fassadentyp) + factor(Jahreszeit) + factor(Atrium_2)

N = 215 – 44 = 171

Residuals:

Min.	1Q	Median	3Q	Max.
-0.25698	-0.08811	-0.03029	0.04462	0.65611

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	0.216020	0.059693	3.619	0.000395	***
F14_1	0.004843	0.011811	0.410	0.682279	
F20	0.020736	0.009864	2.102	0.037091	*
factor(Fassadentyp)2	0.079734	0.031399	2.539	0.012046	*
factor(Fassadentyp)3	0.026588	0.034329	0.775	0.439750	
factor(Jahreszeit)2	-0.061093	0.031218	-1.957	0.052070	.
factor(Jahreszeit)3	-0.021441	0.032012	-0.670	0.503946	
factor(Jahreszeit)4	-0.023562	0.033349	-0.707	0.480879	
factor(Atrium_2)2	-0.193313	0.051208	-3.775	0.000224	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1467 on 162 degrees of freedom

(44 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.1656

Adjusted R-squared: 0.1244

F-statistic: 4.019 on 8 and 162 DF, p-value: 0.0002237

A12 Blendungsbewertung

Variablen:

F11_1_3Stufen 2 = „nicht tolerierbar / störend“, 3 = „wahrnehmbar“,
4 = „nicht wahrnehmbar“

dgp_viewratio_age_lowlight 0,00 ... 0,93

AnteilFensterflächeanderNettofassade 21% ... 100%

F14_1 1 = „unangenehm“ ... 5 = „angenehm“

F64_1 1 = keine Sehhilfe, 2 = Brille / Kontaktlinsen

F65 1 = „sehr empfindlich“ ... 5 = „überhaupt nicht empfindlich“

Jahreszeit 1 = „Frühling“ ab 01.03. ... 4 = „Winter“ ab 01.12.

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F11_1_3Stufen ~ dgp_viewratio_age_lowlight + AnteilFensterflächeanderNettofassade + F14_1 +
factor(F64_1) + F65 + factor(Jahreszeit)

Unbalanced Panel: n=380, T=1-4, N=713

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.2513	0.5013	0.635
individual	0.1443	0.3799	0.365

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.2030	0.3177	0.3177	0.3327	0.3939	0.4492

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-1.53000	-0.30600	0.14200	0.00124	0.36300	1.08000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	3.6079247	0.1486976	24.2635	< 2.2e-16	***
dgp_viewratio_age_lowlight	-1.1878835	0.1602101	-7.4145	3.515e-13	***
AnteilFensterflächeanderN.	-0.0065047	0.0012128	-5.3632	1.110e-07	***
F14_1	0.0748855	0.0227068	3.2979	0.001023	**
factor(F64_1)2	0.1682301	0.0559743	3.0055	0.002746	**
F65	0.1036145	0.0199015	5.2064	2.530e-07	***
factor(Jahreszeit)2	0.0143364	0.0564435	0.2540	0.799573	
factor(Jahreszeit)3	-0.1179529	0.0591053	-1.9956	0.046358	*
factor(Jahreszeit)4	-0.0771972	0.0558317	-1.3827	0.167202	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 261.72
Residual Sum of Squares: 176.15
R-Squared: 0.32715
Adj. R-Squared: 0.32302
F-statistic: 42.7492 on 8 and 704 DF, p-value: < 2.22e-16

A13 Kunstlicht

Variablen:

F26 1 = „sehr schlecht“ ... 5 = „sehr gut“
 F7_2 1 = „sehr gleichmäßig beleuchtet“ ... 5 = „sehr ungleichmäßig beleuchtet“
 F23 1 = „sehr schlecht“ ... 5 = „sehr gut“
 F24_1 1 = „immer geblendet“ ... 5 = „nie geblendet“
 F25_1a 1 = „zu dunkel / zu hell“ ... 3 = „weder zu dunkel noch zu hell“
 Lichtsensor_Raumtiefe_Median 68 lx ... 3155 lx während der Arbeitszeit
 (Abstand vom Fenster 0,75 m ... 5,30 m)

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula (log = natürlicher Logarithmus):

F26 ~ F7_2.within + F7_2.between + F23.within + F23.between + F24_1.within + F24_1.between
 + F25_1a.within + F25_1a.between + log(Lichtsensor_Raumtiefe_Median)

Unbalanced Panel: n=289, T=0-4, N=557

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.2972	0.5452	0.512
individual	0.2830	0.5319	0.488

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.2843	0.4132	0.4263	0.4907	0.5439

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.04000	-0.36900	0.01230	-0.00302	0.35100	2.08000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	-0.457016	0.504924	-0.9051	0.3658021	
F7_2.within	-0.076433	0.041453	-1.8439	0.0657453	.
F7_2.between	-0.140394	0.047103	-2.9806	0.0030049	**
F23.within	0.109865	0.046166	2.3798	0.0176651	*
F23.between	0.176388	0.047113	3.7439	0.0002004	***
F24_1.within	0.122251	0.046473	2.6306	0.0087645	**
F24_1.between	0.056080	0.051493	1.0891	0.2765929	
F25_1a.within	0.357630	0.075536	4.7345	2.8e-06	***
F25_1a.between	0.891405	0.073720	12.0918	< 2.2e-16	***
log(Lichtsensor_Raumtiefe_M...)	0.189892	0.058329	3.2555	0.0012019	**

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 363.21
 Residual Sum of Squares: 176.4
 R-Squared: 0.51452
 Adj. R-Squared: 0.50528
 F-statistic: 64.3656 on 9 and 547 DF, p-value: < 2.22e-16

A14 Zufriedenheit mit der Raumtemperatur

Variablen:

F31	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
F28_1a	1 = „zu kalt / zu warm“ ... 3 = „weder zu kalt noch zu warm“
F28_2a	1 = „zu kalt / zu warm“ ... 3 = „weder zu kalt noch zu warm“
F30	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
F32	1 = „eigentlich immer“ ... 5 = „eigentlich nie“
F27_2a	1 = „sehr kalt / sehr warm“ ... 3 = „weder kalt noch warm“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F31 ~ F28_1a + F28_2a + F30 + F32 + F27_2a

Unbalanced Panel: n=397, T=0-4, N=759

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.46988	0.68548	0.9
individual	0.05236	0.22881	0.1

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.00000	0.05145	0.09570	0.10820	0.13430	0.16830

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.42000	-0.42600	-0.02800	-0.00142	0.42700	2.71000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	-0.198655	0.157463	-1.2616	0.2074821	
F28_1a	0.177339	0.043399	4.0862	4.855e-05	***
F28_2a	0.221727	0.040418	5.4859	5.623e-08	***
F30	0.460414	0.027374	16.8197	< 2.2e-16	***
F32	0.115384	0.022559	5.1148	3.988e-07	***
F27_2a	0.191051	0.053510	3.5704	0.0003791	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 721.29
 Residual Sum of Squares: 355.33
 R-Squared: 0.50739
 Adj. R-Squared: 0.50338
 F-statistic: 155.1 on 5 and 753 DF, p-value: < 2.22e-16

A15 Akzeptierte Raumtemperatur

Variablen:

innen_temp 15,2 °C ... 29,4 °C
 Uhrzeit_Temperaturanstieg 6:44 Uhr ... 12:00 [h]
 AnteilFensterflächeanderNettofassade 21% ... 100%
 TagesmittelwertAT_15251_ab10Grad 10 °C ... 24,3 °C

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

innen_temp ~ Uhrzeit_Temperaturanstieg + AnteilFensterflächeanderNettofassade + TagesmittelwertAT_15251_ab10Grad

Unbalanced Panel: n=248, T=1-4, N=367

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.9439	0.9716	0.722
individual	0.3635	0.6029	0.278

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.1503	0.1503	0.2484	0.2256	0.2484	0.3726

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.79000	-0.70000	0.00347	-0.00409	0.66500	2.40000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.6562e+01	5.8409e-01	28.3545	< 2.2e-16	***
Uhrzeit_Temperaturanstieg	1.4035e-04	1.4963e-05	9.3799	< 2.2e-16	***
AnteilFensterflächeanderN...	1.1106e-02	2.6839e-03	4.1379	4.36e-05	***
TagesmittelwertAT_15251_a...	9.2308e-02	1.1769e-02	7.8432	4.95e-14	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 1859.9
 Residual Sum of Squares: 350.6
 R-Squared: 0.81178
 Adj. R-Squared: 0.80293
 F-statistic: 520.885 on 3 and 363 DF, p-value: < 2.22e-16

A16 Luftqualität und Gerüche

Variablen:

F39 1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
 F28_2 1 = „zu kalt“ ... 5 = „zu warm“
 F33a 1 = „sehr trocken / sehr feucht“ ... 3 = „weder trocken noch feucht“
 F35_3 1 = „sehr stark störend“ ... 5 = „überhaupt nicht störend“
 Grossraumbüro_2 1 = „Zellenbüro“, 2 = „Großraumbüro“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

$$F39 \sim F28_2.within + F28_2.between + F33a.within + F33a.between + F35_3.within + F35_3.between + factor(Grossraumbüro_2)$$

Unbalanced Panel: n=350, T=0-4, N=694

Effects:

	var	std.dev	share			
idiosyncratic	0.4601	0.6783	0.689			
individual	0.2077	0.4557	0.311			
theta:						
	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
	0.0000	0.2751	0.2751	0.2959	0.3482	0.4030

Residuals:

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
	-2.28000	-0.44000	0.02810	-0.00307	0.44800	1.96000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.785285	0.299378	5.9633	3.957e-09	***
F28_2.within	-0.178482	0.041872	-4.2626	2.304e-05	***
F28_2.between	-0.235628	0.054727	-4.3055	1.909e-05	***
F33a.within	0.210995	0.063746	3.3099	0.000982	***
F33a.between	0.519251	0.060406	8.5961	< 2.2e-16	***
F35_3.within	0.220103	0.044447	4.9520	9.258e-07	***
F35_3.between	0.268636	0.037006	7.2592	1.058e-12	***
factor(Grossraumbüro_2)2	-0.309611	0.084864	-3.6483	0.000284	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 527.32
 Residual Sum of Squares: 321.26
 R-Squared: 0.39101
 Adj. R-Squared: 0.3865
 F-statistic: 62.859 on 7 and 686 DF, p-value: < 2.22e-16

A17 Geräuschpegel

Variablen:

F43 1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“

F40 1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“

schall_schall_korr_Median 0,00 V ... 0,23 V

Grossraumbüro_2 1 = „Zellenbüro“, 2 = „Großraumbüro“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

$$F43 \sim F40.within + F40.between + schall_schall_korr_Median.within + schall_schall_korr_Median.between + factor(Grossraumbüro_2)$$

Unbalanced Panel: n=365, T=0-4, N=736

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.5628	0.7502	0.674
individual	0.2724	0.5219	0.326

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.2872	0.3614	0.3098	0.3614	0.4164

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.7100	-0.4700	-0.0192	0.0020	0.4490	3.4100

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.686436	0.191412	8.8105	< 2.2e-16	***
F40.within	0.236219	0.053814	4.3896	1.303e-05	***
F40.between	0.561504	0.039192	14.3271	< 2.2e-16	***
schall_schall_korr_Median.within	-2.287897	2.360928	-0.9691	0.33283	
schall_schall_korr_Median.bet...	-4.425357	1.614360	-2.7412	0.00627	**
factor(Grossraumbüro_2)2	-0.424153	0.099809	-4.2497	2.418e-05	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares:	666.45
Residual Sum of Squares:	425
R-Squared:	0.36235
Adj. R-Squared:	0.35939
F-statistic:	82.9443 on 5 and 730 DF, p-value: < 2.22e-16

A18 Architektur – Bewertung des Aussehens des Gebäudes

Variablen:

F45_1_A	1 = „hässlich“ ... 5 = „schön“
F1_3	1 = „kontrolliert“ ... 5 = „kontrollierend“
A_Fassade	1 = „Ganzglasfassade“, 2 = „Band- oder Lochfassade“
A_Atrium	1 = „Gebäude mit Atrium“, 2 = „Gebäude ohne Atrium“
A_Altbau	1 = „Altbau um 1900“, 2 = „Gebäude ab Baujahr 1990“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F45_1_A ~ F1_3 + factor(A_Fassade) + factor(A_Atrium) + factor(A_Altbau)

Unbalanced Panel: n=427, T=0-4, N=865

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.2664	0.5161	0.274
individual	0.7044	0.8393	0.726

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.6012	0.6012	0.6098	0.7061	0.7061

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.49000	-0.32500	0.01740	-0.00007	0.38000	1.45000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	4.48578	0.20621	21.7537	< 2.2e-16	***
F1_3	0.16697	0.03410	4.8963	1.166e-06	***
factor(A_Fassade)2	-0.49528	0.11487	-4.3118	1.807e-05	***
factor(A_Atrium)2	-0.35361	0.11947	-2.9598	0.003163	**
factor(A_Altbau)2	-0.83325	0.12551	-6.6387	5.600e-11	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 412.63
 Residual Sum of Squares: 256.21
 R-Squared: 0.37908
 Adj. R-Squared: 0.37689
 F-statistic: 131.262 on 4 and 860 DF, p-value: < 2.22e-16

A19 Architektur – Raum beengt / geräumig

Variablen:

F46_2	1 = „beengt“ ... 5 = „geräumig“
F1_1	1 = „unglücklich“ ... 5 = „glücklich“
F7_2	1 = „sehr gleichmäßig beleuchtet“ ... 5 = „sehr ungleichmäßig beleuchtet“
F9a	1 = „zu klein/zu groß“ ... 3 = „weder zu klein noch zu groß“
NGF_Person	4 m ² / Arbeitsplatz ... 27 m ² / Arbeitsplatz

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula (log = natürlicher Logarithmus):

$$F46_2 \sim F1_1.within + F1_1.between + F7_2.within + F7_2.between + F9a.within + F9a.between + \log(NGF_Person)$$

Unbalanced Panel: n=406, T=0-4, N=833

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.5409	0.7355	0.464
individual	0.6251	0.7906	0.536

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.4504	0.5268	0.4723	0.5268	0.5783

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.65000	-0.52400	0.00428	0.00012	0.56600	2.35000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	-0.2120634	0.5329419	-0.3979	0.6907988	
F1_1.within	0.0835440	0.0540038	1.5470	0.1222462	
F1_1.between	0.2190965	0.0736742	2.9739	0.0030265	**
F7_2.within	-0.0016511	0.0433157	-0.0381	0.9696023	
F7_2.between	-0.3225406	0.0555790	-5.8033	9.269e-09	***
F9a.within	0.0826959	0.0897819	0.9211	0.3572801	
F9a.between	0.3586830	0.1023988	3.5028	0.0004851	***
log(NGF_Person)	1.2141653	0.1083348	11.2075	< 2.2e-16	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 658.97
 Residual Sum of Squares: 471.16
 R-Squared: 0.285
 Adj. R-Squared: 0.28227
 F-statistic: 46.9788 on 7 and 825 DF, p-value: < 2.22e-16

A20 Architektur – Raum niedrig / hoch

Variablen:

F46_4 1 = „niedrig“ ... 5 = „hoch“
 lichteHöhe 2,71 m ... 4,40 m lichte Raumhöhe
 F8_1 1 = „sehr dunkel“ ... 5 = „sehr hell“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F46_4 ~ lichteHöhe + F8_1

Unbalanced Panel: n=423, T=0-4, N=838

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.2835	0.5324	0.541
individual	0.2406	0.4905	0.459

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.3912	0.3912	0.4085	0.4690	0.5230

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-1.9400	-0.3920	-0.2110	-0.0033	0.3810	1.5300

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.475076	0.286698	5.1451	3.335e-07	***
lichteHöhe	0.591425	0.089857	6.5819	8.201e-11	***
F8_1	0.097058	0.028377	3.4203	0.0006558	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 386.61
 Residual Sum of Squares: 245.76
 R-Squared: 0.36502
 Adj. R-Squared: 0.36372
 F-statistic: 239.266 on 2 and 835 DF, p-value: < 2.22e-16

A21 Zufriedenheit mit dem Raumklima

Variablen:

F60	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
F10_1	1 = „eigentlich immer“ ... 5 = „eigentlich nie“
F22	1 = „sehr schlecht“ ... 5 = „sehr gut“
F26	1 = „sehr schlecht“ ... 5 = „sehr gut“
F31	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
F39	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
F43	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
F58	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
F1_3	1 = „überhaupt nicht selbstbestimmt“ ... 5 = „außerordentlich selbstb.“
F45_innen_A	1 = „hässlich“ ... 5 = „schön“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F60 ~ F10_1 + F22 + F26 + F31 + F39 + F43 + F58 + F1_3 + F45_innen_A

Unbalanced Panel: n=382, T=0-4, N=719

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.47496	0.68917	0.861
individual	0.07655	0.27668	0.139

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.00000	0.07199	0.13040	0.14360	0.17900	0.22030

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-2.21000	-0.47200	0.03280	-0.00048	0.45900	2.74000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	-0.499286	0.202502	-2.4656	0.0139146	*
F10_1	0.059888	0.023317	2.5684	0.0104198	*
F22	0.093786	0.026513	3.5373	0.0004306	***
F26	0.107695	0.029780	3.6164	0.0003199	***
F31	0.138222	0.029333	4.7121	2.951e-06	***
F39	0.253103	0.034121	7.4177	3.414e-13	***
F43	0.140491	0.026589	5.2838	1.685e-07	***
F58	0.158918	0.032443	4.8983	1.198e-06	***
F1_3	0.113135	0.035325	3.2027	0.0014225	**
F45_innen_A	0.070413	0.029017	2.4266	0.0154880	*

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 593.81
 Residual Sum of Squares: 343.12
 R-Squared: 0.42219
 Adj. R-Squared: 0.41631
 F-statistic: 57.5584 on 9 and 709 DF, p-value: < 2.22e-16

A22 Korrelationsmatrix der Bewertung der Beleuchtung und der Zufriedenheit mit Temperatur, Luftqualität und Geräuschpegel

alle Jahreszeiten

		Beleuchtung durch Tageslicht	Zufriedenheit mit der Temperatur	Zufriedenheit mit der Luftqualität	Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel
Beleuchtung durch Tageslicht ohne Verschattung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	1 854			
Zufriedenheit mit der Temperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,227** ,000 848	1 958		
Zufriedenheit mit der Luftqualität	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,232** ,000 840	,388** ,000 940	1 949	
Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,139** ,000 847	,230** ,000 949	,313** ,000 943	1 959

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Frühling

		Beleuchtung durch Tageslicht	Zufriedenheit mit der Temperatur	Zufriedenheit mit der Luftqualität	Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel
Beleuchtung durch Tageslicht ohne Verschattung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	1 230			
Zufriedenheit mit der Temperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,285** ,000 228	1 250		
Zufriedenheit mit der Luftqualität	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,216** ,001 224	,444** ,000 244	1 246	
Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,233** ,000 228	,144* ,023 249	,304** ,000 245	1 251

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Anhang

Sommer

		Beleuchtung durch Tageslicht	Zufriedenheit mit der Temperatur	Zufriedenheit mit der Luftqualität	Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel
Beleuchtung durch Tageslicht ohne Verschattung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	1 196			
Zufriedenheit mit der Temperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,266** ,000 196	1 227		
Zufriedenheit mit der Luftqualität	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,256** ,000 195	,422** ,000 223	1 225	
Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,162* ,024 194	,318** ,000 224	,313** ,000 223	1 226

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Herbst

		Beleuchtung durch Tageslicht	Zufriedenheit mit der Temperatur	Zufriedenheit mit der Luftqualität	Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel
Beleuchtung durch Tageslicht ohne Verschattung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	1 210			
Zufriedenheit mit der Temperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,194** ,005 209	1 235		
Zufriedenheit mit der Luftqualität	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,233** ,001 207	,316** ,000 232	1 234	
Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,099 ,156 208	,128 ,053 231	,384** ,000 231	1 234

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Winter

		Beleuchtung durch Tageslicht	Zufriedenheit mit der Temperatur	Zufriedenheit mit der Luftqualität	Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel
Beleuchtung durch Tageslicht ohne Verschattung	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	1 218			
Zufriedenheit mit der Temperatur	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,194** ,004 215	1 246		
Zufriedenheit mit der Luftqualität	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,226** ,001 214	,377** ,000 241	1 244	
Zufriedenheit mit dem Geräuschpegel	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig) N	,074 ,275 217	,329** ,000 245	,262** ,000 244	1 248

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

A23 Einfluss von Raumklimaparametern auf die Zufriedenheit mit der Beleuchtung

Variablen:

F22 1 = „sehr schlecht“ ... 5 = „sehr gut“
 F31 1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
 F39 1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F22 ~ F31.within + F31.between + F39.within + F39.between

Unbalanced Panel: n=402, T=0-4, N=792

Effects:

	var	std.dev	share			
idiosyncratic	0.7081	0.8415	0.566			
individual	0.5424	0.7365	0.434			
theta:						
	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
	0.0000	0.3715	0.3715	0.3888	0.4493	0.5039

Residuals:

	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
	-2.71000	-0.48500	0.13200	0.00627	0.60600	2.52000

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.842771	0.217776	8.4618	< 2.2e-16	***
F31.within	0.092485	0.053438	1.7307	0.0839	.
F31.between	0.235489	0.060102	3.9181	9.699e-05	***
F39.within	0.093639	0.059156	1.5829	0.1138	
F39.between	0.273066	0.063742	4.2840	2.063e-05	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 702.48
 Residual Sum of Squares: 575.45
 R-Squared: 0.18193
 Adj. R-Squared: 0.18078
 F-statistic: 43.432 on 4 and 787 DF, p-value: < 2.22e-16

A24 Häufigkeit gesundheitlicher Beschwerden

Variablen:

F54_Mittelwert	1 = „fast immer“ ... 5 = „fast nie“
F1_3	1 = „kontrolliert“ ... 5 = „kontrollierend“
F10_1	1 = „eigentlich immer“ ... 5 = „eigentlich nie“
F39	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
F58	1 = „sehr unzufrieden“ ... 5 = „sehr zufrieden“
Grossraumbüro_2	1 = „Zellenbüro“, 2 = „Großraumbüro“
F62_Geschlecht	1 = „weiblich“, 2 = „männlich“

Oneway (individual) effect Random Effect Model (Swamy-Arora's transformation)

Model Formula:

F54_Mittelwert ~ F1_3.within + F1_3.between + F10_1.within + F10_1.between + F39.within + F39.between + F58.within + F58.between + factor(Grossraumbüro_2) + factor(F62_Geschlecht)

Unbalanced Panel: n=364, T=0-4, N=741

Effects:

	var	std.dev	share
idiosyncratic	0.2170	0.4659	0.484
individual	0.2316	0.4813	0.516

theta:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0.0000	0.4352	0.5122	0.4546	0.5122	0.5644

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
-1.4900	-0.3220	0.0430	-0.0022	0.3080	1.4400

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)	
(Intercept)	0.832798	0.215661	3.8616	0.0001226	***
F1_3.within	0.050733	0.037560	1.3507	0.1772018	
F1_3.between	0.172236	0.044018	3.9129	9.973e-05	***
F10_1.within	-0.004127	0.025615	-0.1611	0.8720460	
F10_1.between	0.099925	0.028968	3.4495	0.0005939	***
F39.within	0.204610	0.033256	6.1525	1.257e-09	***
F39.between	0.352685	0.038981	9.0476	< 2.2e-16	***
F58.within	0.039096	0.036262	1.0782	0.2813208	
F58.between	0.190128	0.039449	4.8196	1.751e-06	***
factor(Grossraumbüro_2)2	-0.163309	0.075109	-2.1743	0.0300031	*
factor(F62_Geschlecht)2	0.353505	0.065033	5.4358	7.445e-08	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 362.2
 Residual Sum of Squares: 163.65
 R-Squared: 0.54836
 Adj. R-Squared: 0.54022
 F-statistic: 88.5716 on 10 and 730 DF, p-value: < 2.22e-16

ISBN 978-3-7315-0312-5



9 783731 503125 >

