

Stephan Völker, Stefan Gramm,
Sirri Aydinli, Heinrich Kaase

Tageslichtnutzung in Wohn- und Arbeitsräumen zur Verbesserung der visuellen Behaglichkeit und der Aufenthaltsqualität

F 2871

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9351-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abschlussbericht für die Zeit vom 01.09.2011 bis 31.03.2013
zum Forschungsprojekt

Tageslichtnutzung in Wohn- und Arbeitsräumen zur
Verbesserung der visuellen Behaglichkeit und der
Aufenthaltsqualität

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des
Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.8 / II 3-F20-10-1-133)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker
TU Berlin

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Stefan Gramm
Dr.-Ing. Sırrı Aydınlı
TU Berlin

Projektpartner: Prof. Dr. rer. nat. Heinrich Kaase

Inhalt

1	Kurzfassung der Projektbeschreibung	3
2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	4
2.1	Teilprojekt A „Laboruntersuchungen an Tageslichtbauteilen“	4
2.1.1	Kennzahlen zur Bewertung der photometrischen, farbmetrischen, photobiologischen und energetischen Eigenschaften von Fenstergläsern	4
2.1.2	Doppelverglasungen	7
2.1.3	Polycarbonat für Oberlichter	9
2.2	Teilprojekt B „Testraum mit künstlichem Fenster und Probandenversuche“	12
2.2.1	Ziel der Untersuchungen	12
2.2.2	Reflexblendung	13
2.2.3	Versuchsdesign	15
2.2.4	Aufbau des Versuchsraums mit künstlichem Himmel	20
2.2.5	Messtechnische Erfassung	25
2.2.6	Versuchsablauf	32
2.2.7	Auswertung	32
2.3	Teilprojekt C „Tageslicht in Gebäuden: Befragungen und Felduntersuchungen“	46
2.3.1	Verwaltungsgebäude	46
2.3.2	Industriehallen mit Oberlichtern	56
2.3.3	Einkaufsarkaden	65
2.3.4	Wohngebäude	71
3	Zusammenfassende Bewertung	82

1 Kurzfassung der Projektbeschreibung

Die ausreichende Versorgung von Aufenthaltsräumen mit Tageslicht und angemessene Sichtverbindung nach außen sind essentielle Voraussetzungen sowohl für die Sicherheit, die Gesundheit und das Wohlbefinden als auch für die Leistungsfähigkeit der Menschen.

In DIN 5034 werden bisher nur Mindestanforderungen an Wohnräume und Arbeitsstätten hinsichtlich der „Sichtverbindung nach außen“ und teilweise der „ausreichenden Helligkeit“ geregelt. So ist es zurzeit nicht möglich, die Qualität der Aufenthaltsräume bezüglich der Tageslichtnutzung differenziert zu bewerten und zu klassifizieren: Verbindliche Regeln und Anforderungen beziehen sich auf über 30 Jahre alte Untersuchungen. Moderne Gebäude zeichnen sich aber nicht nur durch ihre Architektur und Bauweise aus, sondern auch durch neue Techniken, wie neuartige Verglasungen und Tageslichtsysteme. Ihre Wirkung soll in diesem Projekt einerseits im Labor nach abgesicherten Methoden messtechnisch erfasst werden und andererseits soll in Felduntersuchungen der Einfluss auf die Nutzer ermittelt werden.

Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) dient der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz der Beschäftigten beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten. Dabei spielt das Tageslicht am Arbeitsplatz hinsichtlich verschiedener Aspekte eine wichtige Rolle; so schreibt die ArbStättV eine „ausreichende Versorgung der Arbeitsstätte mit Tageslicht“ vor.

Die im Rahmen des Vorhabens aus Messungen, Felduntersuchungen und Nutzerbefragungen gewonnenen Erkenntnisse werden zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität in Wohnräumen und zusätzlich zur besseren Gestaltung und zum optimierten Betrieb bezüglich der Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten in Arbeitsstätten bei einer energieeffizienten Beleuchtung beitragen. Damit stehen Grundlagen zur Bestimmung des Tageslichtbedarfs in Aufenthaltsräumen und zur Erhöhung der visuellen Behaglichkeit durch Tageslichtbeleuchtung in Gebäuden zur Verfügung.

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Vorhabens lassen sich in drei Bereiche zusammenfassen:

Teilprojekt A: Laboruntersuchungen an Tageslichtbauteilen

Teilprojekt B: Aufbau eines künstlichen Fensters und Probandenversuche

Teilprojekt C: Tageslicht in Gebäuden: Befragungen und Felduntersuchungen

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

2.1 Teilprojekt A „Laboruntersuchungen an Tageslichtbauteilen“

Im Teilprojekt A werden die Einflüsse von Fenstergläsern auf verschiedene Parameter durch Labormessungen untersucht und bewertet.

2.1.1 Kennzahlen zur Bewertung der photometrischen, farbmétrischen, photobiologischen und energetischen Eigenschaften von Fenstergläsern

Lichttransmissionsgrad τ_{D65}

Der Lichttransmissionsgrad τ_{D65} stellt das Verhältnis des durch ein Material transmittierten Lichtstroms zum auffallenden Lichtstrom bei senkrechter Beleuchtung mit Normlichtart D65 dar. Er ist für die Helligkeit durch das Tageslicht im Innenraum maßgebend.

Circadianer Wirkungsfaktor a_{cv}

Der circadiane Wirkungsfaktor a_{cv} wurde definiert, um den Einfluss unterschiedlicher künstlicher Lichtquellen und des Tageslichtes im Innenraum auf das circadiane System des Menschen zu beschreiben. Er stellt das Verhältnis der mit der in DIN 5031 definierten spektralen Wirkungsfunktion für die Melatoninsuppression $c(\lambda)$ (Abbildung 1) gewichteten Strahlungsfunktion zur mit dem spektralen Hellempfindungsgrad des menschlichen Auges $V(\lambda)$ gewichteten Strahlungsfunktion dar.

Unter Berücksichtigung des spektralen Transmissionsgrades $\tau(\lambda)$ von lichtdurchlässigen Materialien ergibt sich:

$$a_{cv} = \frac{\int S(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int S(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}$$

Für die Strahlungsfunktion $S(\lambda)$ wird die Spektralverteilung der Normlichtart D65 eingesetzt:

$$a_{cv} = \frac{\int S_{D65}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int S_{D65}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}$$

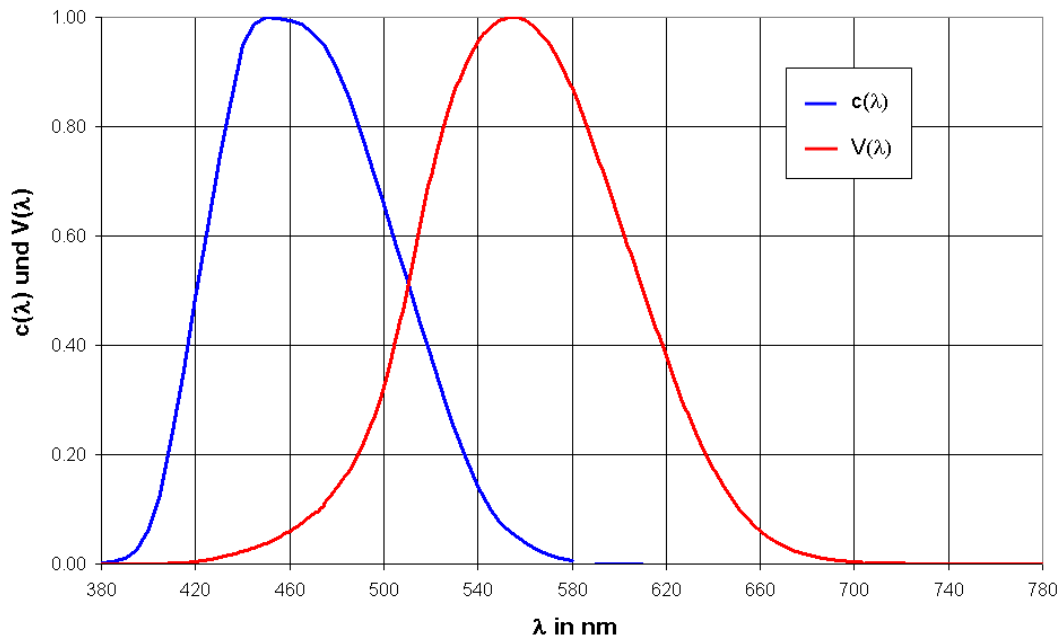


Abbildung 1: spektraler Hellempfindungsgrad des menschlichen Auges $V(\lambda)$ und relative spektrale Wirkungsfunktion für die Melatoninsuppression $c(\lambda)$

Effektiver circadianer Wirkungsfaktor $a_{cv,eff}$

Bei der Berechnung des a_{cv} wird nicht berücksichtigt, dass Verglasungen schon aufgrund des Transmissionsgrades im Vergleich zur Situation ohne Verglasung einen geringeren Einfluss auf das circadiane System haben können. Dafür wird der effektive circadiane Wirkungsfaktor $a_{cv,eff}$ definiert:

$$a_{cv,eff} = a_{cv} \cdot \tau_{D65}$$

Mit

$$\tau_{D65} = \frac{\int S_{D65}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int S_{D65}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}$$

ergibt sich:

$$a_{cv,eff} = \frac{\int S_{D65}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int S_{D65}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}$$

Gesamtenergiedurchlassgrad g

Der Gesamtenergiedurchlassgrad g ist für die Strahlungsbelastung des Innenraumes insbesondere in warmen Jahreszeiten maßgebend. Er setzt sich aus dem Strahlungstransmissionsgrad τ_e und dem sekundären Wärmeabgabegrad nach innen q_i zusammen.

$$g = \tau_e + q_i$$

Ähnlichste Farbtemperatur T_{cp}

Die ähnlichste Farbtemperatur T_{cp} beschreibt den Farbeindruck einer weißen Lichtquelle. Z. B. weist das mittlere Tageslicht D65 eine ähnlichste Farbtemperatur von 6504 K auf. Durch im sichtbaren Bereich selektive spektrale Transmissionsgrade von Fenstergläsern kann die ähnlichste Farbtemperatur und damit der Farbeindruck im Innenraum beeinflusst werden.

Farbwiedergabe

Die Farbwiedergabe ist ein Kennwert, wie gut unterschiedliche Körperfarben, im Vergleich zur Beleuchtung mit einer Normlichtart, bei einer bestimmten Beleuchtung wahrgenommen werden. Für die Bewertung von Lichtquellen wurden 14 Testfarben definiert, für jede einzelne kann ein spezieller Farbwiedergabeindex R_i bestimmt werden.

Allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a

Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a stellt den arithmetischen Mittelwert der speziellen Farbwiedergabeindizes R_1 bis R_8 dar.

Farbwiedergabe für gesättigtes Rot R_9

Die Testfarbe 9 stellt mit ihrem gesättigten Rot eine hohe Anforderung an die Beleuchtung. Da sie nicht im allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a enthalten ist, sollte der Wert für R_9 oft zusätzlich angegeben werden.

2.1.2 Doppelverglasungen

Für Laboruntersuchungen wurden acht verschiedene Doppelverglasungen in unterschiedlichen Kombinationen einzelner Gläser (6 mm Dicke) ausgewählt, deren Aufbauten in Abbildung 2 skizziert sind (Scheibenzwischenraum 16 mm, Argon-Füllung, Silberbedampfung). Darunter finden sich zwei unbeschichtete Gläser (Typ 1 und Typ 2), drei Wärmeschutzverglasungen (Typen 3 bis 5) sowie drei Sonnenschutzgläser (Typen 6 bis 8).

Da Einfachverglasungen heutzutage für Fenstergläser nicht mehr eingesetzt werden, wurden diese bei den Laboruntersuchungen nicht berücksichtigt.

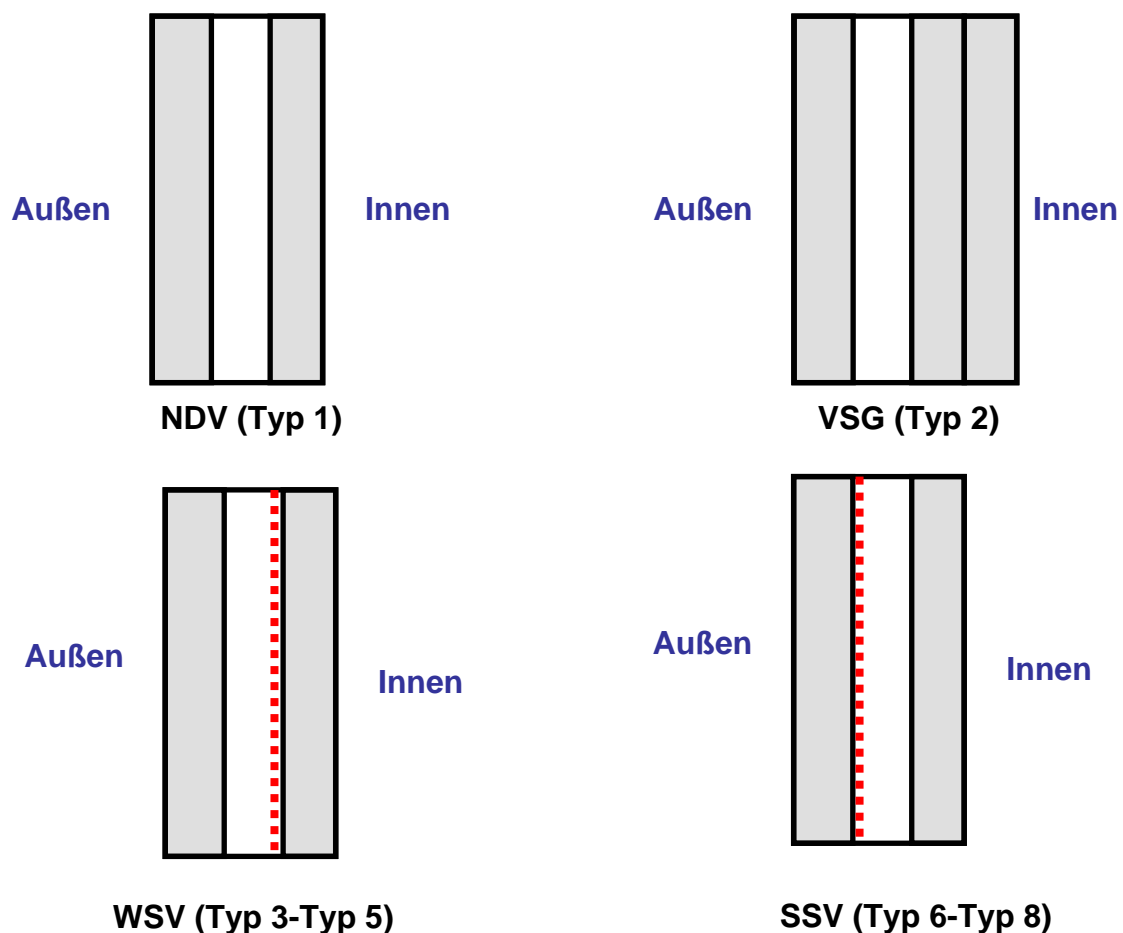


Abbildung 2: Schematische Darstellung typischer Doppelverglasungen

Die gemessenen spektralen Transmissionsgrade der acht unterschiedlichen Doppelverglasungen sind in Abbildung 3 in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ aufgetragen.

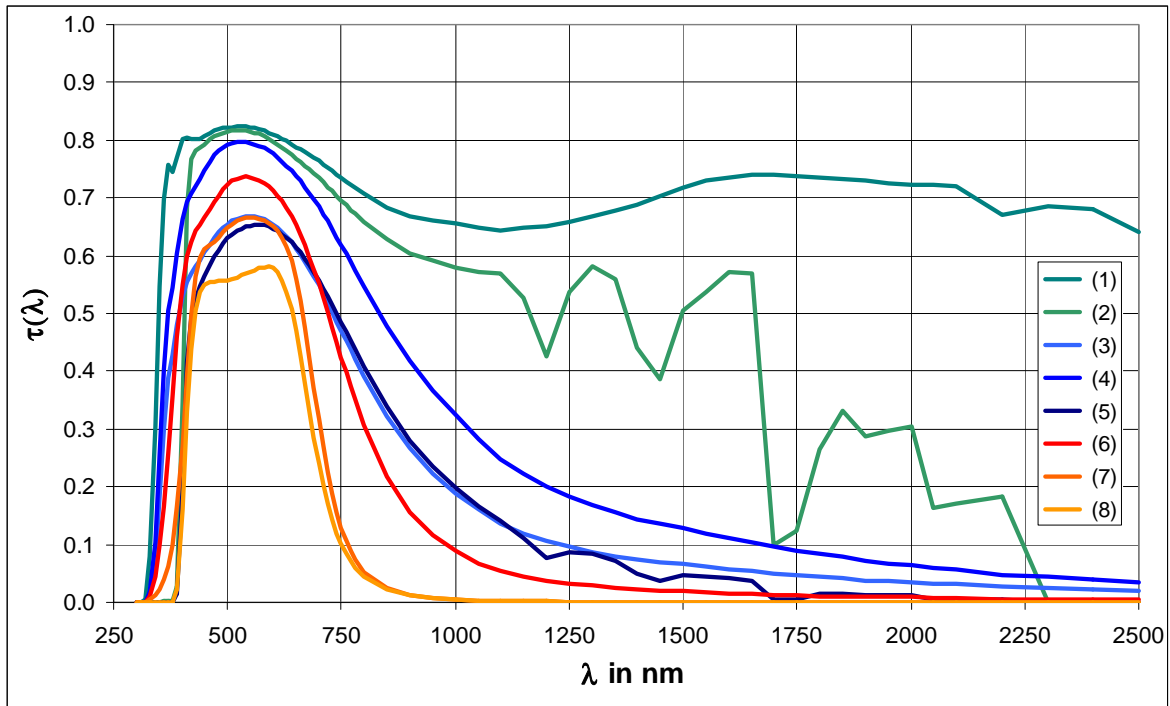


Abbildung 3: gemessene spektrale Transmissionsgrade der Doppelverglasungen (1) bis (8)

Die Ergebnisse zu den Proben (3) bis (8) weisen deutlich den Einfluss der Beschichtungen im Infrarotbereich im Vergleich zu den unbeschichteten Proben (1) und (2) auf. Weiterhin zeigt sich, dass die Sonnenschutzgläser 7 und 8 bereits im sichtbaren roten Wellenlängenbereich ab 700 nm sperren, was sich auf die Farbtemperatur und die Rotwiedergabe auswirkt. Die absoluten Werte des Lichttransmissionsgrades und des Gesamtenergiedurchlassgrades lassen merkbare Tendenzen in der Höhe der Kurven erkennen.

Die aus den spektralen Transmissionsgraden berechneten Werte für die einzelnen Parameter sind in Tabelle 1 eingetragen.

Tabelle 1: Aus den spektralen Transmissionsgraden berechnete Werte für Doppelverglasungen und mittleres Tageslicht D65

	τ_{D65}	g	τ_{D65}/g	a_{cv}	$a_{cv,eff}$	T_{cp}	R_a	R_g
D65	1,00	1,00	1,00	0,94	0,94	6500	100	100
1	0,82	0,79	1,04	0,94	0,77	6540	99	93
2	0,81	0,77	1,05	0,93	0,75	6510	98	89
3	0,66	0,50	1,33	0,89	0,59	6270	96	80
4	0,79	0,63	1,25	0,92	0,72	6420	97	85
5	0,64	0,48	1,33	0,86	0,55	6000	96	80
6	0,72	0,43	1,66	0,90	0,65	6340	96	76
7	0,65	0,31	2,09	0,88	0,58	6310	94	67
8	0,57	0,27	2,10	0,90	0,51	6350	95	67

Die bereits in den Verläufen der spektralen Transmissionsgrade zu erkennenden Tendenzen werden durch die Berechnungen belegt.

Trägt man nun die Werte für a_{cv} und $a_{cv,eff}$ über τ_{D65} auf (Abbildung 4) ist jeweils ein linearer Zusammenhang zu erkennen.

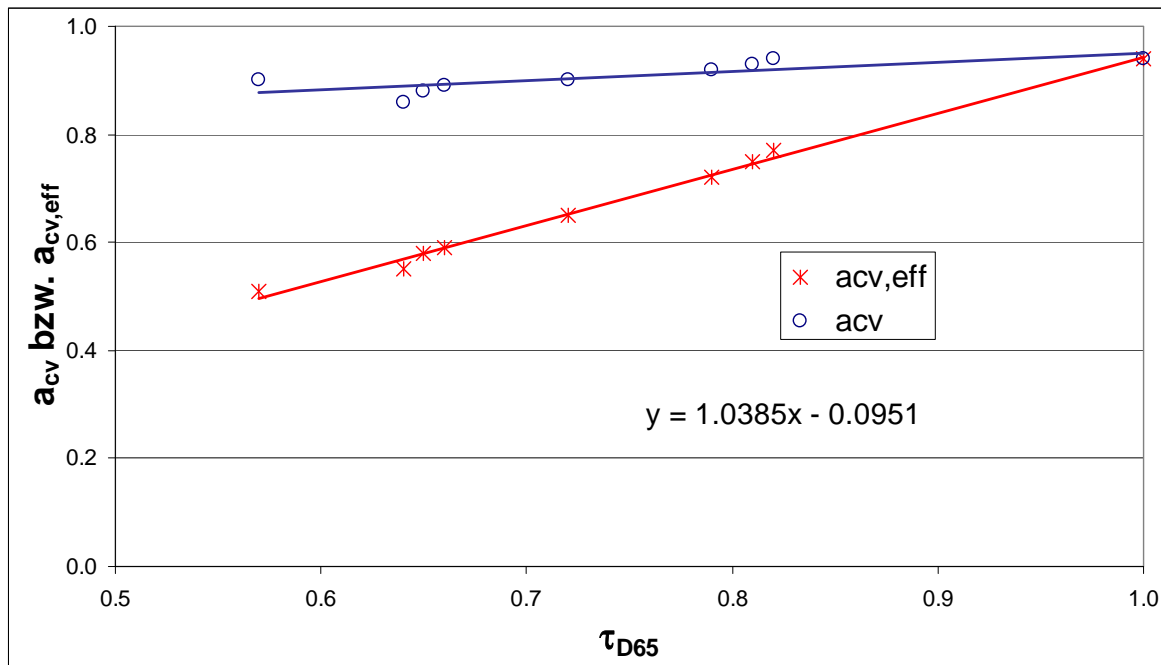


Abbildung 4: Effektiver circadianer Wirkungsfaktor in Abhängigkeit des Lichttransmissionsgrades

Für a_{cv} bleiben die Werte annähernd konstant und $a_{cv,eff}$ lässt sich aus dem linearen Ansatz wie folgt berechnen:

$$a_{cv,eff} = 1,0385 \cdot \tau_{D65} - 0,0951$$

2.1.3 Polycarbonat für Oberlichter

Als Material für Oberlichter werden farbneutrale sowohl durchscheinende als auch streuende Polycarbonat-Stegplatten (PC-Platten) mit unterschiedlichem Aufbau (20 - 40 mm Dicke) eingesetzt. Von diesen Materialien wurden sieben verschiedene Typen im Labor messtechnisch untersucht. Die gemessenen spektralen Transmissionsgrade der PC-Platten sind in Abbildung 5 in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgetragen. Die aus den spektralen Transmissionsgraden berechneten lichttechnischen Größen der einzelnen Proben 1 bis 7 sind in Tabelle 2 enthalten.

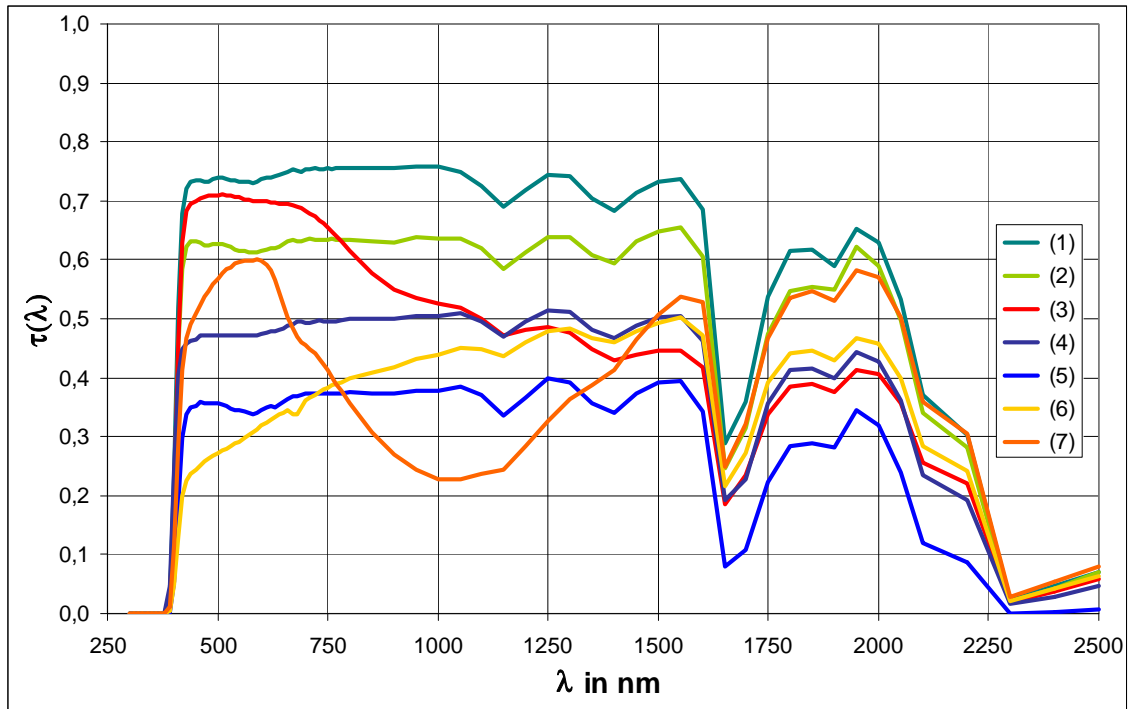


Abbildung 5: Spektrale Transmissionsgrade der PC-Platten Nr.1 bis Nr.7

Tabelle 2: Lichttechnische Größen für PC-Platten im Vergleich mit Tageslicht D65

	τ_{D65}	g	τ_{D65}/g	a_{cv}	$a_{cv,eff}$	T_{cp}	R_a	R_9
D65	1,00	1,00	1,00	0,94	0,94	6500	100	100
1	0,74	0,69	1,06	0,93	0,68	6400	100	99
2	0,62	0,61	1,01	0,94	0,58	6530	99	97
3	0,70	0,60	1,18	0,93	0,65	6450	99	96
4	0,47	0,47	1,00	0,93	0,44	6370	99	98
5	0,35	0,38	0,92	0,94	0,33	6490	98	93
6	0,30	0,48	0,62	0,80	0,24	5330	99	99
7	0,59	0,53	1,11	0,84	0,49	5950	94	69

Werden die Werte für a_{cv} und $a_{cv,eff}$ über τ_{D65} aufgetragen (Abbildung 6), ist ein linearer Zusammenhang erkennbar. Während für a_{cv} die Werte annähernd konstant sind, lässt sich $a_{cv,eff}$ wie folgt berechnen:

$$a_{cv,eff} = 0,977 \cdot \tau_{D65} - 0,0377$$

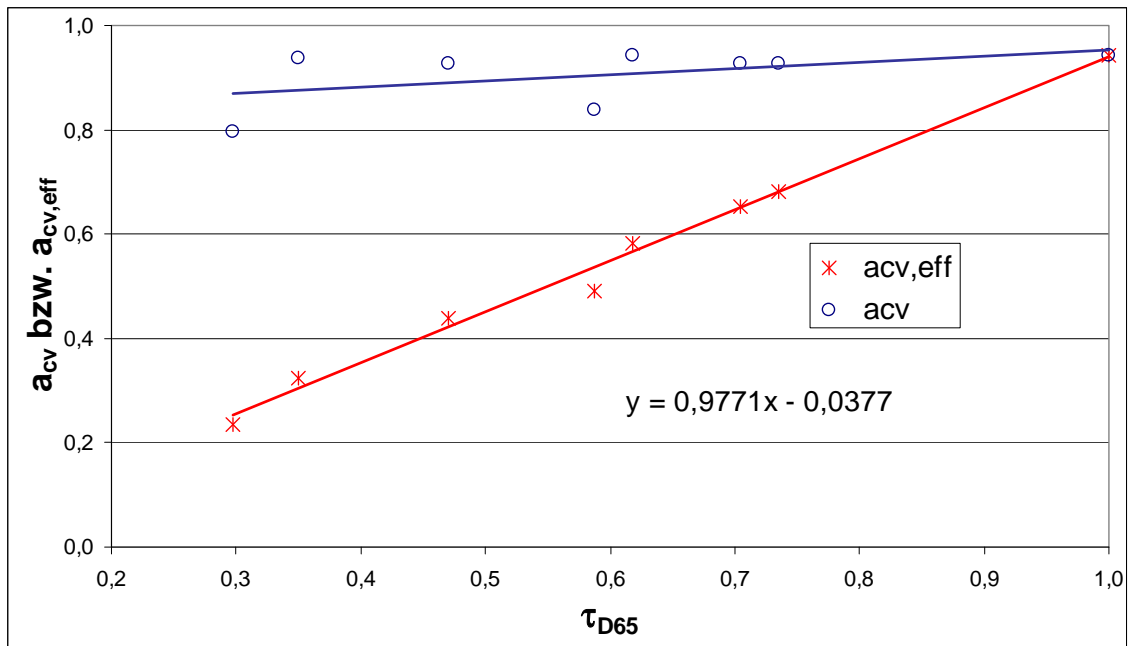


Abbildung 6: Effektiver circadianer Wirkungsfaktor in Abhängigkeit des Lichttransmissionsgrades

2.2 Teilprojekt B „Testraum mit künstlichem Fenster und Probandenversuche“

Für die Planung künstlicher Beleuchtungsanlagen an Arbeitsplätzen gibt die DIN EN 12464 Vorgaben für die Mindestbeleuchtungsstärke. So ist beispielsweise für Büroarbeitsplätze ein Wertungswert für die Horizontalbeleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe von 500 lx festgelegt. Nach DIN 5034 gelten die Horizontalbeleuchtungsstärken bei Tageslichtbeleuchtung durch ein vertikales Seitenfenster als ausreichend, solange sie den 0,6-fachen Wert des durch die DIN EN 12464 vorgegebenen Mindestwertes nicht unterschreiten. Bei einer die künstliche Beleuchtung automatisch einschaltenden tageslichtabhängigen Regelung wird somit immer auf 500 lx geregelt, obwohl die Beleuchtungsstärke durch das seitliche Tageslicht noch ausreichend wäre. Damit bleiben hierbei erhebliche Energieeinsparpotentiale ungenutzt.

In diesem Teilprojekt B wird der Einfluss des seitlichen Tageslichteinfalls auf die Sehleistung (Einfluss der Leuchtdichtekontrastwiedergabe) mit Probandenversuchen unter kontrollierten Beleuchtungsbedingungen im Labor untersucht. Dazu wurde ein Testraum auf der Basis einer beleuchtungstechnischen Planung mit der Lichtplanungssoftware Relux realisiert.

2.2.1 Ziel der Untersuchungen

Aufgrund des Inkrafttretens der Energieeinsparverordnung (EnEV) 2007 und der Einführung des Energieausweises für Gebäude, besteht eine große Motivation bei Bauunternehmern und Investoren den Energiebedarf zu verringern. So liegt allein der Energieaufwand für elektrisches Licht in Bürogebäuden bei 60 %, so dass moderne Gebäude zunehmend mit tageslichtabhängigen Beleuchtungssteuerungen und -regelungen ausgestattet werden, um ein Maximum an Energie bei der Beleuchtung einzusparen.

Eine Möglichkeit zur Energieeinsparung zeigt K. Petry in seiner Arbeit von 1984. Er überprüft rechnerisch die Mindestbeleuchtungsstärke, anhand der Kugelbeleuchtungsstärke (ESI) und des Kontrastwiedergabefaktors (CRF) und definiert eine Tageslicht-Mindestbeleuchtungsstärke. Nach seinem Urteil wird bei gleicher Beleuchtungsstärke von künstlicher Beleuchtung und seitlichem Tageslicht, bei letzterem eine höhere Sehleistung erzielt und somit auch die Produktivität gesteigert. Er empfiehlt daher 50 % bis 60 % der Nennbeleuchtungsstärke bei seitlich einfallendem Tageslicht anzusetzen. Seine Ergebnisse wurden in die DIN 5034 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 0,6-fache des in DIN EN 12464-1 angegebenen Wertungswertes der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m beträgt.“ Diese Aussage soll mithilfe eines Probandenversuchs verifiziert werden.

Die Festlegung der Mindestbeleuchtungsstärke erfolgt dabei nach Tabelle 5.26 aus DIN EN 12464. Für Büros wird dort bei der Arbeitsplatzbeleuchtung eine Nennbeleuchtungsstärke von 500 lx angegeben. Fällt diese bei tageslichtbezogenen Arbeitsplätzen unter diesen Wert, wird die Allgemeinbeleuchtung eingeschaltet. Sollte sich herausstellen, dass die Nennbeleuchtungsstärke bei seitlich einfallendem Tageslicht bei gleicher Sehleistung um das 0,6fache reduzieren lässt, könnte die Allgemeinbeleuchtung später zugeschaltet und somit Energie eingespart werden.

2.2.2 Reflexblendung

Reflexblendung wird als diejenige Blendung bezeichnet, die durch Reflexionsbilder von Lichtquellen oder streuenden Flächen im Gesichtsfeld entsteht. Diese Reflexionsbilder sind mittelgroße bis kleine Felder mit zu hohen Leuchtdichten gegenüber den mittleren Leuchtdichten im Gesichtsfeld und wirken sich meist negativ auf die Sichtbarkeit des Sehdetails aus. Haben Papier und Druck unterschiedliche Reflexionseigenschaften, kann es bei ungünstigen Beleuchtungswinkeln passieren, dass sich die Leuchtdichten der beispielsweise schwarz gedruckten, glänzenden Schrift denen des matten unmittelbaren Umfelds annähern. Dieser Effekt wird als Kontrastminderung durch Reflexblendung bezeichnet. Haben Papier und die darauf gedruckte Schrift die gleichen Reflexionseigenschaften kann der Kontrast zwischen Schrift und Hintergrund durch die Reflexblendung bei Null oder nahe Null liegen, und die Schrift durch die niedrigen Leuchtdichtekontraste verschwinden. Dies stellt jedoch einen Extremfall dar. Die Kontrastminderung stellt eine physiologische Störung dar.

Weiter kann es zu einer Reihe von psychologischen Störungen durch Reflexblendung kommen, die die visuelle Informationsaufnahme beeinflussen können:

Sehr helle Flächen lenken die Blickrichtung vom eigentlichen Sehdetail ab, sodass eine Verschiebung der Aufmerksamkeit möglich ist. Dabei kommt es wiederholt zu Umadaptationsvorgängen an die hohen Leuchtdichten der Reflexbilder und an die Leuchtdichten der eigentlichen Sehaufgabe. Diese ständige Umadaptation kann Ermüdung verursachen.

Bei sehr stark glänzenden Oberflächen kann es immer wieder zur Fernakkommodation auf das spiegelnde Objekt führen, da sich dieses meist in einer anderen Entfernung vom Auge befindet als die eigentliche Sehaufgabe. Ist das Auge jedoch nah akkommodiert, kommt es durch das binokulare Sehen zu unscharfen Glanzdoppelbildern. Das Auge unterliegt jedoch dem Fusionszwang (sensomotorischer Regelvorgang zu Vermeidung von binokularen Doppelbildern) und versucht vergeblich, die Doppelbilder zu einem Bild zusammenzufügen. Dies ist jedoch nicht möglich, da entweder das Sehdetail oder das Spiegelbild als Doppelbild erscheint. Diese Effekte führen zur Ablenkung und somit zur Konzentrationsminderung, wodurch es zur Minderung der Sehleistung kommen kann.

In DIN 12464 Absatz 4.5.4 „Schleierreflexionen und Reflexblendung“ werden allgemeine Vorschläge zur Vermeidung dieser Effekte gemacht, wie z. B. Anordnung der Arbeitsplätze in Bezug zu den Leuchten, Fenstern und Dachoberlichtern. Zur quantitativen Erfassung die-

ser Effekte wurde 1991 von der LiTG ein weiteres Gütekriterium der Innenraumbeleuchtung eingeführt, der sogenannte Kontrastwiedergabefaktor CRF (Contrast-Rendering-Factor).

Bei der Innenraumbeleuchtung ist zu beachten, dass der Winkel von den Leuchten zum Beobachter eine entscheidende Rolle spielt. Es kommt nur zu dieser Kontrastminderung, wenn die Leuchten so ungünstig zum Arbeitsplatz angeordnet sind, dass es auch zur Reflexblendung kommt. Bei seitlich einfallendem Tageslicht, ist allein aus der Geometrie erkenntlich, dass es kaum bis gar nicht zu Reflexblendungen kommen kann. (Abbildung 7)

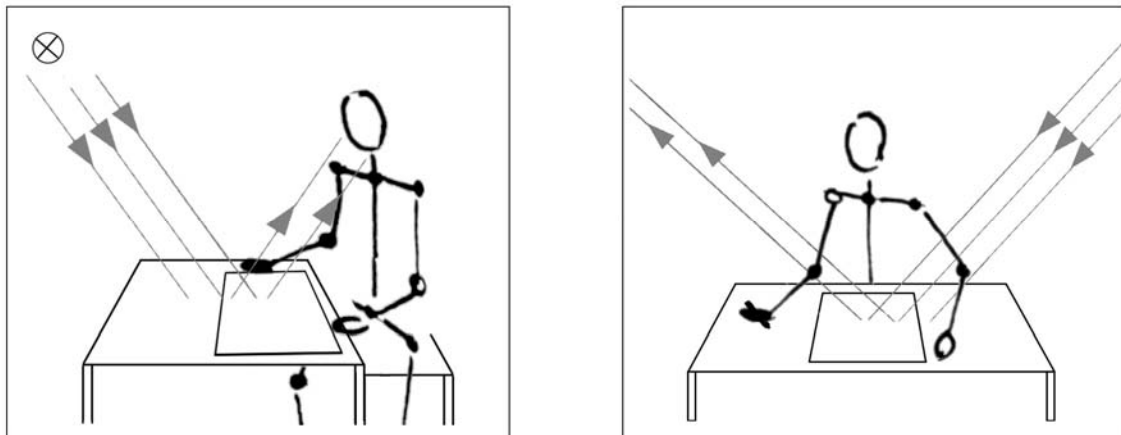


Abbildung 7: Geometrien verschiedener Lichteinfallrichtungen

Rein physikalisch sind diese Effekte unverkennbar. Da der CRF unmittelbar abhängig vom Kontrast ist, sind Petrys Ergebnisse ebenfalls nicht zu bestreiten. Und es ist nicht verwunderlich, dass sich bei seitlich einfallendem Tageslicht sehr viel bessere CRF-Werte einstellen, als bei direkter künstlicher Beleuchtung. Die durch die Reflexblendung hervorgerufenen Störungen korrelieren somit mit dem CRF. Daher zieht Petry die Schlussfolgerung, dass die Mindestbeleuchtungsstärke für seitlich einfallendes Tageslicht herabgesetzt werden kann. Es ist dabei aber nicht nachgewiesen, ob diese Kontrastminderung wirklich die Sehleistung und damit die Arbeitsleistung des Menschen vermindert.

Allerdings treten diese Effekte nur bei spiegelnden Flächen auf, nicht so bei komplett diffus reflektierenden matten Oberflächen. D. Fischer bemerkt 1981, dass die Gefahr durch Kontrastierung nicht überbewertet werden sollte, da bei Beleuchtungsstärken um 500 lx die Decke nicht so stark mit Leuchten gefüllt ist, dass man der Spiegelung nicht durch einfache Änderung der Blickrichtung oder Lage der Sehaufgaben ausweichen könnte.

Es ist jedoch auch möglich, dass die Kontrastminderung durch Reflexblendung nicht die einzige Ursache darstellt, die zur Akzeptanz niedrigerer Beleuchtungsstärken bei Tageslichtbeleuchtung führen. So wird die Qualität der Beleuchtung nicht nur durch die Sehleistung bestimmt, sondern auch durch das Wohlbefinden. Es ist möglich, dass eine Tageslichtverteilung im Raum zu einem größeren Wohlbefinden führt, als eine Lichtverteilung der künstlichen Allgemeinbeleuchtung. Ebenso ist es möglich, dass allein das Wissen über die Präsenz von Tageslicht zu einem größeren Wohlbefinden führt.

2.2.3 Versuchsdesign

Papiersorten

Die Kontrastminderung durch Reflexblendung ist abhängig von den Reflexionseigenschaften des Papiers. Da nicht alle im täglichen Gebrauch vertretenen Papiersorten untersucht werden können, aber trotzdem ein breiter Bereich abgedeckt werden soll und da bekannt ist, dass die Kontrastminderung nur bei glänzenden Papiersorten auftritt, wurden zwei glänzenden Papiersorten, seidenmattes Papier und hochglänzendes Papier, und ein mattes Papier ausgewählt. Eine genaue Beschreibung der Papiersorten ist in Abschnitt 2.2.5 zu finden.

Beleuchtungsstärke

Es wurden die drei Beleuchtungsstärkeniveaus 100 lx, 300 lx und 500 lx ausgewählt. Diese Abstufungen sind nach der Beleuchtungsstärkeskala in DIN EN 12464-1 Abs. 4.3.2 ausgesucht, um wahrnehmbare Unterschiede zu erhalten. 500 lx wurden gewählt, da sie in DIN EN 12464-1 (2011) Absatz 5.26.2 für Lese und Schreibtätigkeit in Büroräumen angesetzt sind. 300 lx ergeben sich als das 0,6fache der 500 lx, und 100 lx wurden ausgewählt, um eine untere Grenze auszuloten.

Beleuchtungsgeometrien

Es ergeben sich zwei Beleuchtungsgeometrien: die direkte Allgemeinbeleuchtung und das seitlich einfallende Tageslicht. Da das natürliche Tageslicht ständigen Schwankungen unterliegt und somit keine definierten konstanten Zustände zu erreichen sind, wurde entschieden, die Untersuchungen mit einem künstlichen Tageslicht durchzuführen. Wie oben erwähnt ist der Lichteinfallswinkel ein maßgeblicher Einflussfaktor für die Kontrastminderung durch Reflexblendung. Um jedoch Einflüsse wie die Tageslichtverteilung im Raum und das Bewusstsein der Anwesenheit von Tageslicht mit zu berücksichtigen, wurde nicht einfach eine seitliche Anordnung der Lampen realisiert, sondern ein künstlicher Himmel hinter einem realen Fenster. Genaue Angaben zum Aufbau sind im Abschnitt 2.2.4 zu finden.

Da es sich in diesem Versuch um kein echtes Tageslicht handelt, die Leuchtdichteverteilung und damit der Lichteinfall dem Tageslicht nachempfunden sind, aber keine Verwechslung mit echtem Tageslicht aufkommen soll, werden im Folgenden die Begriffe künstliches Tageslicht sowie künstlicher Himmel verwendet. Weiter ist zu bemerken, dass auch die ähnlichste Farbtemperatur sowie die Lichtverteilung im Raum der des vollkommen bedeckten Himmels entsprechen.

Methodik

Aus diesen Parametern: drei verschiedenen Papiersorten (matt, seidenmatt, glänzend), zwei Beleuchtungsgeometrien und drei Beleuchtungsstärkeniveaus (100 lx, 300 lx, 500 lx) ergeben sich 18 verschiedene Szenarien. Eine Situation aus diesen 18 verschiedenen Kombination

wird im Folgenden als ein Szenario bezeichnet. Die 18 Szenarien wurden jedem Proband in einer randomisierten Reihenfolge dargeboten.

Es werden drei Methoden gewählt, um zu bestimmen, ob sich bei seitlich einfallendem Tageslicht die Nennbeleuchtungsstärke auf das 0,6fache reduzieren lässt. Um möglichst objektiv zu testen, ob die Arbeitsleistung bei seitlichem Tageslicht aber geringerem Beleuchtungsniveaus als bei direkter Allgemeinbeleuchtung gleich bleibt, wurde der d2-R Test ausgewählt. Für die Überprüfung des subjektiven Empfindens wurden zwei Strategien verfolgt. Zum einen wurde die subjektive Empfindung jedes Szenarios mit Hilfe eines Fragebogens abgefragt, des Weiteren sollten die Probanden die untere Annehmlichkeitsschwelle der Helligkeit selbst einstellen. Auf diese drei Methoden wird im Folgenden genauer eingegangen.

d2-R Test

Um die Arbeitsleistung in Abhängigkeit von der Beleuchtung und vom Papier zu erfassen, wurde ein allgemeiner Leistungstest der d2-R Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest ausgewählt. Er erschien erstmals 1962 unter dem Namen d2-Test und wurde stetig weiterentwickelt. Für diesen Versuch wurde die aktuelle 10. Auflage von 2010 verwendet.

Die Aufgabe des Probanden ist es, Zeichen zu unterscheiden die einander mehr oder weniger ähnlich sind. Ein Test beinhaltet 14 Testzeilen à 57 Zeichen, wobei sich drei Zeilen in Blöcken wiederholen. Pro Block gibt es 171 Zeichen mit jeweils 77 Zielobjekten („d“ mit zwei Strichen) und 94 Distraktoren („d“ mit mehr oder weniger als zwei Strichen, „p“ mit beliebig vielen Strichen). Abbildung 8 zeigt einen derartigen d2-R Testbogen. Die Bearbeitungszeit beträgt normalerweise 20 Sekunden pro Zeile. In der 9. Auflage des Tests (2002) wird darauf hingewiesen, dass es möglich ist, die Bearbeitungszeit auf 15 Sekunden je Zeile zu verkürzen und die Daten auf 20 Sekunden hochzurechnen, um eine Normierung vornehmen zu können. Damit wird die Gesamtbearbeitungszeit von 4 min 40 sec auf 3 min 30 sec verkürzt, was eine für die Probanden zumutbare Gesamtversuchszeit ermöglicht.

Es werden sowohl die Schnelligkeit (Quantität) der Bearbeitung anhand der bearbeiteten Zeichen (BZO), als auch die Genauigkeit (Qualität) anhand der Fehler erfasst. Daraus wird die Konzentrationsleistung (KL) bzw. die konzentrierte Aufmerksamkeit ermittelt. Ein großer Vorteil bei der Verwendung dieses Tests ist, dass durch die jahrelange Weiterentwicklung und Erprobung alle Testgütekriterien (Objektivität, Reliabilität, Validität, Skalierung, Normierung, Testökonomie, Nützlichkeit, Zumutbarkeit, Unverfälschbarkeit, Fairness) erfüllt werden. Des Weiteren ist der Test kriteriumsvalide, was bedeutet, dass das Verhalten innerhalb des Tests auf ein Kriterium außerhalb der Testsituation schließen lässt. In diesem Versuch wird das Verhalten innerhalb der Testsituation die sich ergebende Konzentrationsleistung sein. Das äußere Kriterium sind die Lichtverhältnisse in Kombination mit den Papieren. Zu jedem der 18 Szenarien wird dem Proband der d2-R Test dargeboten. Da bei Wiederholung des Tests eine anfängliche Leistungssteigerung von

25 % zu erwarten ist, wurden zwei d2-R Tests als Vortest durchgeführt, um den Lerneffekt gering zu halten.

Abbildung 8: Testbogen des d2-R Tests

Um 18 verschiedenen d2-R Testbögen zu generieren, wurden die drei Zeilen in einem Block vertauscht, und der Block mit den vertauschten Zeilen wiederholt. Ebenso wurden drei vertikale Blöcke von je 19 Zeichen vertauscht. Die 18 verschiedenen d2-R Bögen wurden in jedem Versuch randomisiert den drei verschiedenen Papiersorten zugewiesen, um durch die Vertauschungen entstandene mögliche systematische Fehler zu vermeiden.

Der d2-R Test misst die individuelle Konzentrationsleistung einer Person. In diesem Versuch ist jedoch das äußere Kriterium der Lichtverhältnisse in Bezug auf das Papier unabhängig von der Person von Interesse, weshalb das Szenario 500 lx, direkte Beleuchtung, mattes Papier als Basislinie festgesetzt und alle anderen Testergebnisse immer in das Verhältnis zu der Basislinie gesetzt werden. Werte größer eins zeigen somit, dass die Testergebnisse besser sind als im Vergleich zur Basislinie. Werte kleiner eins deuten auf schlechtere Werte.

Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Helligkeit

Zur Erfassung der subjektiven Empfindung der Probanden zu den einzelnen Szenarien wurde ein Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Beleuchtungssituation erstellt. (Abbildung 9) Er besteht aus vier Fragen zur Helligkeit bezüglich der Lese- und Schreibtätigkeit, zur Helligkeit im Raum, zur Sehaufgabe und zur Reflexion des Papiers, die jeweils durch Ankreuzen eines Kästchens auf einer siebenstufigen Skala beantwortet werden sollten. Dieser Fragebogen wurde von den Probanden nach jedem d2-R Test ausgefüllt. Die Reihenfolge der Fragen wurde auf jedem der 18 Fragebogen im Test randomisiert.

SB Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Beleuchtungssituation

SBA
Wie beurteilen Sie die Helligkeit der Beleuchtungssituation für die Lese- und Schreibtätigkeit?

zu **dunkel** ☹️ ☺️ genau richtig

zu **hell** ☹️ ☺️

SBB
Nehmen Sie Reflexion auf dem Papier wahr?

nein überhaupt nicht ja sehr

Wenn **nein überhaupt nicht**, gehen Sie bitte zum nächsten Fragenblock.
Wenn **ja**, wie beurteilen Sie die Reflexion in Bezug auf die **Lesbarkeit** des Textes?

überhaupt nicht störend ☺️ ☹️ sehr störend

Wie beurteilen Sie diese in Bezug auf die **Schreibarbeit**?

überhaupt nicht störend ☺️ ☹️ sehr störend

SBD
Wie empfinden Sie die Lichtverhältnisse im gesamten Raum im Allgemeinen?

sehr angenehm ☺️ ☹️ sehr unangenehm

zu **dunkel** ☹️ ☺️ genau richtig

zu **hell** ☹️ ☺️

SBC
Wie bewerten Sie die Sehaufgabe, in Bezug auf die momentanen Lichtverhältnisse, für die Augen?

überhaupt nicht anstrengend ☺️ ☹️ sehr anstrengend

Abbildung 9: Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Helligkeit

Helligkeit einstellen

Nach dem d2-R Test und dem Ausfüllen des Fragebogens sollten die Probanden in jedem Szenario die Helligkeit selbst einstellen. Um die untere Annehmlichkeitsschwelle zu finden, wurde den Probanden gesagt, dass sie „das Licht soweit herunter dimmen sollen, so dass Sie gerade noch angenehm über längere Zeit unter dieser Beleuchtung auf dem Tisch arbeiten können“. Dies geschah mit zwei Tastern, einem mit der Aufschrift „heller“ und dem anderen mit der Aufschrift „dunkler“, so war es auch ungeübten Probanden möglich, diese Aufgabe leicht zu bewältigen. Gleichzeitig war es somit für den Proband nicht möglich, den aktuellen Stand der Helligkeitseinstellung auf einer Skala o. ä. abzulesen. Es war nicht erlaubt, direkt aus dem Szenario heraus heller zu dimmen. Falls aber zu dunkel gedimmt wurde, war es erlaubt, wieder heller zu dimmen. Wurde die Aufgabenstellung nicht richtig verstanden, gab der Versuchsleiter den Hinweis, das Licht soweit herunter zu dimmen, bis der Proband eine andere Lichtquelle dazu schalten würde. Die von den Probanden eingestellte Helligkeit wurde mit einem Luxmeter an einem Referenzpunkt gemessen, der Messwert wurde dem Probanden während des Versuchs nicht mitgeteilt.

Unabhängige und abhängige Variablen

Aus diesem Versuchsdesign ergeben sich die folgenden in Tabelle 3 eingetragenen Variablen.

Tabelle 3: Variablen des Probandenversuchs

Unabhängige Variable	Abhängige Variable	Methode
Beleuchtungsstärke: 500 lx, 300 lx, 100 lx	Konzentrationsleistung, Qualität und Quantität der Arbeit	d2-R
Lichtrichtung: Direktbeleuchtung, seitlicher Lichteinfall	Helligkeitswahrnehmung im Raum und für die Sehaufgabe, Glanzwahrnehmung	Fragebogen
Reflexionseigenschaften des Papiers: matt, halbgläzend, glänzend	Subjektive untere Annehmlichkeitsgrenze	Helligkeit einstellen

Es wurde versucht, alle weiteren Parameter wie z. B. Umgebungstemperatur und Sitzposition konstant zu halten. Die Festlegung der Altersklasse der Probanden zwischen 20-39 Jahren orientierte sich an den Normierungstabellen des d2-R Tests, wo für diese Altersgruppe eine gemeinsame Tabelle gilt. Aufgrund des ungleichen Körperschattens bei seitlichem Lichteinfall mussten Linkshänder ausgeschlossen werden. Es wurde bewusst für die Innenraumbeleuchtung eine ähnlichste Farbtemperatur von 6500 K gewählt, um beim Wechsel zwischen künstlichem Himmel und Innenbeleuchtung mögliche Einflüsse aufgrund unterschiedlicher Lichtfarben auszuschließen.

2.2.4 Aufbau des Versuchsraums mit künstlichem Himmel

Der Mock-up-Büroraum befindet sich auf dem TU-Campus im Gebäude E und misst 4,5 m Breite, 4,6 m Tiefe und 3,2 m Höhe und stellt somit ein Einzelbüro mit ca. 20 m² dar. (Abbildung 10) Das Fenster für den seitlichen Lichteinfall befindet sich in der Mitte der kürzeren Seite und ist 3 m breit und 1,9 m hoch. Es ist zweiflügelig, die reine Glasfläche ohne Versprossungsanteil beträgt 4,125 m² (2 x 1,25 m x 1,65 m) und ist damit doppelt so groß wie in DIN EN 12464 verlangt wird. Der in Kapitel 4.1 der ASR A3.4 „Ausreichendes Tageslicht“ geforderte Wert für das Verhältnis von lichtdurchlässigen Fensterflächen zur Raumgrundfläche von mindestens 1:10 wird mit diesem Aufbau übererfüllt. Damit wird eine gute bis sehr gute Tageslichtversorgung ermöglicht. Zusätzlich sind lichtundurchlässige Rollos an der Innenseite angebracht, um die Fensterfläche variabel gestalten zu können. Die Unterkante der durchsichtigen Verglasung des Fensters befindet sich auf 0,92 m Höhe.

In die Trennwand wird ein reales Fenster mit Einfachverglasung installiert. Hinter dem Fenster befindet sich ein weißer Raum, in dem die Ecken abgerundet werden, sodass der Raum nicht mehr als solcher wahrgenommen wird. Um den Eindruck eines echten Ausblicks aus dem Fenster zu verstärken wurde ein realistisches Foto-Panorama angebracht (Abbildung 11).

Dieser „künstliche Himmel“ wird durch 40 Stück T5-Leuchtstofflampen vom Typ 865 mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6500 K und einem Farbwiedergabeindex Ra von 80 nach Abbildung 12 ausgeleuchtet. Der Gesamtlichtstrom beträgt 250 klm und die elektrische Gesamtleistung 3,5 kW. Durch die DALI-steuerbaren Vorschaltgeräte kann somit die Leuchtdichte des „Himmels“ so geregelt werden, dass Beleuchtungsstärken bis zu 1500 lx auf der Arbeitsfläche entstehen. Durch die in Abbildung 13 gezeigte Anbringung der Leuchten wird eine Leuchtdichteverteilung erreicht, die der des vollkommen bedeckten Himmels ähnlich ist. Dazu zeigt Abbildung 14 die gemessene Leuchtdichteverteilung des künstlichen Himmels.

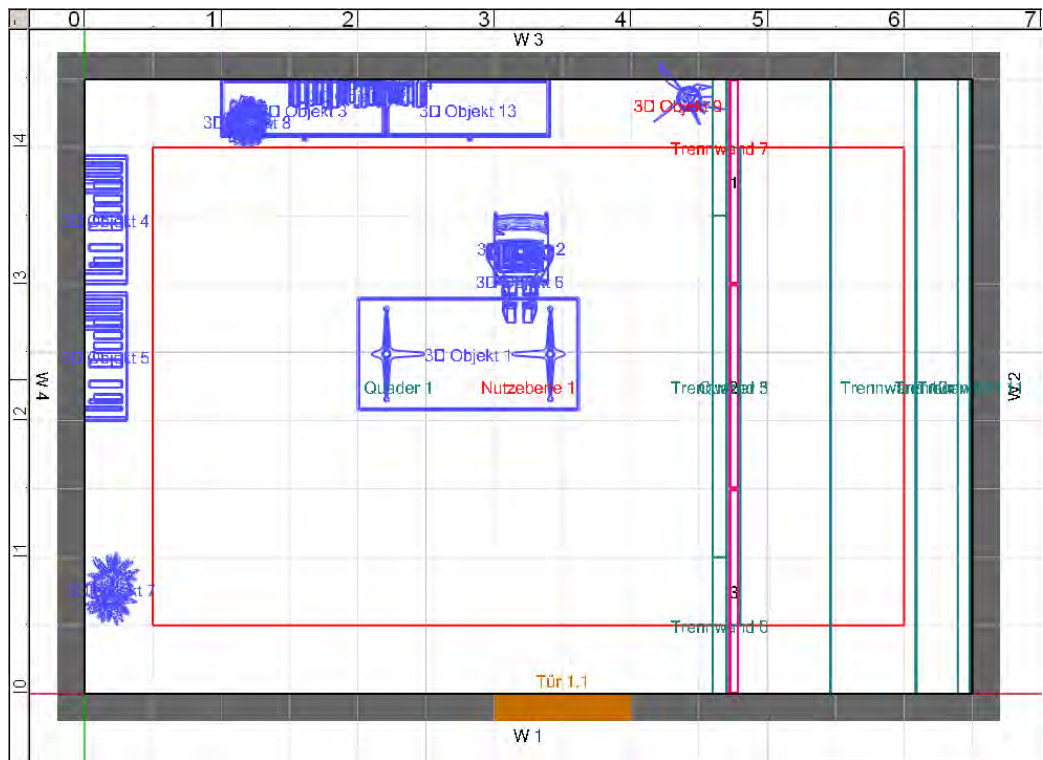


Abbildung 10: Aufbau des Versuchsraums mit künstlichem Fenster: Grundriss



Abbildung 11: künstlicher Himmel und Realisierung der Umgebung mit Foto-Panorama



Abbildung 12: künstlicher Himmel mit 40 Leuchtstofflampen vom Typ T5 865 80 W

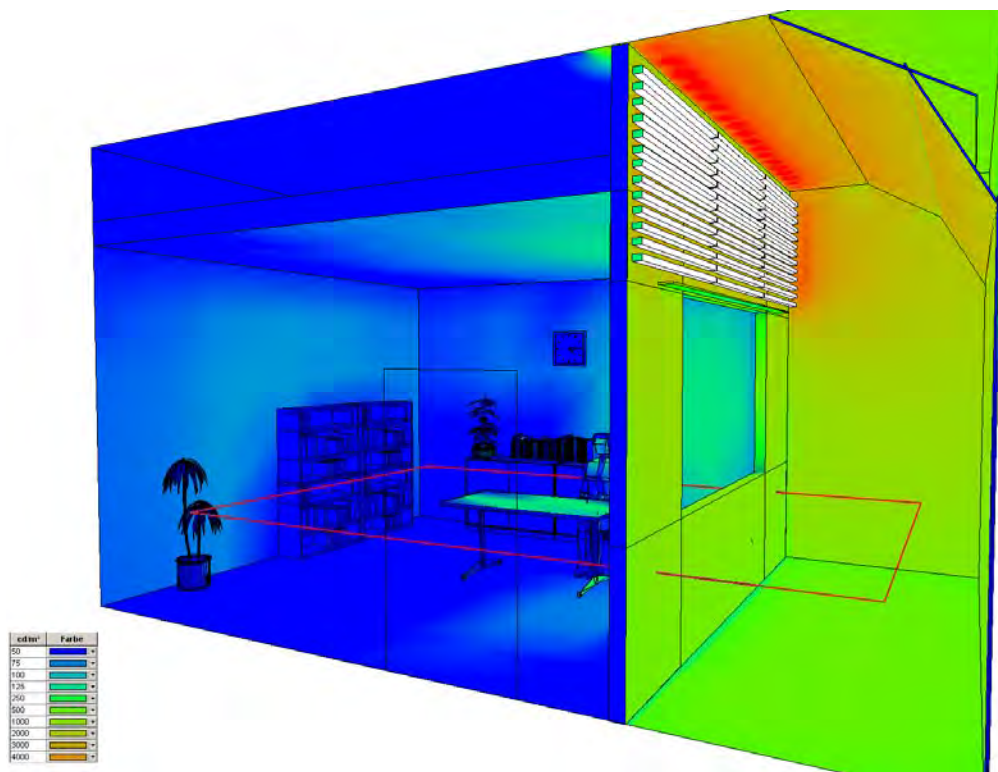


Abbildung 13: Simulierter Aufbau des Versuchsraums mit künstlichem Fenster: berechnete Leuchtdichten der Oberflächen im Innen- und Außenraum

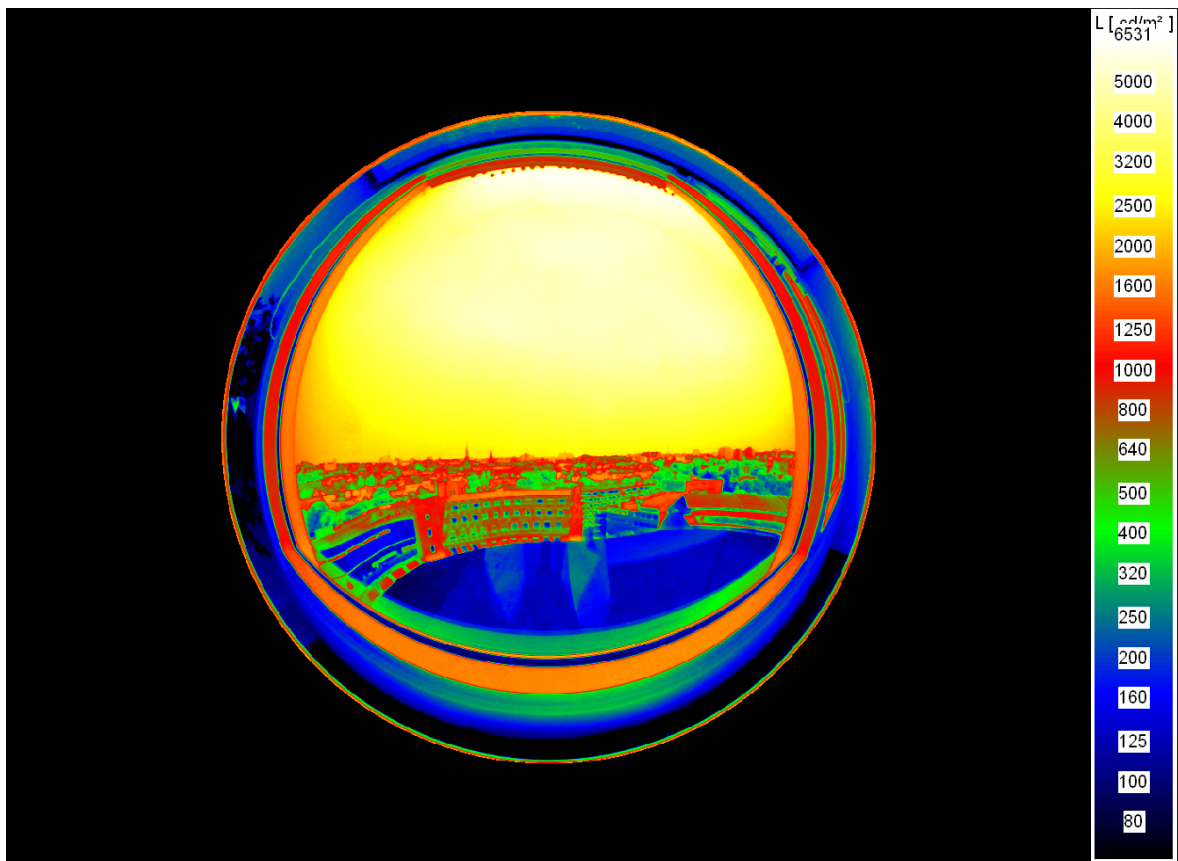


Abbildung 14: Leuchtdichteverteilung des künstlichen Himmels bei Maximaleinstellung

Zusätzlich wurde im Büroraum noch eine einstellbare künstliche Beleuchtungsanlage installiert, um die Kontrastsituation zur Tageslichtbeleuchtung zu schaffen. Abbildung 15 zeigt die Ansicht des Testraums mit der Anordnung des künstlichen Fensters, der künstlichen Beleuchtung und dem Foto-Panorama.

Für die direkte Beleuchtung im Innenraum wurden sechs abgehängte Spiegelrasterleuchten angebracht; bestückt mit jeweils einer DALI-dimmbaren T8/58 W Leuchtstofflampe. Um den möglichen Einfluss durch unterschiedliche Farbtemperaturen auszuschließen, wurden R_a und T_{cp} gleich der Himmelsbeleuchtung ausgesucht.



Abbildung 15: Realisierter Versuchsraum: Situation mit „Tageslicht“

Damit ergeben sich zwei Beleuchtungsgeometrien, die direkte Allgemeinbeleuchtung und der seitliche Lichteinfall des künstlichen Himmels.

Der Schreibtischarbeitsplatz ist mittig in 0,3 m Abstand vor dem Fenster situiert. Er misst 0,8 m mal 1,6 m und ist auf eine Höhe von 0,75 m eingestellt. Damit beträgt die Nutzebene über dem Boden ebenfalls 0,75 m. Die Sitzposition ist 1,2 m vom Fenster entfernt, direkt unter einer Leuchte mit Blickrichtung parallel zum Fenster in Richtung Tür angeordnet. Der Bereich der Sehaufgabe ist auf ein 0,3 m mal 0,4 m großes Feld eingeschränkt. Dieses ist durch einen Rahmen aus weißem Klebeband markiert, in welchem der Proband das A4 Blatt auf dem sich die Sehaufgabe befindet bewegen darf. Zum Konstanthalten des Blickwinkels der Probanden während des Versuchs wird eine höhen- und winkelverstellbare Kinnstütze montiert. Der Blickwinkel befindet sich bei allen Probanden im Bereich von 0° bis 45° was einem üblichen Blickwinkel nach LiTG bei Schreib- und Leseaufgaben entspricht.

2.2.5 Messtechnische Erfassung

Zur Beschreibung der Beleuchtungsbedingungen im Versuchsraum wurde dieser in Hinblick auf verschiedene Parameter lichttechnisch untersucht.

Reflexionsgrade

Die durchschnittlichen Reflexionsgrade bei diffuser Beleuchtung der Wand liegen bei 0,8, an der Decke bei 0,9 und am Boden bei 0,2. Die Werte liegen somit innerhalb der in DIN 12464 Abs. 4.2.2 vorgegebenen Grenzen für die Reflexionsgrade von Raumboberflächen. Die Reflexionsgrade wurden mit einem ρ_{dif} -Messgerät der Firma LMT Licht Messtechnik Berlin ermittelt.

Tageslichtquotient (D)

Aus den geometrischen Abmessungen des Raumes und des Fensters lässt sich unter Berücksichtigung der Reflexionseigenschaften der Raumboberflächen die Verteilung des Tageslichtquotienten auf der 0,85 m Ebene mit Hilfe der Lichtsimulationssoftware Relux berechnen. In den beiden Bezugspunkten nach Norm stellt sich ein Tageslichtquotient von 3 % ein, in der Raummitte beträgt er 3,7 %. In der Mitte des definierten Arbeitsplatzes beträgt der Tageslichtquotient auf der 0,75 m Tischebene circa 10 %.

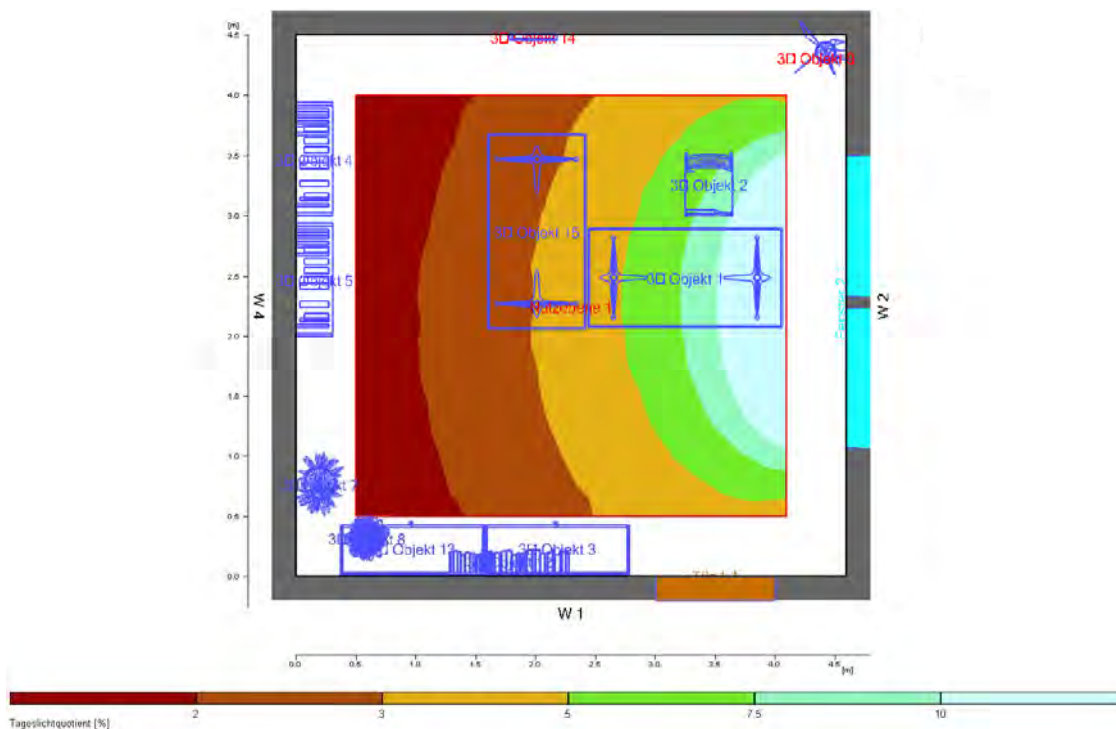


Abbildung 16: Simulierte Verteilung des Tageslichtquotienten im Versuchsraum; Nutzebene 0,85 m

Zum Vergleich der Simulationswerte mit dem realen Versuchsraum zeigt Abbildung 17 die mit einem Klasse A Beleuchtungsstärkemessgerät der Firma Czibula & Grundmann gemessene Beleuchtungsstärkeverteilung bei Beleuchtung durch den künstlichen Himmel normiert auf den Maximalwert.

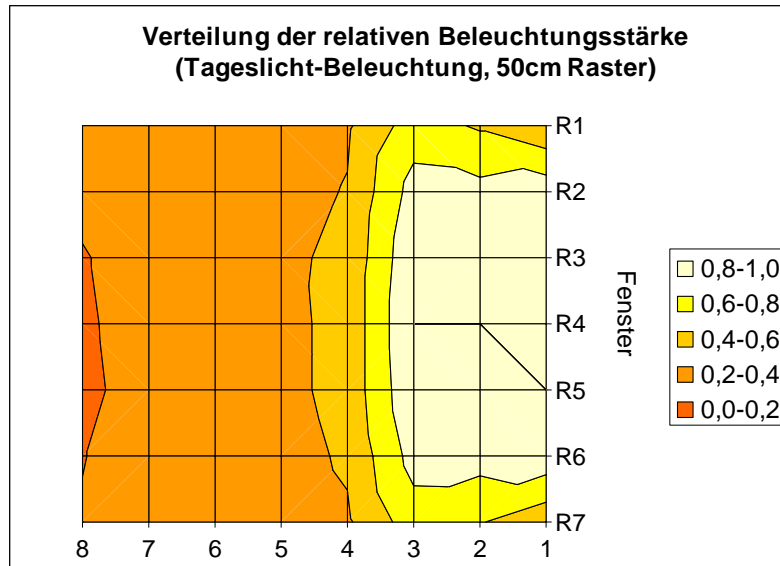


Abbildung 17: Verteilung der relativen Beleuchtungsstärke auf einer Nutzenebene von 75 cm im Versuchsraum bei „Tageslichtbeleuchtung“

Diese Werte des Tageslichtquotienten bestätigen die bei der Planung der Fenstergröße anvisierte sehr gute Versorgung mit „Tageslicht“. Die in DIN 5034 geforderten Werte für in den Abmessungen Wohnräumen ähnliche Büroräume von $D_{\text{mittel}} > 0,9$ sowie $D_{\text{min}} > 0,75$ werden damit um das Drei- bis Vierfache übererfüllt. Die in der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.4 formulierten Anforderungen für ausreichendes Tageslicht am Arbeitsplatz von $D_{\text{AP}} > 2\%$ werden ebenfalls vielfach übererfüllt.

Gleichmäßigkeit

Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke für eine künstliche Beleuchtungsanlage nach DIN EN 12 464 muss im Bereich der Sehaufgabe mindestens bei 0,6 liegen, im unmittelbaren Umgebungsbereich $U_0 \geq 0,40$ und im Hintergrundbereich $U_0 \geq 0,10$ sein. Die gemessene relative Beleuchtungsstärkeverteilung bei direkter Beleuchtung ist in Abbildung 18 gezeigt. Der nachfolgenden Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass die geforderten Gleichmäßigkeiten bei direkter Beleuchtung im Versuchsraum erfüllt werden.

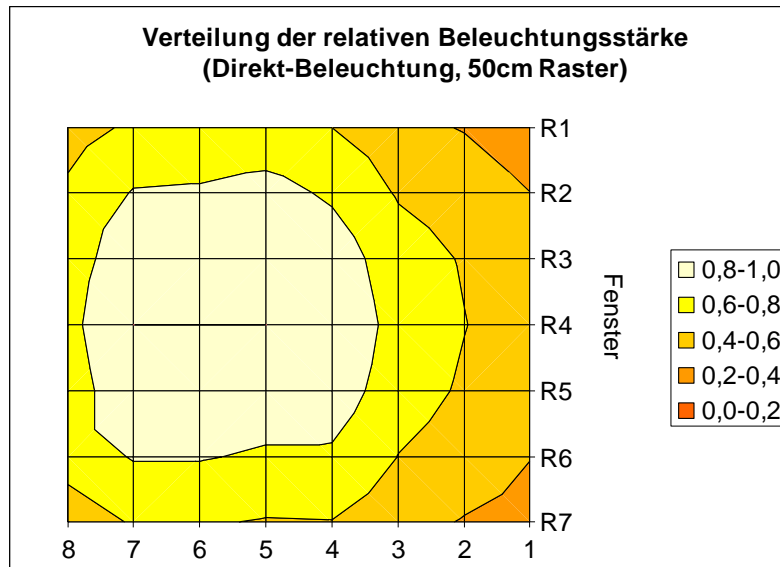


Abbildung 18: Verteilung der relativen Beleuchtungsstärke auf einer Nutzebene von 75 cm im Versuchsraum bei Direktbeleuchtung

Tabelle 4: Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke

U_0	im Bereich der Sehaufgabe	auf dem Arbeitsplatz	unmittelbarer Umgebungsbereich
künstliches Tageslicht	1,26	0,60	0,16
direkte Beleuchtung	1,36	0,73	0,15

Leuchtdichteverteilung

Zur messtechnischen Bewertung der „Helligkeit“ eines Raumes bietet sich die Messung der orts aufgelösten Leuchtdichteverteilung an. Dies wurde mit einer CCD-Leuchtdichtekamera der Firma TechnoTeam unter Zuhilfenahme eines zusätzlichen in der Kalibrierung berücksichtigten Fischaugenobjektivs durchgeführt. Abbildung 19 zeigt das Messbild bei direkter Beleuchtung mit 500 lx im Mittelpunkt des Arbeitsbereichs mit den in der Auswertung genutzten Bewertungsfeldern. In Abbildung 20 ist das entsprechende Messbild bei seitlicher Beleuchtung durch den künstlichen Himmel mit 500 lx im Mittelpunkt des Arbeitsbereichs zu sehen. Die Aufnahmen wurden jeweils aus der Perspektive des Probanden gemacht und gleich skaliert.

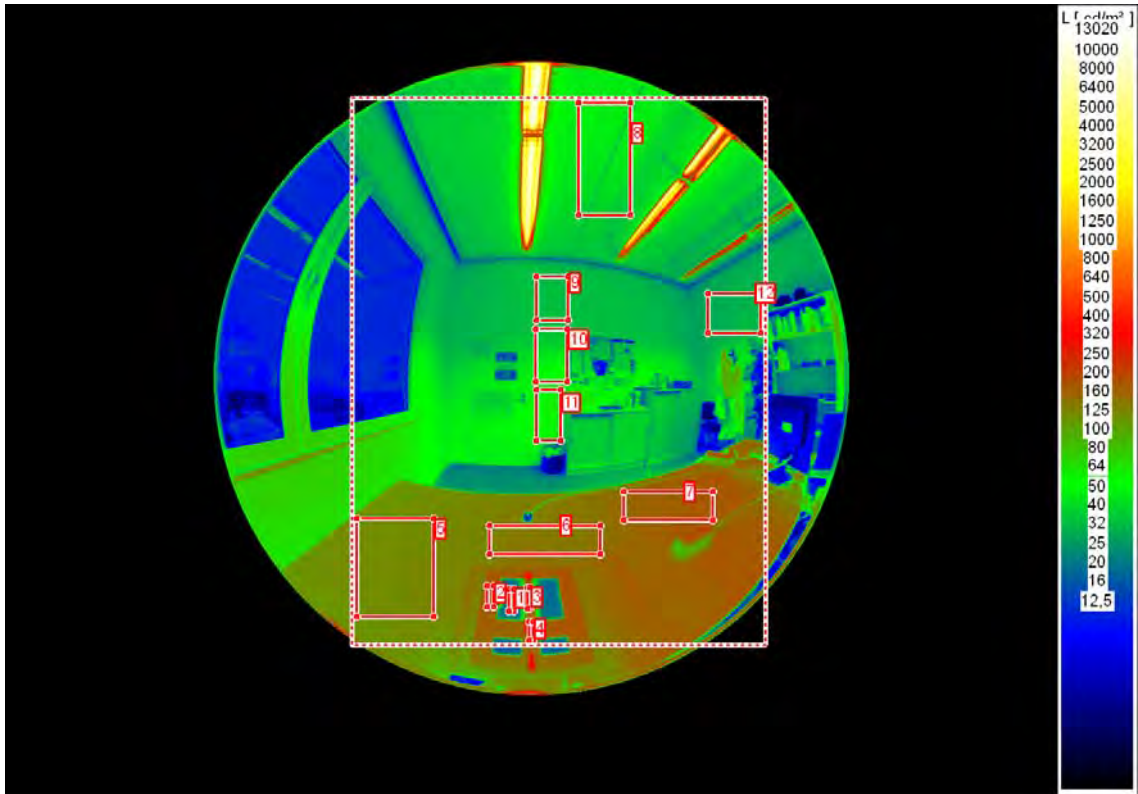


Abbildung 19: Leuchtdichtevertelung im Versuchsraum bei Direktbeleuchtung 500 lx;
12 Bewertungsfelder

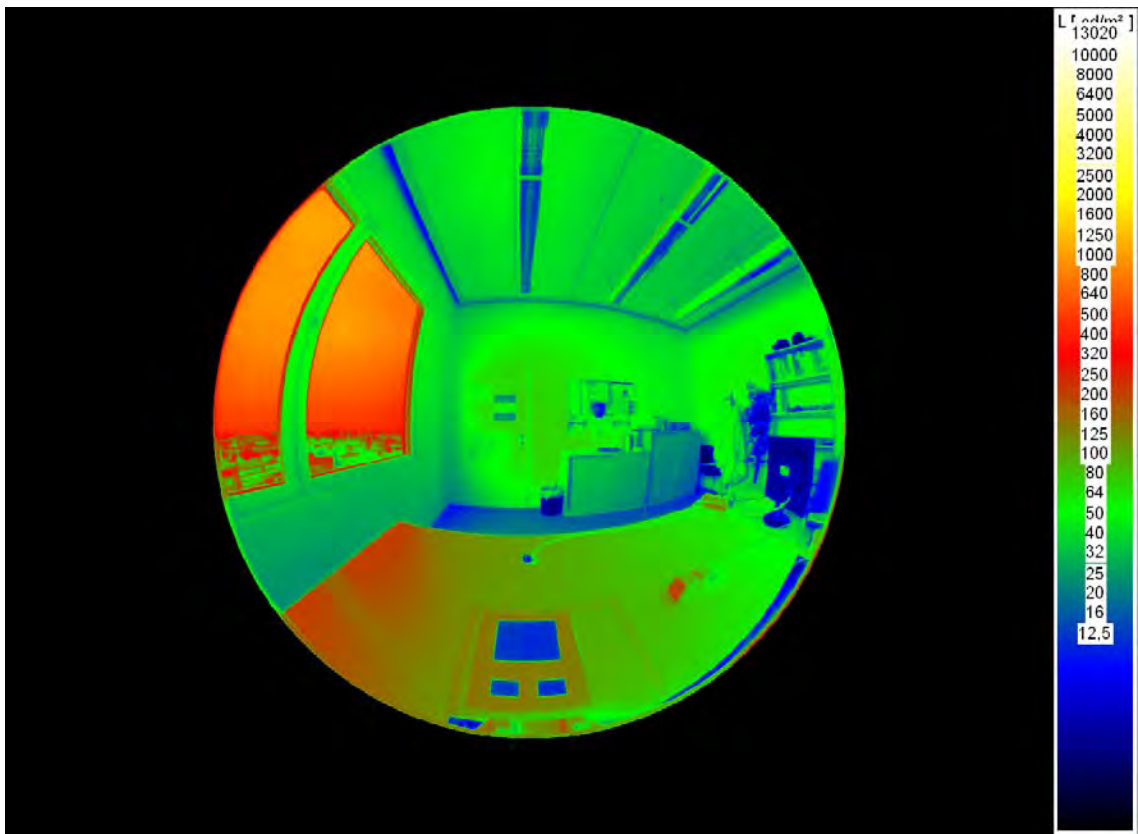


Abbildung 20: Leuchtdichtevertelung im Versuchsraum bei „Tageslichtbeleuchtung“ 500 lx

Zum Vergleich der unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien sind in Tabelle 5 die mittleren Leuchtdichten ausgewählter in Abbildung 19 eingezeichneter Bewertungsfelder eingetragen.

Tabelle 5: mittlere Leuchtdichten ausgewählter Oberflächen

Lichtrichtung	E in lx	L in cd/m ² auf dem Tisch			L in cd/m ² im Raum				
		links	Mitte	rechts	Decke	Wand oben	Wand- mitte	Wand unten	Rück- wand
direkt	500	121	138	165	43	33	43	55	30
	300	79	89	107	28	21	28	35	19
	100	27	30	36	9	7	10	12	7
künstlicher Himmel	500	167	105	77	39	59	72	71	56
	300	102	64	47	24	36	44	44	35
	100	35	22	16	8	12	15	15	12

Auf dem Tisch ist bei direkter Beleuchtung ein Abfall der Leuchtdichte zur Fensterwand von etwa 20 % zu erkennen. Beim seitlichen Lichteinfall beträgt der Leuchtdichteabfall in die Raumtiefe auf der Tischoberfläche circa 50 %. Hier sorgt also die direkte Beleuchtung für eine gleichmäßigere Ausleuchtung des Arbeitstisches.

Bei den Raumbegrenzungsflächen zeigt sich ein gegenläufiges Verhalten: Bei seitlichem Lichteinfall schwanken die Leuchtdichten auf der dem Probanden gegenüberliegenden Wand um etwa 10 %, bei direkter Beleuchtung sind die Unterscheide mit ungefähr 30 % erheblich höher.

Wichtig sind aber auch die absoluten Leuchtdichtewerte bei gleicher Beleuchtungsstärke auf dem Arbeitsplatz. Es ergeben sich doppelt so hohe Leuchtdichten auf dem oberen Bereich der gegenüberliegenden Wand sowie der Rückwand bei seitlichem Lichteinfall durch den künstlichen Himmel gegenüber der direkten Beleuchtung. Es ist also zu erwarten, dass der Raum bei „Tageslichtbeleuchtung“ deutlich heller empfunden wird als bei direkter Beleuchtung.

Glanzgrad des Papiers

Alle drei ausgewählten Papiere sind weiß und lichtundurchlässig. Die Papiertypen wurden nach ihrem Glanzgrad gemäß der LiTG-Schrift zum CRF von 1991 klassifiziert und sind in ihrem Glanzgrad etwa gleichabständig. Die genauen Angaben vom Hersteller sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Papiertypen

Papiertyp	Firma	Beschreibung	Bezeichnung	Grammatur in g/m ²	Format
matt	mondi	Karton	Mastro Extra	160	A4
seidenmatt	mondi	Bilderdruckpapier	Color Copy coated glossy	170	A4
glänzend	mondi	Fotopapier	Chromolux	200	A4

Nach DIN 67 530 von 1982 wurde mit dem Reflektometer REFO 3-D von DR LANGE der Glanzgrad der drei Papiersorten bestimmt. Dazu wurde unter drei Messgeometrien von 20°, 60°, 85° und an drei charakteristischen Stellen des Papiers der Glanzgrad gemessen. Der bei einem Einstrahlungswinkel von 20° ermittelte Wert wird vorwiegend zur Bewertung hochglänzender Materialien verwendet, der Einstrahlungswinkel von 60° wird für mittel glänzende und der 85°-Winkel für matte Prüfkörper verwendet. Die LiTG schlägt 1991 vor, für Schreibtisch-Sehaufgaben den Messwinkel von 20° für die Bewertung zu wählen, da dieser im Bereich des häufigsten Blickwinkels von 25° liegt. Da die Messungen unter verschiedenen Messgeometrien pauschal nicht vergleichbar sind und die drei Papiertypen von hochglänzend bis matt alle Geometrien abdecken, wurde unter jeder Geometrie eine Einzelwinkelmessung durchgeführt. Die Messwerte sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Glanzgrad der Papiertypen

Papiertyp	Winkel	Oberer Rand des Papiers	Unterer Rand des Papiers	Mittig gegen die Laufrichtung	Mittelwert
matt	20°	1,4	1,4	1,4	1,4
	60°	4,5	4,5	4,6	4,5
	85°	7,3	7,2	8,4	7,6
seidenmatt	20°	7,4	7,5	7,1	7,3
	60°	35,2	35,6	36,8	35,9
	85°	79,5	79,4	80,0	79,6
glänzend	20°	54,8	55,7	55,5	55,3
	60°	78,0	77,4	76,9	77,4
	85°	96,7	97,0	96,9	96,9

Kontrastwiedergabefaktor (Contrast Rendering Factor, CRF)

Der Kontrastwiedergabefaktor wurde 1991 von der LiTG als zusätzliches Gütemerkmal der Innenraumbeleuchtung eingeführt. Er beschreibt das Verhältnis des Leuchtdichtekontrastes bei einer Sehaufgabe bei der zu bewertenden Beleuchtung zu dem Leuchtdichtekontrast bei gleicher Sehaufgabe bei einer Referenzbeleuchtung. Die Referenzbeleuchtung ist definiert als vollkommen diffus strahlende Halbkugel mit konstanter Leuchtdichte.

$$CRF = \frac{C}{C_0}$$

mit

C: Kontrast bei gegebener Beleuchtung

C₀: Kontrast bei Referenzbeleuchtung

wobei gilt:

CRF > 1 Kontrastwiedergabe mit gegebener Beleuchtung ist besser als mit Referenzbeleuchtung

CRF = 1 Gegebene Beleuchtung ist gleich mit der Referenzbeleuchtung

CRF < 1 Sehaufgabe hat durch gegebene Beleuchtung an Kontrast verloren

Der Leuchtdichtekontrast ist definiert als:

$$C = \frac{L_u - L_o}{L_u}$$

mit

L_u: Leuchtdichte des unmittelbaren Umfelds

L_o: Leuchtdichte des Sehobjektes

Als Bewertung des CRF dient ein A3 großes Bewertungsfeld mit einem festgelegten 112-Punkte-Raster, welches auch bei den Messungen für den Versuch verwendet wurde.

Der Leuchtdichtekontrast ist bei nicht vollkommen diffus reflektierenden Materialien abhängig von der Lichteinfallrichtung und dem Winkel des Beobachters. Um trotzdem eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde ein Referenzreflexionsnormal (auch Standard-Sehaufgabe, Luminanzkontrastnormal) entwickelt. Messungen haben gezeigt, dass der Kontrast bei Referenzbeleuchtung unabhängig vom Blickwinkel ist. Damit wurde dieser auf C₀ = 0,91 festgelegt, mit dem auch die Berechnungen durchgeführt wurden.

2.2.6 Versuchsablauf

Zuerst wird mit einem Sehtest mit Hilfe eines Oculus Binoptometer 4p der Visus bei 30 cm ermittelt, um eine ausreichende Sehschärfe des Probanden sicherzustellen. Dabei ist zu bemerken, dass auch Personen mit Sehschwäche zum Versuch zugelassen werden, sobald sie den Sehtest mit ihrer Sehhilfe bestehen.

Nachdem der Proband mithilfe der Kinnstütze und dem höhenverstellbaren Bürostuhl eine angenehme Sitzposition gefunden hat, wird ihm der Versuchsablauf erklärt. Zunächst wird das Helligkeit-Einstellen mit entsprechender Aufgabenstellung (vgl. 2.2.3 Versuchsdesign) geübt. Mithilfe der Kurzanleitung und den standardisierten Instruktionen wird der d2-R Test erklärt. Es wird beim gesamten Versuch darauf geachtet, den Begriff „Durchstreichetest“ zu verwenden. Daraufhin werden die zwei Vortests durchgeführt, um den Probanden an den Ablauf zu gewöhnen und die Lerneffekte beim d2-R Test zu minimieren. Bei den zwei Vortests wird an einem zweiten Referenzpunkt der Einfluss des individuellen Körperschattens ermittelt. Um zu gewährleisten, dass der Körperschatten nicht durch unterschiedliche Farbe der Kleidung beeinflusst wird, trägt jeder Proband einen weißen Kittel. Nach den zwei Vortests bearbeitet der Proband einen Fragebogen zum aktuellen Wohlbefinden. Dieser dient zur Überprüfung eines gleichbleibenden Wohlbefindens des Probanden über den gesamten Zeitraum des Versuchsdurchlaufs.

Danach beginnt der Hauptversuch. Vom Versuchsleiter wird eine vorprogrammierte Lichtszene eingestellt. Dann führt der Proband den d2-R Test durch, gefolgt vom Ausfüllen des Fragebogens zur subjektiven Bewertung der Beleuchtungssituation. Anschließend darf die Helligkeit mit der oben genannten Aufgabenstellung vom Proband selbst herunter gedimmt werden. Dieser Ablauf wird 18-mal wiederholt. Nach eineinhalb Stunden, bzw. neun Durchläufen wird eine Erholungspause von 1,5 Stunden eingelegt. Am Beginn und am Ende sowie vor und nach der Pause wird der Fragebogen zum aktuellen Wohlbefinden beantwortet. Nach der Pause werden die weiteren neun Szenarien durchgegangen. Am Ende darf der Proband optional auf einem abschließenden Blatt Anregungen und Anmerkungen zum Versuch geben.

Um den Einfluss des Versuchsleiters möglichst gering zu halten, wurde darauf geachtet, die Anweisungen identisch und immer gleich zu halten.

2.2.7 Auswertung

Beschreibung der Probanden

Insgesamt wurden 34 Probandenversuche durchgeführt. Die Alters- und Geschlechtsverteilung zeigt Abbildung 21 als Histogramm. Aufgrund der geometrischen Bedingungen des seitlichen Lichteinfalls durch den künstlichen Himmel und der Aufstellung des Arbeitsplatzes im Versuchsraum wurden als Probanden nur Rechtshänder eingeschlossen. Um sicherzu-

stellen, dass die Aufgabenstellungen und die verschiedenen Fragebögen richtig verstanden werden, wurde deutsch als Muttersprache als weitere Voraussetzung festgelegt. Knapp die Hälfte der Probanden benötigte eine Sehhilfe, um einen Visus von 1,0 zu erreichen. Ein Viertel der Probanden gaben ihre lichttechnischen Kenntnisse als professionell an, der Rest teilt sich jeweils zur Hälfte in Laien und lichttechnisch interessierte Personen auf.

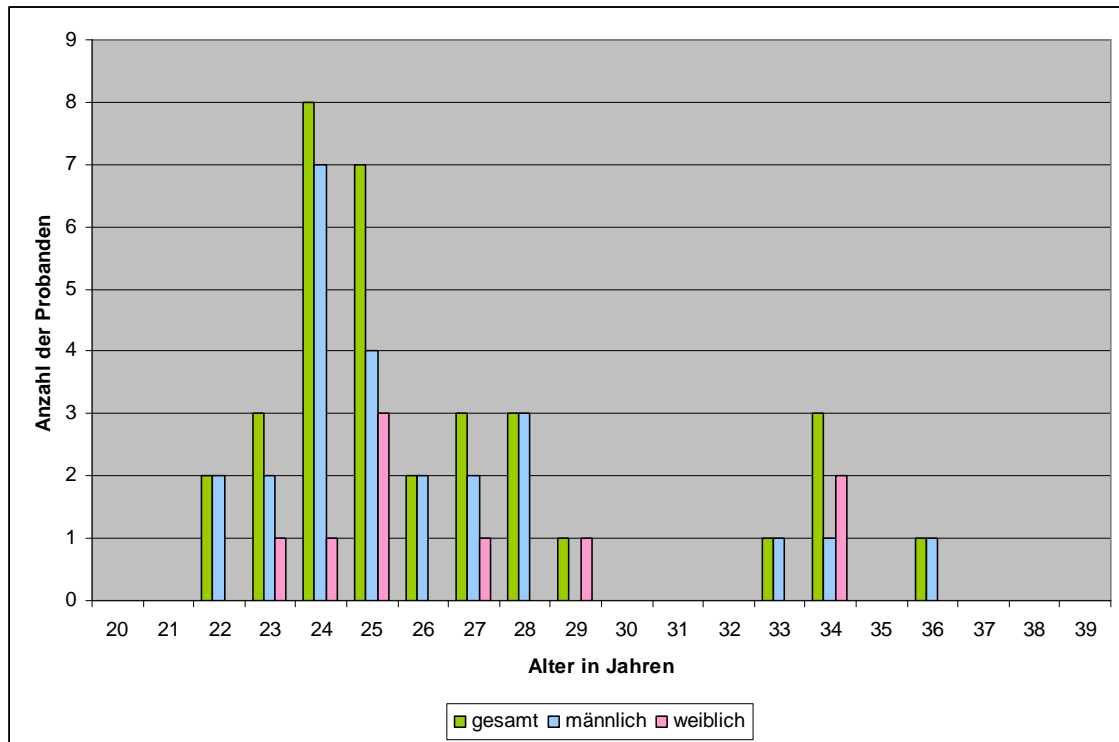


Abbildung 21: Altersstruktur der Probanden

Jeweils zu Beginn (Zeitpunkt 1 und 3) und Ende (Zeitpunkt 2 und 4) der zwei Versuchsteile füllten die Probanden einen Fragebogen zum allgemeinen Wohlbefinden aus. In Abbildung 22 ist der zeitliche Verlauf der gemittelten Selbsteinschätzung bezüglich der Wachheit gezeigt. Es zeigte sich, dass die Probanden ihren Wachheitszustand vor der Pause selbst um 0,6 Skalenpunkte niedriger einschätzten als zu Beginn des Versuchs. Nach der circa 1,5-stündigen Pause wurden wieder die Werte wie beim Versuchsbeginn erreicht. Ein sehr ähnlicher Verlauf ergab sich bei der Selbsteinschätzung der Konzentration, der in Abbildung 23 gezeigt ist. Auch hier zeigte sich ein deutlicher Erholungseffekt während der Pause zwischen den Zeitpunkten 2 und 3.

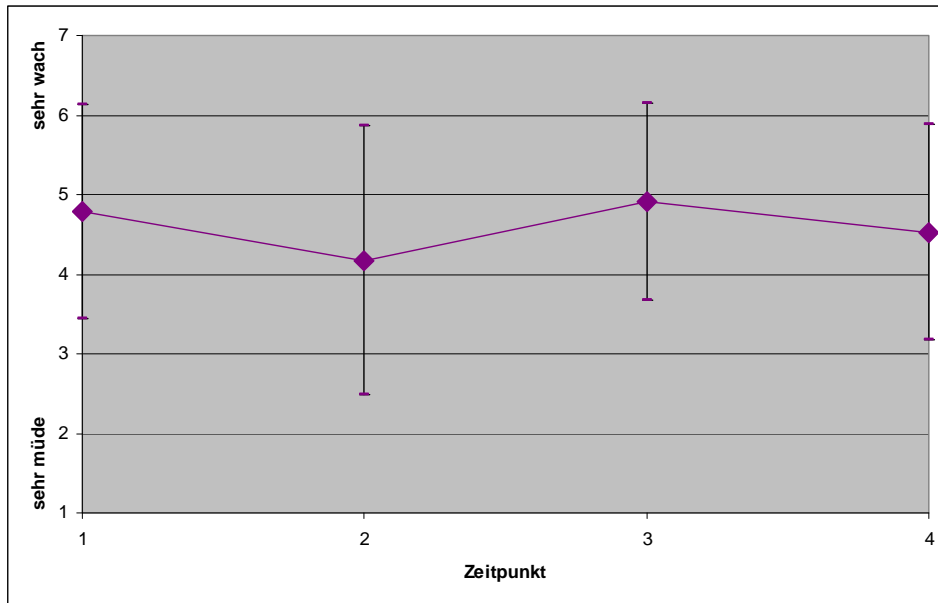


Abbildung 22: Selbsteinschätzung der Probanden: Wie fühlen Sie sich momentan? (Wachheit); Fehlerbalken +/- 1 SD

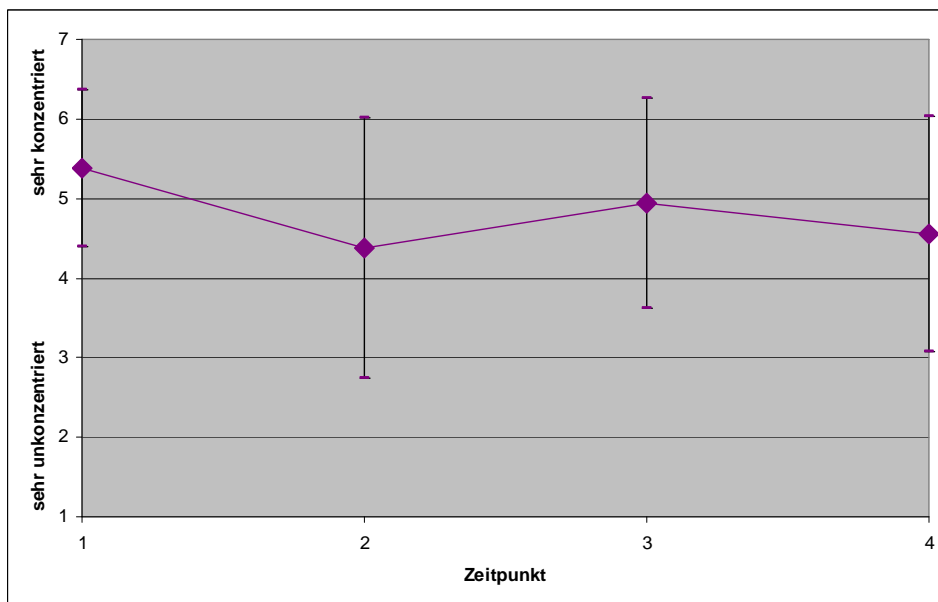


Abbildung 23: Selbsteinschätzung der Probanden: Wie fühlen Sie sich momentan? (Konzentration); Fehlerbalken +/- 1 SD

Weitere Abfragen im Fragebogen zum aktuellen Wohlbefinden ergaben ein überdurchschnittliches Interesse von 4,8 (1 sehr gelangweilt – 7 sehr interessiert). Die Probanden waren mit einem Mittelwert von 5,8 sehr entspannt (1 sehr angespannt – 7 sehr entspannt) und fühlten sich mit einem mittleren Wert von 5,8 sehr wohl (1 sehr unwohl – 7 sehr wohl). Die Sitzposition mit der Kinnstütze zum Einhalten eines gleichbleibenden Beobachtungswinkels auf die Sehaufgabe wurde mit 3,9 durchschnittlich (1 sehr angenehm – 7 sehr

unangenehm) bewertet. Der Büroraum wirkte im Allgemeinen mit einer Bewertung von 2,9 eher angenehm (1 sehr angenehm – 7 sehr unangenehm).

Auswertung des d2-R Test

Bei der Auswertung eines d2-R Konzentrations- und Aufmerksamkeitstests ergeben sich die in Tabelle 8 erläuterten Kennwerte, die unterschiedliche Aussagen treffen lassen.

Tabelle 8: Kennwerte des d2-R Tests

Kennwert	Bezeichnung	Erläuterung/Berechnung
KL	Konzentrationsleistung	$KL = BZO - AF - VF$
BZO	Tempo bei Testbearbeitung	Anzahl bearbeiteter Zielobjekte
F%	Sorgfalt bei Testbearbeitung; Fehleranteil	$F\% = (AF + VF) / BZO * 100$
AF	Auslassungsfehler	Anzahl ausgelassener Zielobjekte
VF	Verwechslungsfehler	Anzahl markierter Distraktoren
SW	Standardwerte	Aus Normtabelle abgelesene Vergleichswerte

Nach Auswertung der 18 d2-R Tests aller 34 Versuchsdurchläufe wurden zum Ausgleich der individuellen Konzentrationsfähigkeit der verschiedenen Probanden die einzelnen Kennwerte durch Normierung auf die jeweiligen Ergebnisse bei der Basislinie relativiert. Damit werden nicht mehr die absoluten Ergebnisse untersucht, sondern die relativen Unterschiede zwischen den 18 Szenarien.

Um eine Aussage über die Arbeitsgeschwindigkeit der Probanden tätigen zu können, zeigt Abbildung 24 die Mittelwerte des BZO-Kennwertes für alle 18 Szenarien. Dabei sind bereits Unterschiede zwischen den Papiersorten und der Lichtrichtung zu erkennen. Allerdings fehlt bei diesem Parameter die Berücksichtigung der während des Durchstreichtests gemachten Fehler.

Dies wird erst bei der Berechnung der Konzentrationsleistung (KL) berücksichtigt. Dazu werden von der Anzahl der bearbeiteten Zielobjekte (BZO) die Anzahl der ausgelassenen Zielobjekte (AF) und der markierten Distraktoren (VF) abgezogen. Wenn also ein Proband besonders schnell arbeitet, dabei jedoch mehr Fehler entstehen, als bei einem langsamer arbeitenden Proband, kann der gleiche Wert für die Konzentrationsleistung entstehen. Abbildung 25 zeigt die Mittelwerte des KL-Kennwertes für alle 18 Szenarien. Es sind grundsätzlich ähnliche Unterschiede wie beim BZO-Kennwert zu erkennen.

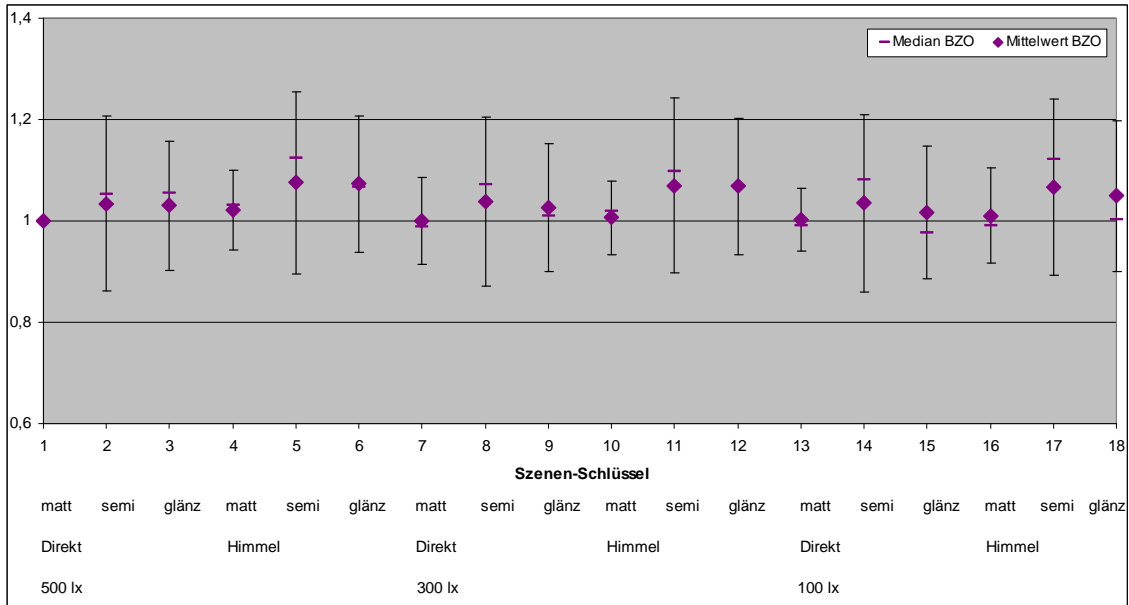


Abbildung 24: Mediane und Mittelwerte des relativen BZO-Kennwertes aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

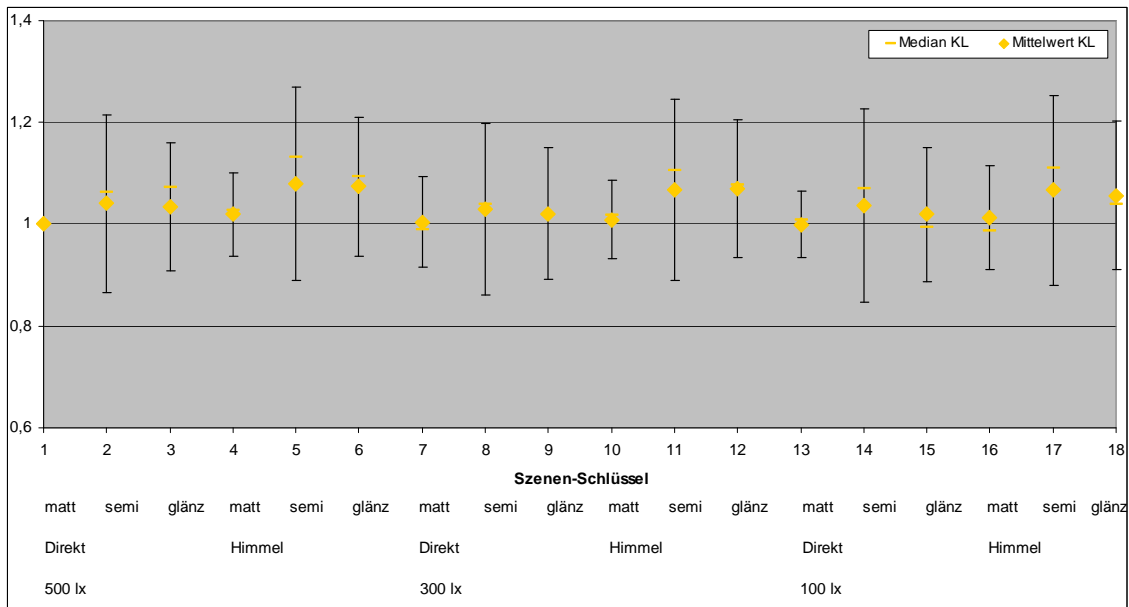


Abbildung 25: Mediane und Mittelwerte des relativen KL-Kennwertes aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

Um eine Aussage über die Sorgfalt bei der Testbearbeitung machen zu können wird der F%-Wert berechnet, bei dem die Summe der Fehler in das Verhältnis zu den bearbeiteten Zielobjekten gebracht wird. Hierbei bedeutet ein höherer Wert eine geringere Sorgfalt, weshalb für die in Abbildung 26 gezeigte Darstellung auf die normierten Standardwerte für den F%-Wert zurückgegriffen wurde. Dabei zeigt sich, dass die Sorgfalt der Probanden bei der Versuchsdurchführung nicht vom einzelnen Szenario abhing.

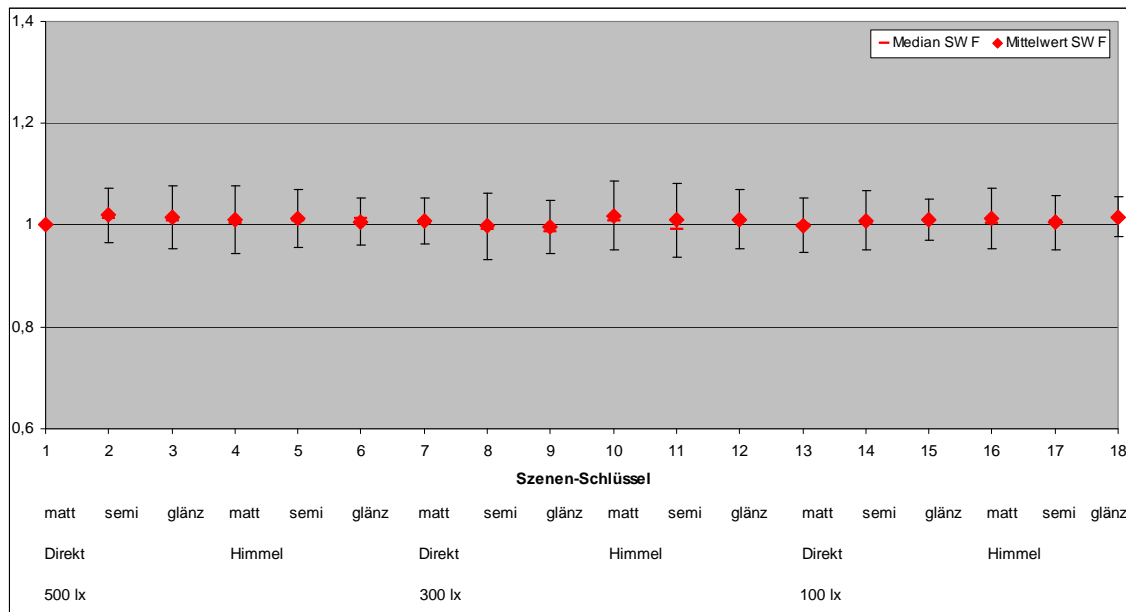


Abbildung 26: Mediane und Mittelwerte der relativen Standardwerte des F%-Kennwertes aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

Zur besseren Vergleichbarkeit sind in Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 die KL-Werte nach Papiertypen sortiert getrennt dargestellt. Aus allen drei Abbildungen ist zu erkennen, dass die Beleuchtungsstärke auf dem Arbeitsplatz keinen Unterschied auf die mit dem d2-R-Test ermittelte Konzentrationsleistung hat.

Deutliche Unterschiede ergeben sich vielmehr bei der Betrachtung der Lichteinfallrichtung. Diese Differenzen treten jedoch bei den drei Papiersorten unterschiedlich stark in Erscheinung: Bei mattem Papier ist quasi kein Unterschied zu erkennen, bei semiglänzendem Papier fallen die Werte bei seitlichem Lichteinfall durch den künstlichen Himmel etwa 4 % höher aus als bei direkter Beleuchtung von oben. Bei glänzendem Papier liegen die Unterschiede ebenfalls bei 4 %, jedoch fällt die durchschnittliche Standardabweichung, die als ein Maß der Streuung dient, mit 0,13 deutlich geringer als beim semiglänzenden Papier (0,18) aus.

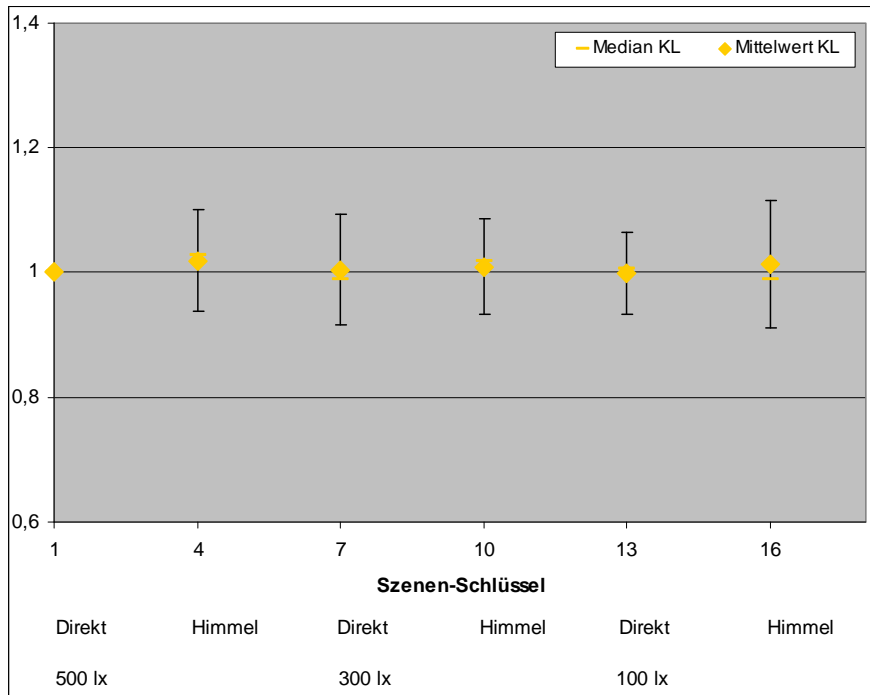


Abbildung 27: Mediane und Mittelwerte des relativen KL-Kennwertes, Papiertyp matt; Fehlerbalken +/- 1 SD

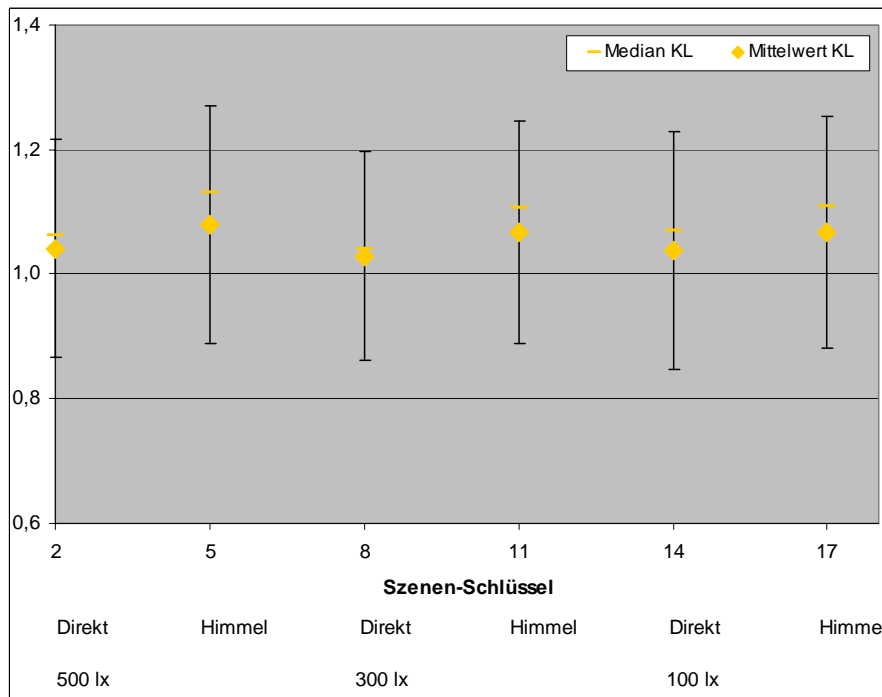


Abbildung 28: Mediane und Mittelwerte des relativen KL-Kennwertes, Papiertyp semigläzend; Fehlerbalken +/- 1 SD

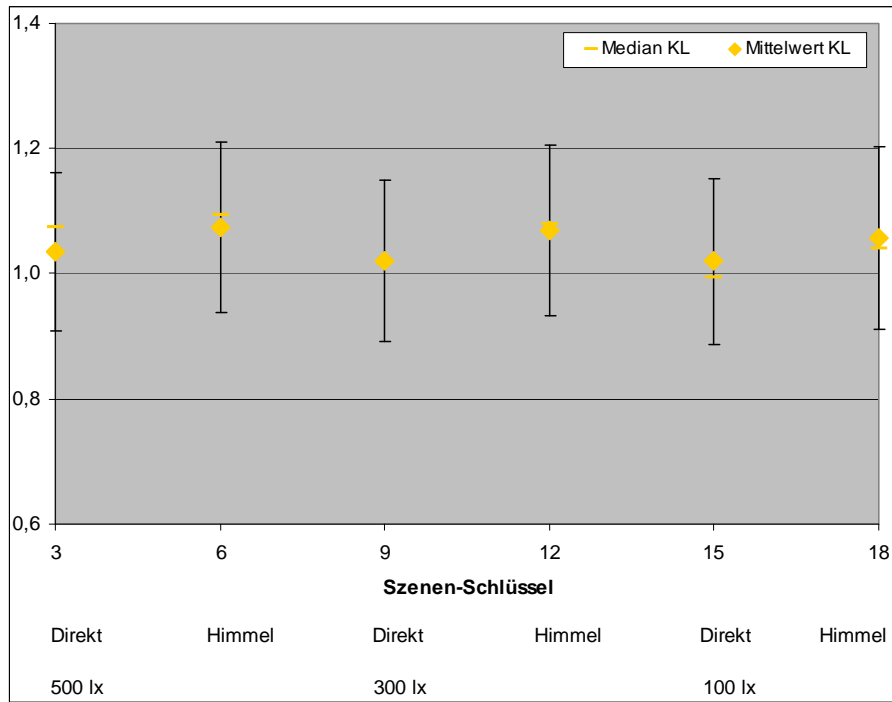


Abbildung 29: Mediane und Mittelwerte des relativen KL-Kennwertes, Papiertyp glänzend;
Fehlerbalken +/- 1 SD

Auswertung der Fragebögen

Mit dem Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Beleuchtungssituation wurden bis zu sieben Parameter von den Probanden bewertet. Die aus allen Antworten generierten Mittelwerte und Mediane sind in den folgenden Abbildungen über alle 18 Szenarien aufgetragen.

Abbildung 30 zeigt die Bewertung der Helligkeit für die Lese- und Schreibtätigkeit. Es ist zu erkennen, dass bei den Beleuchtungsstärkestufen 500 lx und 300 lx die Helligkeit bei seitlichem Lichteinfall durch den Himmel geringer bewertet wurde als bei der Direkt-Beleuchtung. Die Werte liegen aber alle im Bereich der Einschätzung „genau richtig“. Bei einer Beleuchtungsstärke von 100 lx auf dem Arbeitsplatz fällt die Bewertung eine Stufe niedriger in Richtung „zu dunkel“ aus. Weiterhin ist noch erkennbar, dass die Standardabweichung bei den Bewertungen der Beleuchtung durch den Himmel etwa die Hälfte betragen gegenüber der Direkt-Beleuchtung. Dort ist also die Streuung der Probandenantworten deutlich geringer.

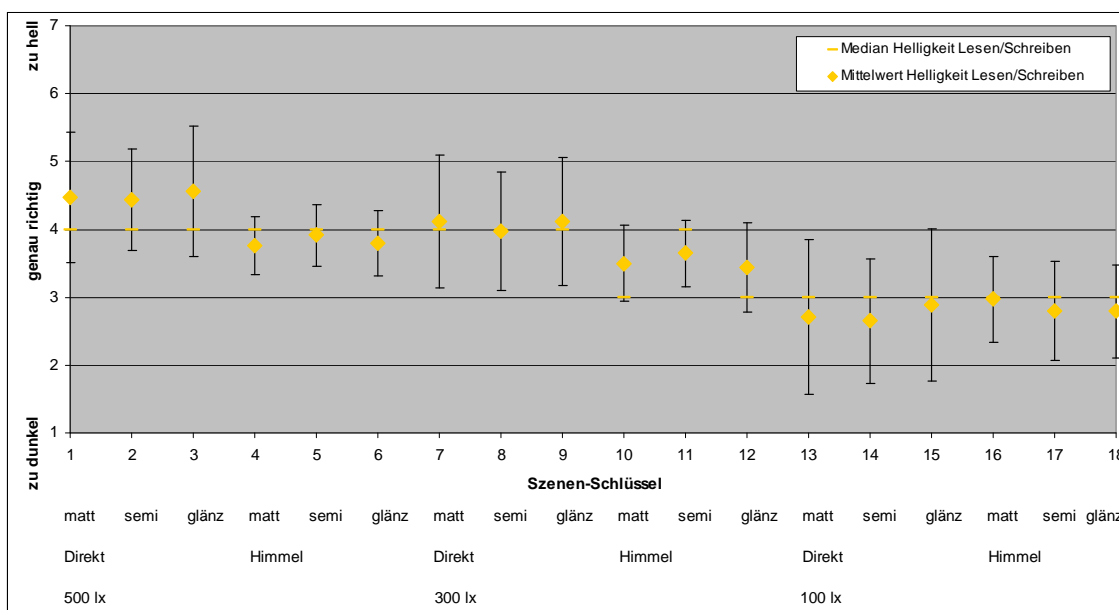


Abbildung 30: „Wie beurteilen Sie die Helligkeit der Beleuchtungssituation für die Lese- und Schreibtätigkeit?“, Mediane und Mittelwerte der Antworten aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

Im folgenden Frageblock sollten mögliche Reflexionen auf dem Papier bewertet werden. Abbildung 31 zeigt die Antworten auf die Frage, ob Reflexionen wahrgenommen werden und wenn ja, wie stark. Es zeigt sich sehr deutlich, dass bei Direkt-Beleuchtung unabhängig von der Beleuchtungsstärke für die Papiertypen semiglänzend und glänzend Reflexionen sehr stark wahrgenommen werden. Bei mattem Papier werden diese quasi überhaupt nicht festgestellt. Bei seitlichem Lichteinfall vom Himmel werden Reflexionen überhaupt nicht oder nur minimal wahrgenommen.

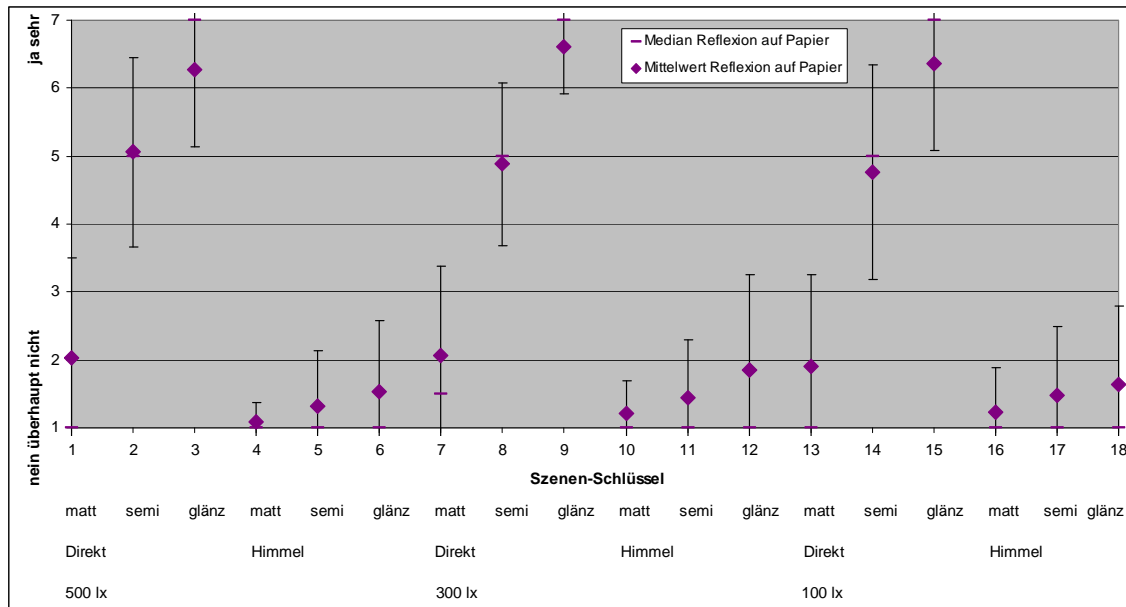


Abbildung 31: „Nehmen Sie Reflexion auf dem Papier wahr?“; Mediane und Mittelwerte der Antworten aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

Die beiden anschließenden Fragen sollten nur beantwortet werden, wenn die vorhergehende Frage nicht mit „nein überhaupt nicht“ beantwortet wurde. Da wie in Abbildung 31 zu sehen ist, bei den Szenarien mit minimal wahrgenommener Reflexion mindestens die Hälfte der Probanden „nein überhaupt nicht“ angekreuzt hat (vgl. Median) sind die Fallzahlen für die in Abbildung 32 und Abbildung 33 gezeigten Bewertungen bei diesen Szenarien entsprechend gering. Dort wird gefragt, wie stark die empfundene Reflexion bei der Lesbarkeit bzw. der Schreibarbeit stört. Die Störung für die Lesbarkeit wird beim glänzenden Papiertyp mit Stufe 6 am höchsten empfunden, das semiglänzende Papier wird etwa 1,5 Skalenpunkte niedriger eingestuft, die Reflexion ist dabei aber immer noch störend. Die Reflexionen auf dem matten Papier und die auf allen Papiertypen bei seitlichem Lichteinfall werden zwischen den Stufen 2 und 3 deutlich niedriger empfunden, wobei nochmals darauf hingewiesen wird, dass bei diesen Szenarien über die Hälfte der Probanden gar keine Reflexionen wahrnehmen. Insgesamt wird die Störung durch Reflexionen für die Schreibarbeit ein halbe bis eine Skalenstufe niedriger bewertet als für die Lesbarkeit.

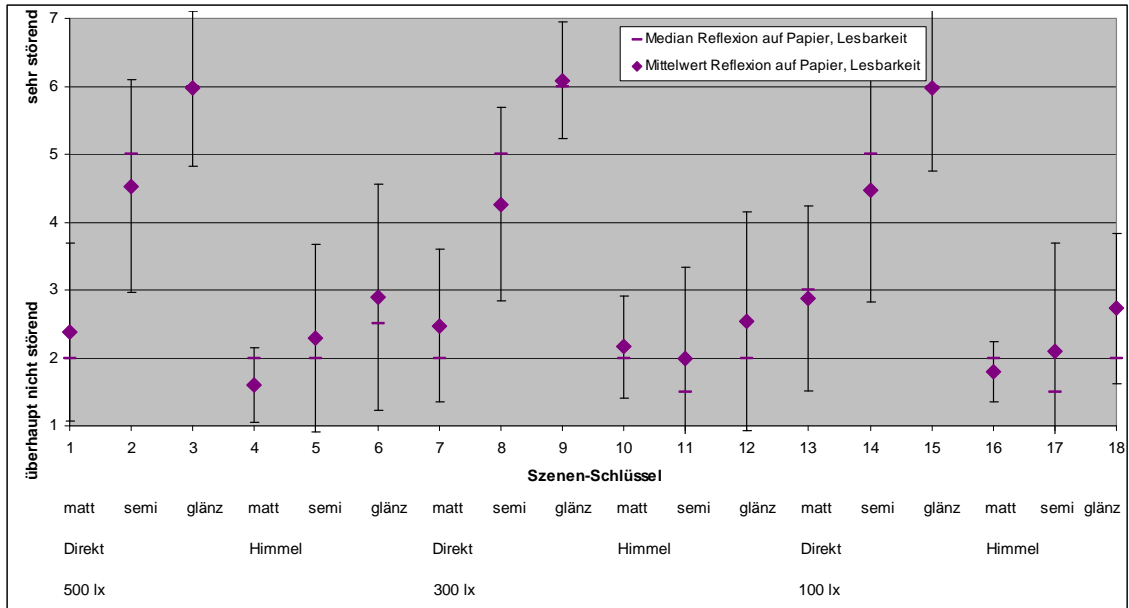


Abbildung 32: „Wie beurteilen Sie die Reflexion in Bezug auf die Lesbarkeit des Textes?"; Mediane und Mittelwerte der Antworten aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

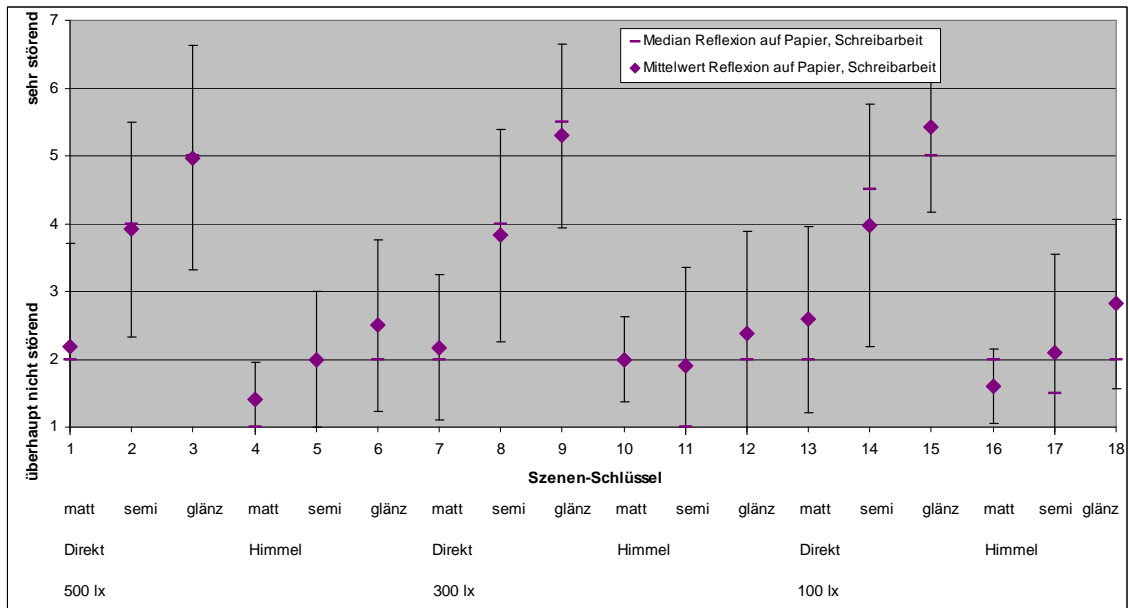


Abbildung 33: „Wie beurteilen Sie die Reflexion in Bezug auf die Schreibarbeit?"; Mediane und Mittelwerte der Antworten aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

Abbildung 34 zeigt die Auswertung der Frage nach der empfundenen Anstrengung für die Augen durch die jeweiligen Lichtverhältnisse. Dabei fällt auf, dass die Beleuchtung durch den seitlichen Lichteinfall bei allen Beleuchtungsstärkeniveaus mindestens um eine Skalenebene weniger anstrengend bewertet wird als die direkte Beleuchtung. Bei letzterer kommen zusätzlich die Reflexionseigenschaften der drei Papiertypen dazu. Das matte Papier wird am wenigsten anstrengend empfunden, das semiglänzende mittel und das glänzende Papier am anstrengendsten. Es fällt noch auf, dass sich die Bewertungen bei 500 lx und 300 lx kaum unterscheiden. Bei der Beleuchtungsstärke von 100 lx werden beide Lichtrichtungen jeweils einen Skalenebene anstrengender empfunden.

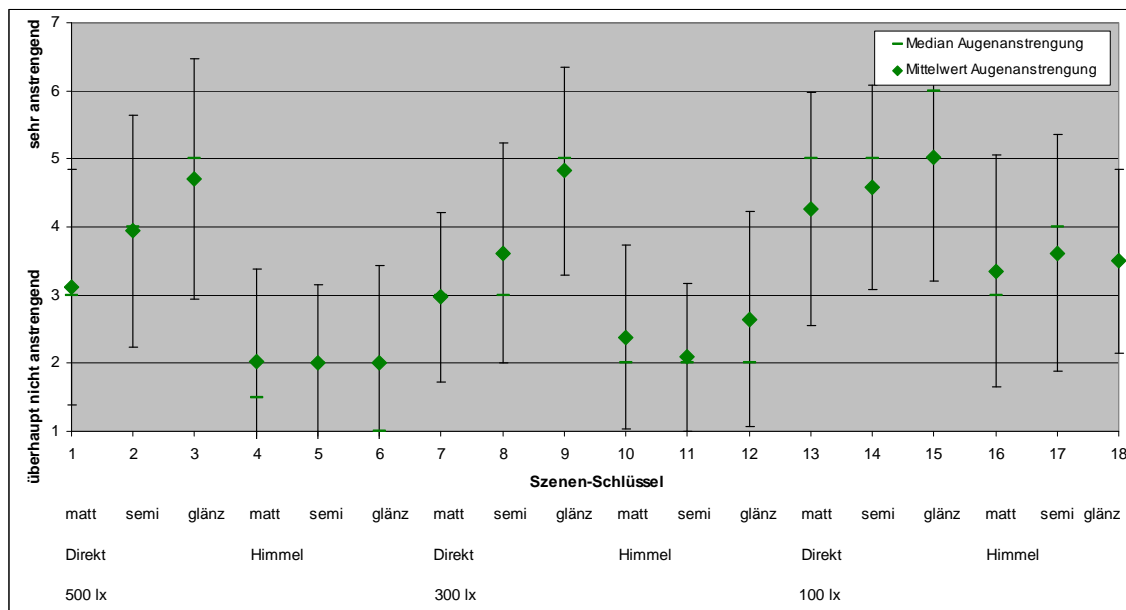


Abbildung 34: „Wie bewerten Sie die Sehaufgabe, in Bezug auf die momentanen Lichtverhältnisse, für die Augen?“; Mediane und Mittelwerte der Antworten aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

Abschließend wurde die subjektive Einschätzung der Lichtverhältnisse im gesamten Raum abgefragt. Abbildung 35 zeigt die Bewertung auf der Skala sehr angenehm – sehr unangenehm, in Abbildung 36 sind die gemittelten Antworten der Helligkeitsbewertung (zu dunkel – zu hell) aufgetragen. Die Beleuchtung des gesamten Raums durch den Himmel wird durchweg angenehmer empfunden, als durch die Direkt-Beleuchtung, obwohl die Lichtverhältnisse dabei einen halben Skalenebene dunkler bewertet werden. Die Szenarien mit 100 lx Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz werden dabei geringfügig unangenehmer bewertet, als die Szenarien mit höherer Beleuchtungsstärke.

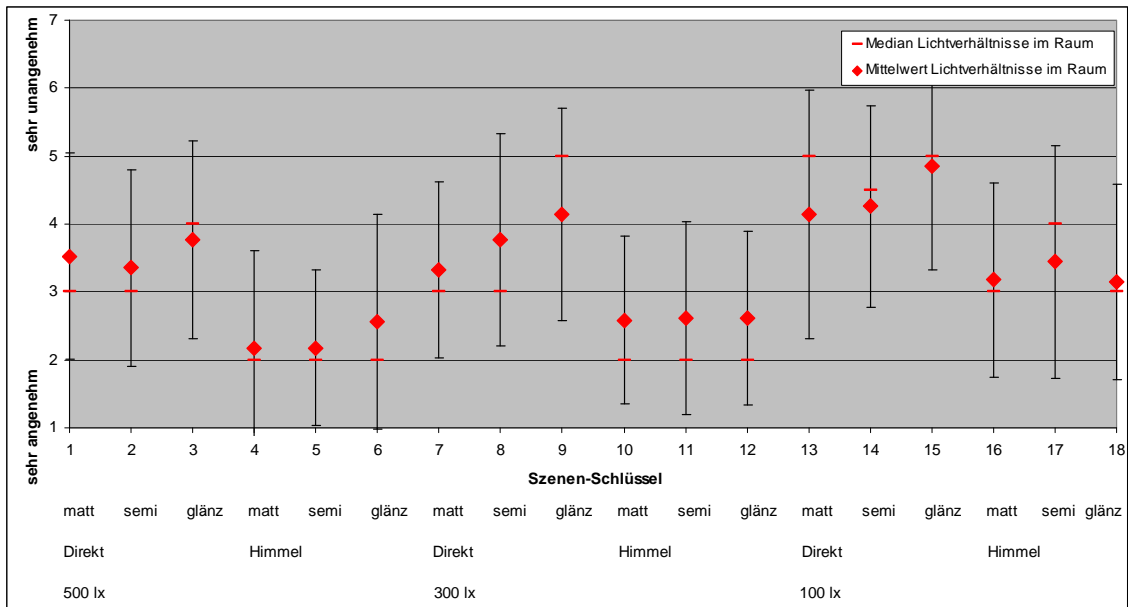


Abbildung 35: „Wie empfinden Sie die Lichtverhältnisse im gesamten Raum im Allgemeinen?“ (sehr angenehm – sehr unangenehm); Mediane und Mittelwerte der Antworten aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

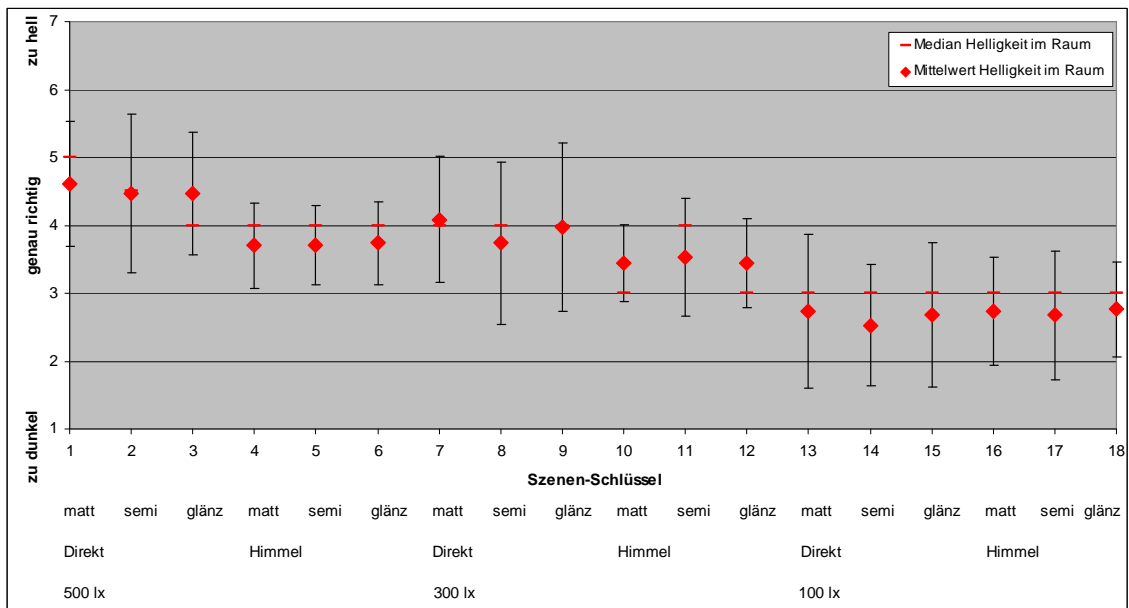


Abbildung 36: „Wie empfinden Sie die Lichtverhältnisse im gesamten Raum im Allgemeinen?“ (zu dunkel – zu hell); Mediane und Mittelwerte der Antworten aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

Auswertung der subjektiven unteren Annehmlichkeitsgrenze

Nachdem die Probanden unter dem jeweiligen Lichtszenario den d2-R Test durchgeführt und den Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Beleuchtungssituation ausgefüllt hatten, wurden Sie aufgefordert, selbstständig das Licht soweit herunter zu dimmen, dass sie gerade noch angenehm über längere Zeit unter dieser Beleuchtung auf dem Tisch arbeiten könnten. Als Sehaufgabe diente während des Herunterdimmens der gerade ausgefüllte Fragebogen, der dazu noch auf dem Arbeitsfeld liegen blieb. Damit soll eine untere Annehmlichkeitsgrenze gefunden werden, bis zu der die Probanden kein zusätzliches Licht benötigen würden. Die individuell eingestellten Werte wurden für die in Abbildung 37 gezeigte Auswertung auf die in dem jeweiligen Szenario geltenden Sollbeleuchtungsstärken (500 lx, 300 lx, 100 lx) bezogen.

Es ist zu sehen, dass die eingestellte Beleuchtungsstärke unabhängig vom Papiertyp und der Lichtrichtung ist. Von einem 500 lx Szenario startend stellten die Probanden im Mittel etwa 150 lx ein, bei einem 300 lx-Startwert wurden circa 120 lx eingestellt. Bei vorher herrschenden 100 lx wurde erwartungsgemäß nicht soweit herunter gedimmt, immerhin wurde mit etwa 60 lx ein erstaunlich niedriger Wert eingestellt. Jedoch ist bei diesem sehr von den individuellen Vorlieben einzelner Probanden abhängigen Versuch die Streuung relativ groß.

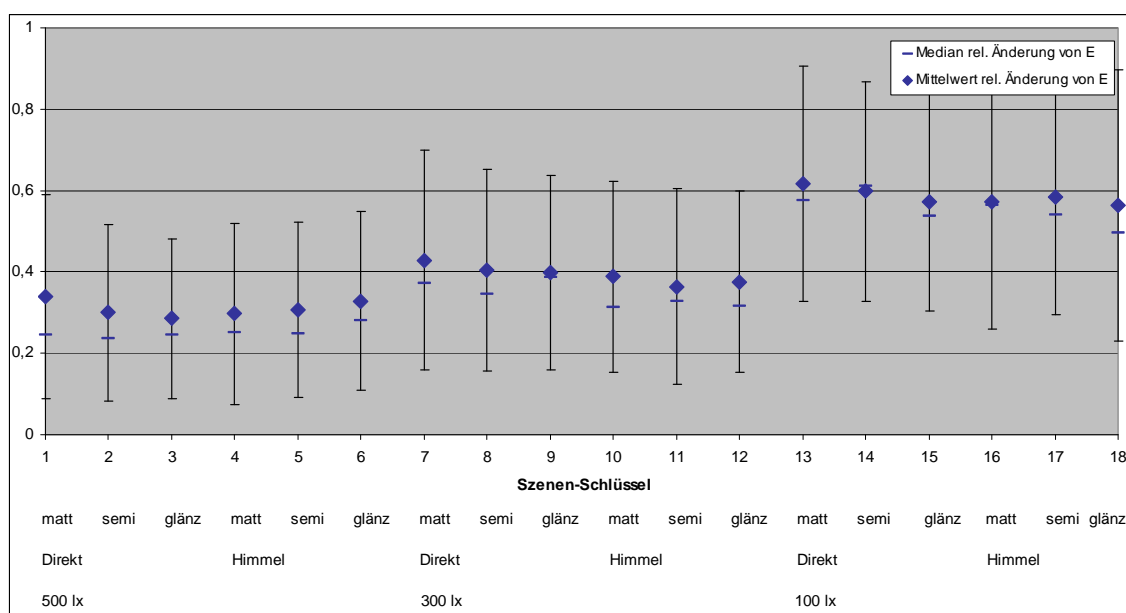


Abbildung 37: Mediane und Mittelwerte der relativen Änderung der Beleuchtungsstärke aller 18 Szenarien; Fehlerbalken +/- 1 SD

Das Selbsteinstellen der Helligkeit durch die Probanden ist erwartungsgemäß abhängig vom Adaptationsniveau. Dabei ergaben sich bei der in diesem Versuch formulierten Aufgabenstellung keine Unterschiede zwischen der Direkt-Beleuchtung und dem seitlichen Licht-einfall durch den künstlichen Himmel.

2.3 Teilprojekt C „Tageslicht in Gebäuden: Befragungen und Felduntersuchungen“

Die Arbeitsstättenverordnung ArbStättV (2004) schreibt vor, dass Arbeitsstätten „möglichst ausreichend Tageslicht erhalten“ müssen. Dazu definiert die Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.4 (April 2011) „ausreichendes Tageslicht in Arbeitsstätten“ entweder über einen Tageslichtquotient auf dem Arbeitsplatz von 2 % oder mit einer Mindestfenstergröße (durchsichtige Fensterfläche) von 1/10 der Raumgrundfläche, bzw. einer Rohbauöffnung von 1/8 der Raumgrundfläche.

In DIN 5034 wird der Helligkeitseindruck von Wohnräumen und Arbeitsräumen, die in ihren Maßen Wohnräumen entsprechen, über den Tageslichtquotient in zwei Bezugspunkten in der Mitte der Raumtiefe mit jeweils einem Meter Abstand zur Seitenwand geregelt.

In diesem dritten Teilprojekt wird mittels Nutzerbefragungen in Felduntersuchungen die Qualität der Tageslichtbeleuchtung am Arbeitsplatz ermittelt und mit dem jeweiligen Nutzerempfinden zusammengeführt. Dazu wurde zunächst die räumliche Situation des Arbeitsplatzes (Raumgröße, Fenstergröße, Abstand des Arbeitsplatzes zum Fenster, Verbauung) erfragt. Danach folgt die Einschätzung des Nutzers bezüglich einer ausreichenden Tageslichtversorgung auf dem Arbeitsplatz, der Raumwirkung bei Tageslicht und der Sichtverbindung nach außen.

Die für die Erhebungen verwendeten Fragebögen wurden für jedes Gebäude angepasst, um unterschiedliche Raumgeometrien und örtliche Gegebenheiten zu berücksichtigen. Zusätzlich wurden die Werte des Tageslichtquotienten durch Messungen bzw. Berechnungen bestimmt, um eine mögliche Korrelation zwischen den Befragungsergebnissen und dem Tageslichtquotienten abzuleiten.

2.3.1 Verwaltungsgebäude

Verwaltungsgebäude A (Baujahr ca. 1930)

Die ersten Untersuchungen wurden in einem dreigeschossigen Verwaltungsgebäude mit 75 Nutzern in Einzel- und Doppelbüroräumen durchgeführt. Die Räume sind zur Hälfte nach Nordwesten orientiert (6,55 m Raumtiefe), die anderen Räume weisen eine Südost-Fassade auf (4,35 m Raumtiefe). Dabei gibt es jeweils Räume mit einem oder mit zwei Fenstern.

Die in Abbildung 38 gezeigten messtechnisch ermittelten Tageslichtquotienten belegen eine sehr gute Tageslichtversorgung in den Räumen mit SO-Fassade. Die nach NW orientierten Räume sind nur im fensternahen Bereich gut mit Tageslicht versorgt, schon in der Raummitte werden Werte für den Tageslichtquotienten gemessen, die nur noch einer geringen Tageslichtversorgung entsprechen; dies ist mit der erheblich größeren Raumtiefe zu erklären.

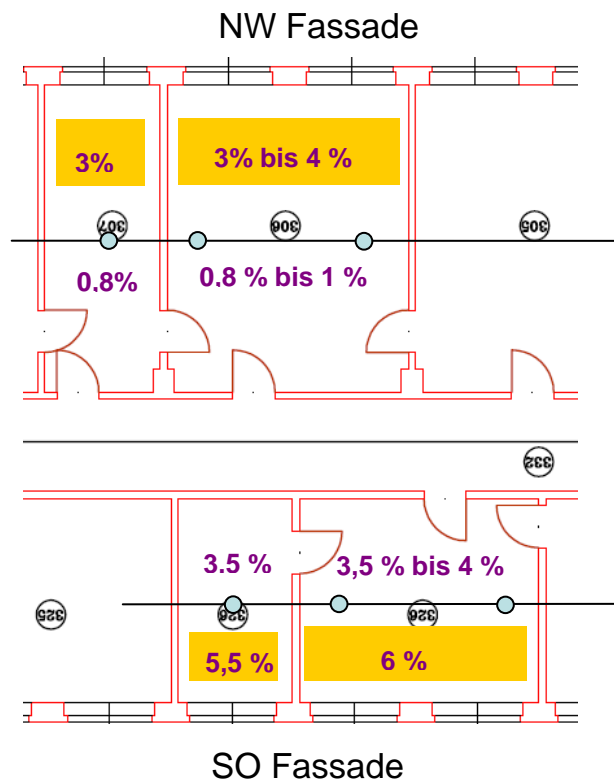


Abbildung 38: Grundrisse der Büroräume mit gemessenen Tageslichtquotienten

In Abbildung 39 ist die Bewertung der Sichtverbindung nach außen dargestellt. Vor der Nordwestfassade befinden sich in einem Abstand von etwa 10 Metern hohe Alleebäume, trotzdem wird die Sichtverbindung von den meisten Nutzern als freier Ausblick beschrieben.

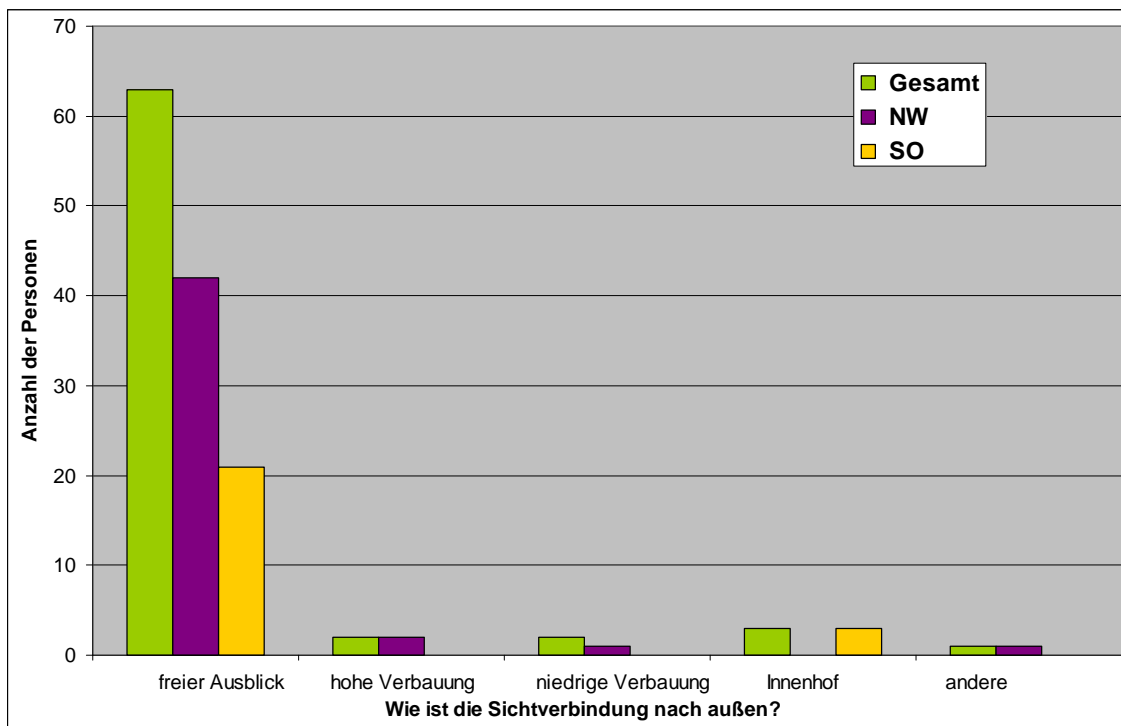


Abbildung 39: „Wie ist die Sichtverbindung nach außen?“

Abbildung 40 zeigt, dass etwa drei Viertel der Arbeitsplätze sehr nah am Fenster aufgestellt sind. In den größeren Räumen mit NW-Fassade bietet es sich an, weitere Arbeitsplätze im Raum einzurichten, die dann zwangsweise in der Raumtiefe stehen. Dass dies nicht dem Nutzerwunsch entspricht, zeigt sich darin, dass in den SO-Räumen alle Arbeitsplätze direkt am Fenster aufgestellt sind.

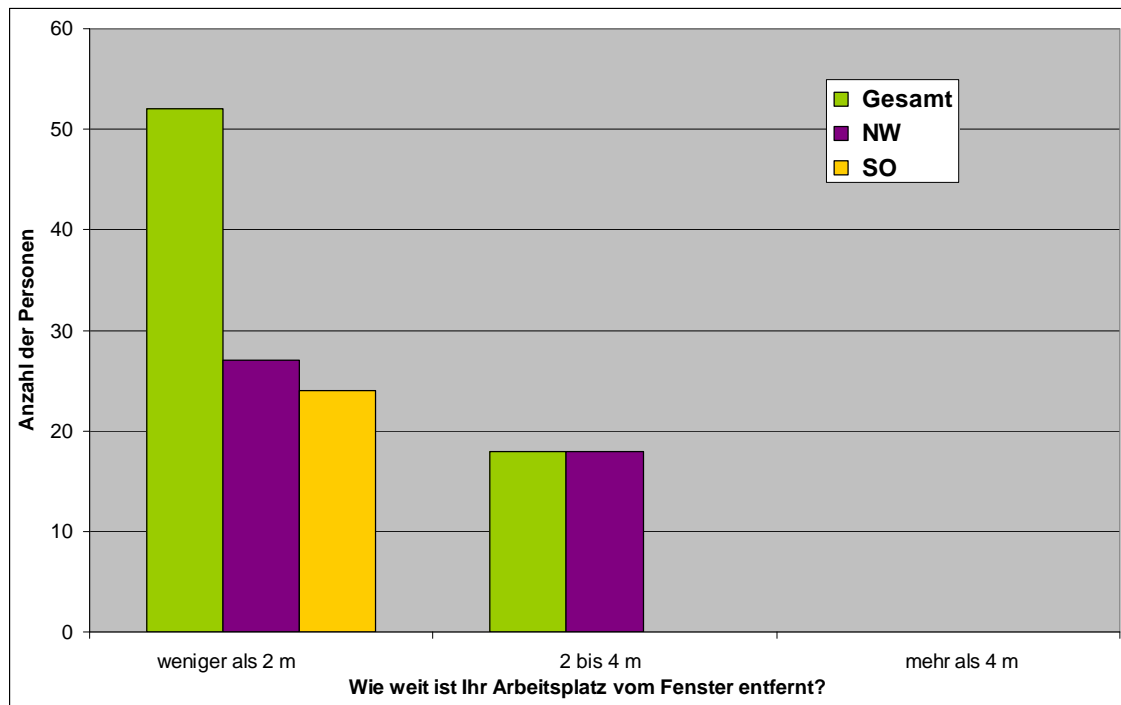


Abbildung 40: „Wie weit ist ihr Arbeitsplatz vom Fenster entfernt?“

In Abbildung 41 und Abbildung 42 sind die Antworten auf die Frage „Wie ist die Beleuchtungssituation durch Tageslicht an Ihrem Arbeitsplatz?“ wiedergegeben. Auch hier ist erkennbar, dass die Nutzer in den SO-Räumen zu einem großen Teil zufrieden mit der Tageslichtbeleuchtung an Ihrem Arbeitsplatz sind, es gibt jedoch eine deutliche Tendenz hin zu „zu viel“ Tageslicht. Im Gegensatz dazu tendieren einige Nutzer in den NW-Räumen zur Einschätzung, dass zu wenig Tageslicht an Ihrem Arbeitsplatz vorhanden ist. Dies belegt, dass die gemessenen niedrigen Tageslichtquotienten für Arbeitsplätze in der Raumtiefe für eine gute Tageslichtbeleuchtung nicht ausreichen.

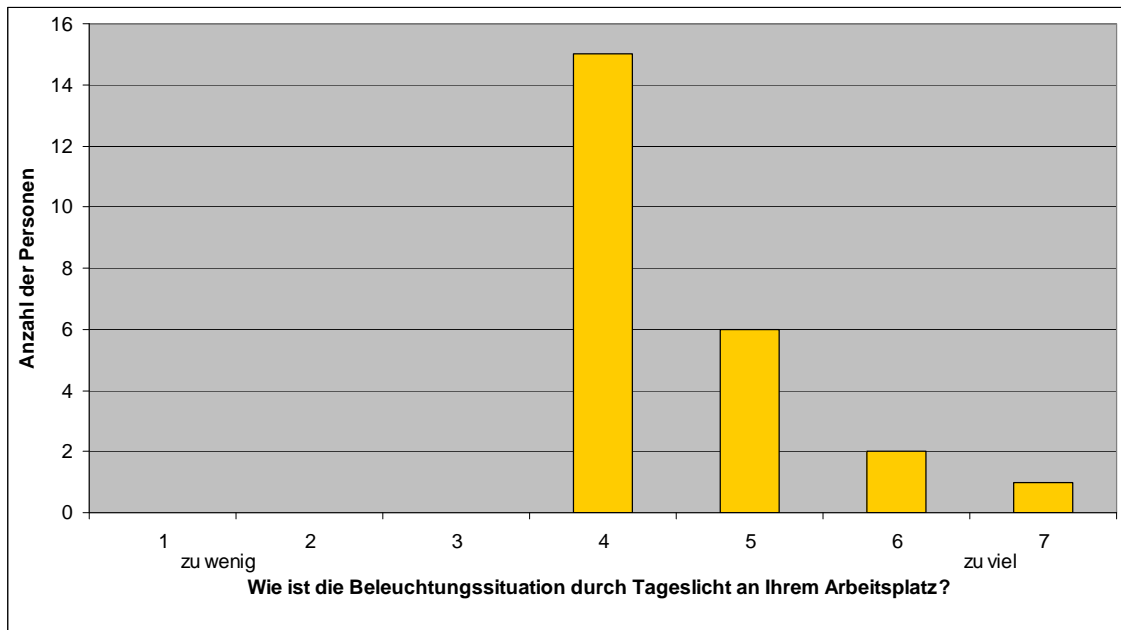


Abbildung 41: „Wie ist die Beleuchtungssituation durch Tageslicht an Ihrem Arbeitsplatz?“ – SO-Fassade

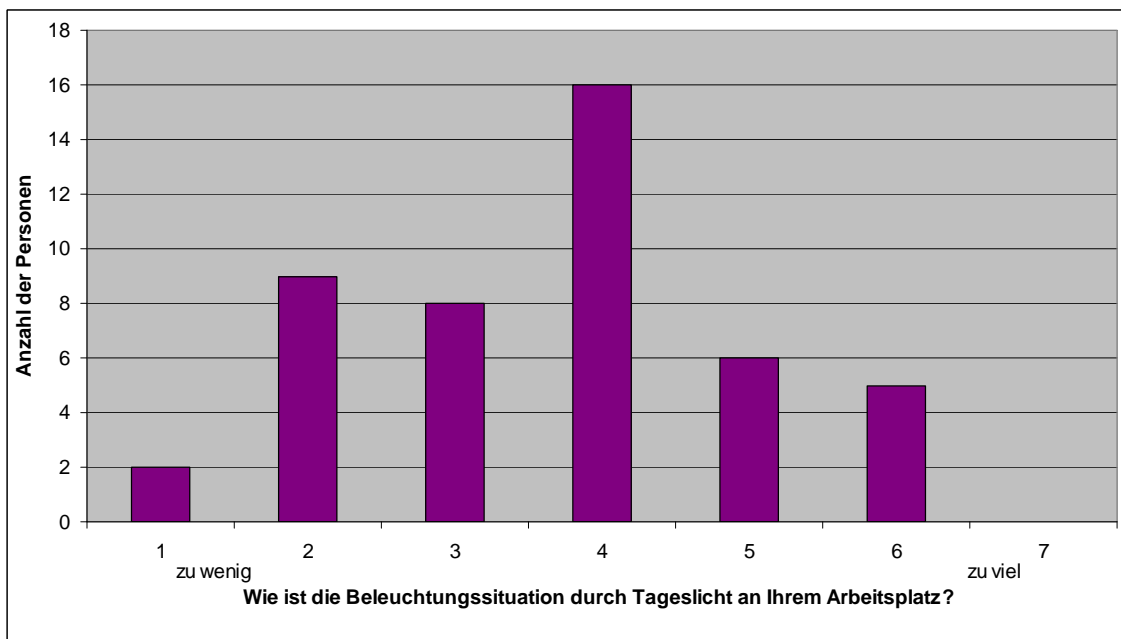


Abbildung 42: „Wie ist die Beleuchtungssituation durch Tageslicht an Ihrem Arbeitsplatz?“ – NW-Fassade

Eine leichte Verschiebung der Tendenz in Richtung hin „zu wenig“ zeigt sich bei den Antworten auf die Frage „Wie ist die Beleuchtungssituation durch Tageslicht in Ihrem Arbeitsraum?“. In den kleineren Räumen mit SO-Fassade empfindet weiterhin die Großzahl der Nutzer die Ausleuchtung des Raumes als genau richtig oder eher zu viel (Abbildung 43). Die tieferen Räume der NW-Seite werden eher als „zu wenig“ mit Tageslicht versorgt bewertet (Abbildung 44).

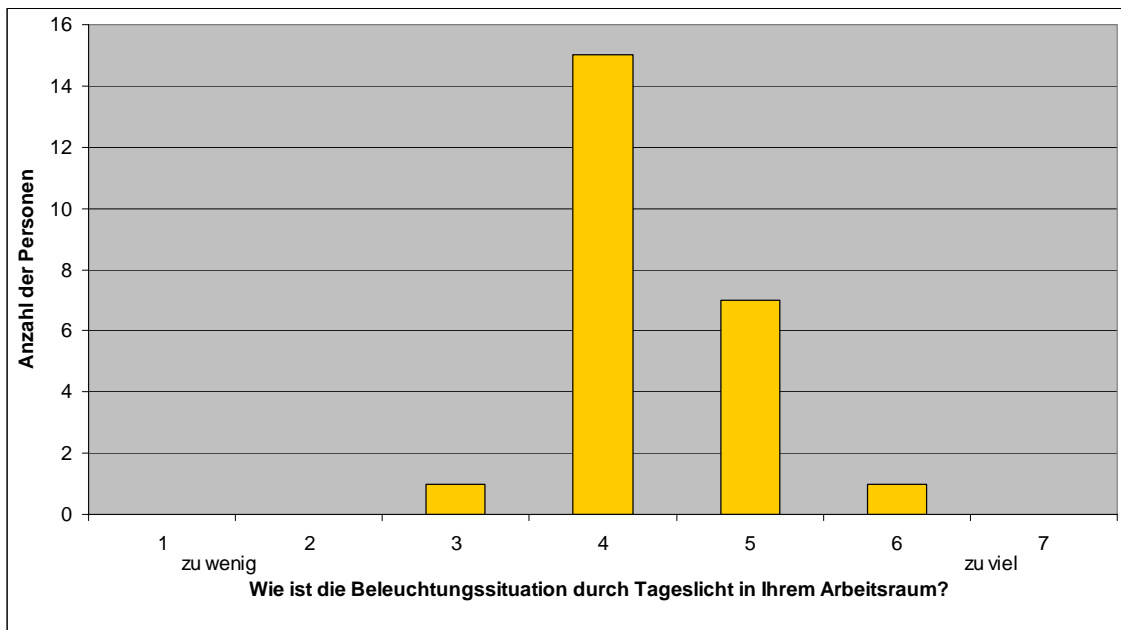


Abbildung 43: „Wie ist die Beleuchtungssituation durch Tageslicht in Ihrem Arbeitsraum?“ – SO-Fassade

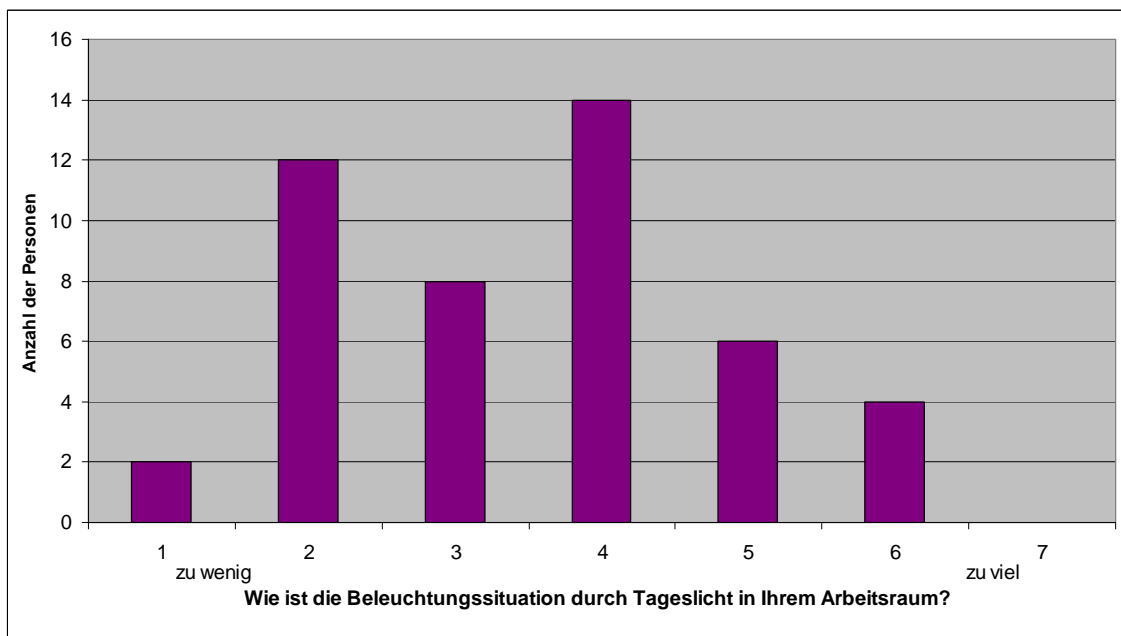


Abbildung 44: „Wie ist die Beleuchtungssituation durch Tageslicht in Ihrem Arbeitsraum?“ – NW-Fassade

Verwaltungsgebäude B (Baujahr ca. 1950)

Im zweiten Verwaltungsgebäude mit ca. 400 Einzelbüroräumen konnten die Befragungen nur während der Sommerzeit durchgeführt werden. Die Räume mit den Maßen 5 m x 3,5 m = 17,5 m² sind mit einer Fensterfläche von ca. 2,4 m² gut bis sehr gut mit Tageslicht versorgt.

Der Fragebogen enthielt sowohl Aussagen zur Beleuchtungsqualität der Tageslichtsituation als auch zu ergonomischen Aspekten. Insgesamt haben sich 233 Personen an der Befragung beteiligt. Dies entspricht bei einer Belegschaft von rund 400 Mitarbeitern einem Rücklauf von über 50 %, was für eine freiwillige Befragung einen sehr guten Wert darstellt. Das Alter der Befragten erstreckte sich von 23 bis 61 Jahren und betrug im Mittel 47 Jahre. Damit ist die Stichprobe eindeutig altersheterogen und dürfte die Belegschaft gut repräsentieren. Mit 92 weiblichen und 136 männlichen Antwortenden liegt die Geschlechterverteilung relativ gleichmäßig bei rund 40 zu 60 %. Inwiefern dies repräsentativ ist, lässt sich nicht ermitteln, da hierzu keine Daten vorlagen. 29 (12,4 %) der Befragten berichteten über Augenprobleme, die über eine normale Kurz- oder Weitsichtigkeit hinausgehen.

Die Ausrichtung der Fensterfront verteilt sich zu etwa einem Drittel zum Innenhof und zwei Dritteln nach außen, was wiederum für eine hohe Repräsentativität der Daten spricht. Fast alle Räume sind mit zwei Fenstern ausgestattet und mit einer Person belegt. Ebenfalls prototypisch erscheint die Lage des Arbeitsplatzes. So sitzt der weitaus überwiegende Teil der Befragten in 1-2 m Entfernung vom und seitlich zum Fenster.

Die Tageslichtversorgung am Arbeitsplatz und im gesamten Raum scheint nach den Angaben der Befragten nahezu ideal zu sein. Wie aus Abbildung 18 ersichtlich, gibt es lediglich eine leichte Tendenz, die Tageslichtbeleuchtung als zu dunkel einzuschätzen.

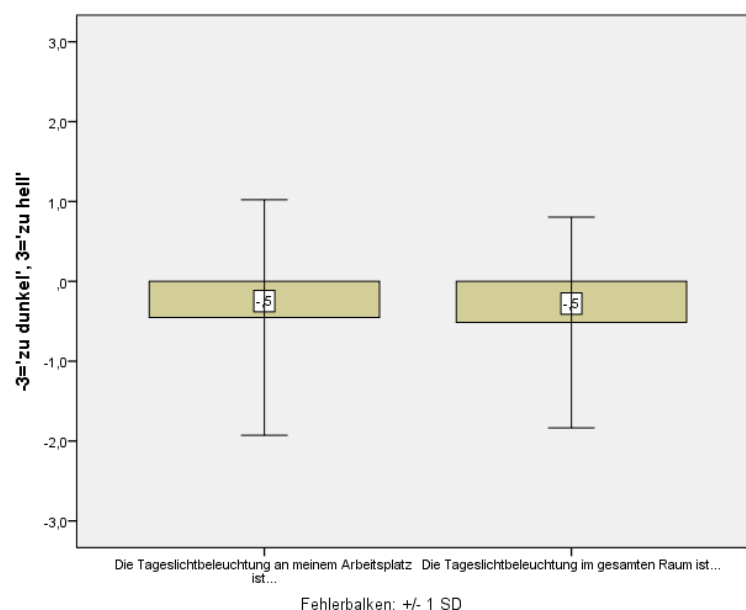


Abbildung 45: Einschätzung der Tageslichtbeleuchtung.

Die Sichtverbindung nach außen wird im Mittel als nahezu ungehindert bewertet. Abbildung 46 zeigt das entsprechende Diagramm.

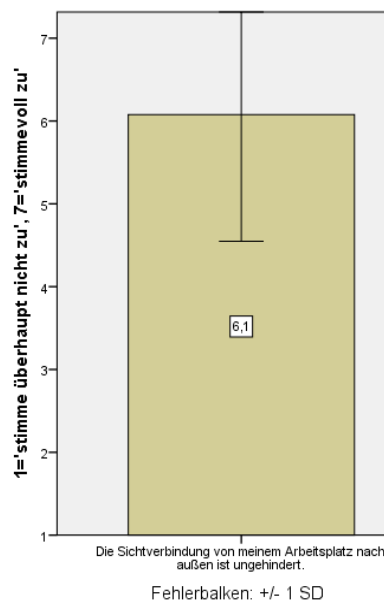


Abbildung 46: Bewertung der Sichtverbindung nach außen.

Verwaltungsgebäude C (Baujahr ca. 2000)

Bei diesem Bürogebäude handelt es sich um ein Verwaltungsgebäude mit Doppelglasfassade. Die Arbeitsräume sind in unterschiedlichen Stockwerken in vier Himmelsrichtungen (N, O, S und W) verteilt. In den Räumen werden hauptsächlich Lese- und Schreibtätigkeiten sowie Arbeiten am Bildschirm ausgeübt. Die Räume sind unterschiedlich groß und verschieden belegt. Sie haben relativ große Fenster und relativ geringe Raumtiefen. Die Arbeitsplätze befinden sich in der Nähe von Fenstern und sind meistens parallel zur Fensterwand orientiert. In den Räumen auf der Gebäudeaußenfassade ist die Sichtverbindung in oberen Stockwerken ins Freie ungehindert, in den unteren Stockwerken teilweise durch gegenüberliegende Bebauungen und teilweise durch Bäume beschränkt. Die Räume auf der Innenfassade des Gebäudes haben den Ausblick auf Innenhöfe.

Der Fragebogen beinhaltet neben den Fragen zur Bewertung der Tageslichtbeleuchtung zusätzliche weitere allgemeine Fragen. Die Anzahl der Befragten betrug 245.

Die Bewertung der vorhandenen Sichtverbindung nach außen ist aufgrund der verschiedenen Ausblicke sehr unterschiedlich (Abbildung 47). Ca. 40 % der Betroffenen bewerteten die Sichtverbindung in Räumen mit Fenstern zu den Innenhöfen und in Räumen mit hoher Verbauung als „beschränkt“. Damit ist eine Klassifizierung der Sichtverbindung nach außen möglich.

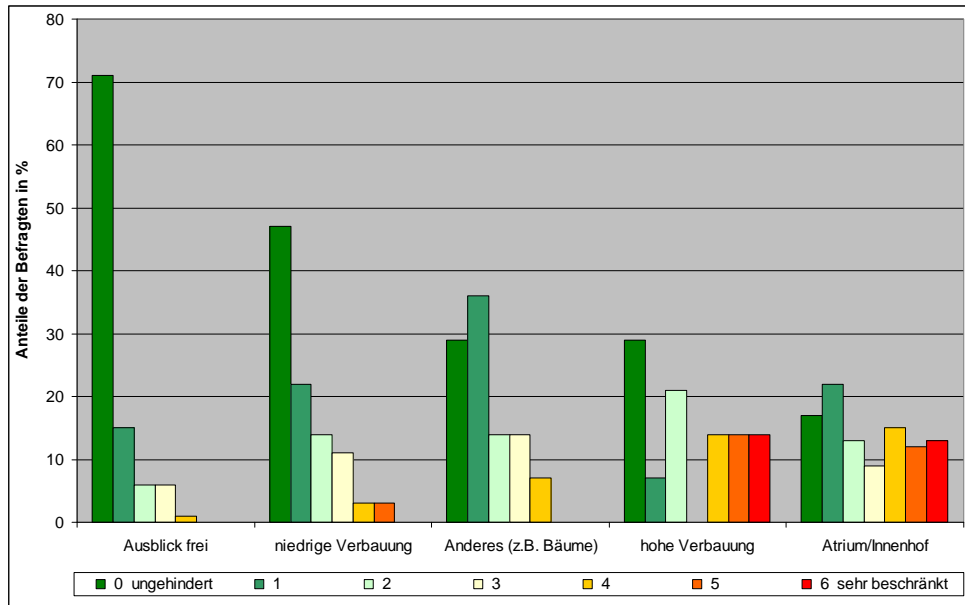


Abbildung 47: Bewertung der Sichtverbindung im Verwaltungsgebäude C

Ungefähr 50 % der Befragten bewerten die Räume als „gerade richtig hell“, 30 % eher als „hell“ und 20 % eher als „dunkel“ (Abbildung 48).

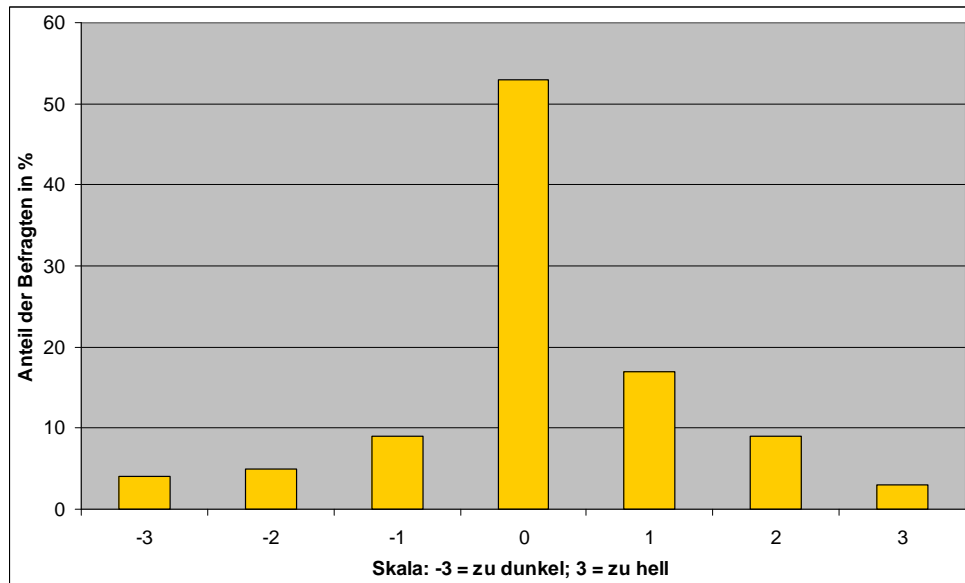


Abbildung 48: Bewertung der Helligkeit im Innenraum im Verwaltungsgebäude C

Verwaltungsgebäude D (Baujahr ca. 2010)

Das vierte Verwaltungsgebäude, das untersucht wurde, zeichnet sich durch den Einsatz eines neuartigen sehr effektiven außen liegenden nicht nachgeführten Sonnenschutzsystems aus. Dabei sollte die Sichtverbindung nach außen möglichst gering beeinträchtigt werden. Abbildung 49 zeigt beispielhaft eine Aufnahme des Raumes bei Sonnenschein mit aktiviertem Sonnenschutzsystem (linke Hälfte) und ohne Sonnenschutzsystem (rechte Hälfte).



Abbildung 49: Sichtverbindung nach außen: Vergleich mit Sonnenschutz (linke Bildhälfte) und ohne Sonnenschutz (rechte Bildhälfte)

Das untersuchte Bürogebäude zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl eine gute Tageslichtversorgung als auch eine gute Sichtverbindung nach außen realisiert wurden und damit die essentiellen Voraussetzungen sowohl für die Sicherheit, die Gesundheit und das Wohlbefinden als auch für die Leistungsbereitschaft von Menschen, die sich in Gebäuden aufhalten erfüllt sind. Die Beurteilung der Tageslichtbeleuchtung durch die Probanden ist in Abbildung 50 durch fünf Antwortklassen dargestellt. Im Fall ohne Sonnenschutz ist der freie Ausblick bei 90 % der Probanden gewährleistet, nur etwa 10 % der Befragten empfinden Einschränkungen. Bei aktiviertem Sonnenschutz ändert sich das Umfrageergebnis deutlich: aber immer noch etwa 2/3 der Probanden empfinden die Sichtverbindung als nur leicht beschränkt bis beschränkt.

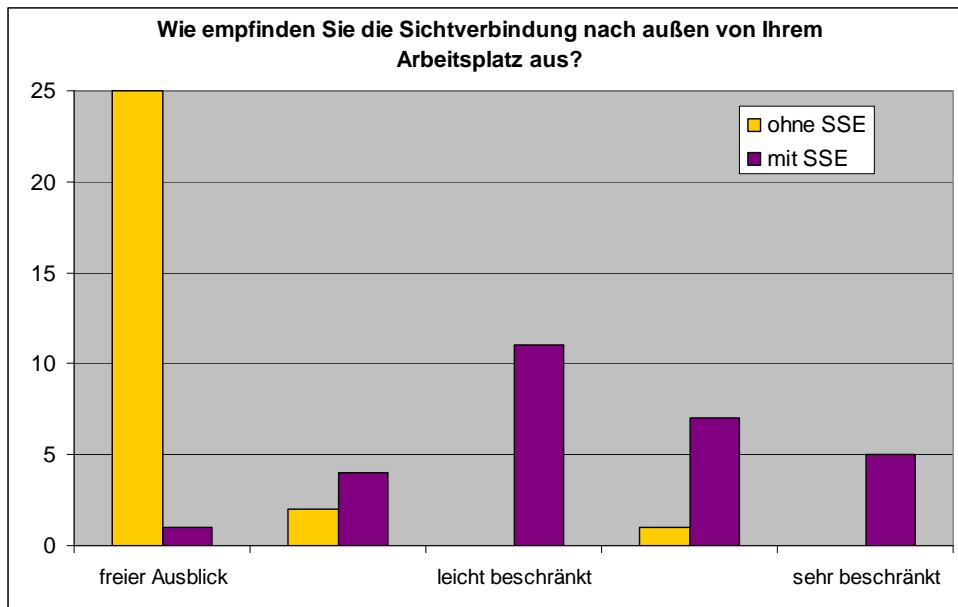


Abbildung 50: Beurteilung der Sichtverbindung nach außen vom Arbeitsplatz aus

Die Blendungsbegrenzung der Tageslichtbeleuchtung mit Seitenfenstern ist ein weiteres wichtiges Merkmal. Dazu zeigt Abbildung 51 das Ergebnis sowohl zur direkten Blendung durch die Sonne als auch zur Reflexblendung auf dem Bildschirm durch helle Flächenelemente im Raum. Das Ergebnis ist sehr eindeutig; 90 % der Nutzer empfinden keinerlei Blendung (weder direkte Blendung noch Reflexblendung) am Arbeitsplatz. Die restlichen 10 % der Nutzer bewerten die Blendung zum größeren Teil als gering.



Abbildung 51: Direkte Blendung und Reflexblendung bei heruntergelassenem Sonnenschutz

2.3.2 Industriehallen mit Oberlichtern

Industriehalle A

Die Industriehalle A dient als Werkstatthalle für Nah- und Fernverkehrsbusse. Sie ist in den Maßen so gestaltet, dass jeweils zwei Busse hintereinander quer in der Halle Platz finden. Die mit fünf Oberlichtern versorgte Haupthalle ist 60 m lang und 21 m breit. Die Oberlichter sind entsprechend 21 m lang und 5 m breit, der Abstand zwischen den Oberlichtern beträgt jeweils 5 m. Die 9,6 m hohe Decke wird durch eine aufwendige Dachkonstruktion getragen, die allerdings zu einer Verschattung der Oberlichter führt. Abbildung 52 und Abbildung 53 geben dazu einen Einblick. Die Arbeitsplätze befinden sich meist zwischen den geparkten Bussen, was zu einer erheblichen Verschlechterung der Beleuchtungsbedingungen führt.



Abbildung 52: Blick in die Industriehalle A



Abbildung 53: Oberlichter in der Industriehalle A

Mit den vor Ort ermittelten Abmessungen der Halle und der Oberlichter wurde mit Hilfe der Lichtberechnungssoftware Relux zunächst ein Simulationsmodell erstellt. (Abbildung 54)



Abbildung 54: Rendering der Simulation der Tageslichtversorgung in der Industriehalle A

Unter den Annahmen eines Lichttransmissionsgrades der Oberlichter von $\tau = 60\%$, eines Versprossungsfaktors von 0,6 und eines Verschmutzungsfaktors von 0,8 wurde die Verteilung des Tageslichtquotienten in der Halle berechnet. Dabei wurde ein Teil der Halle mit Hindernissen versehen, wie es in der realen Halle der Fall ist. Abbildung 55 zeigt das Ergebnis der Simulation.

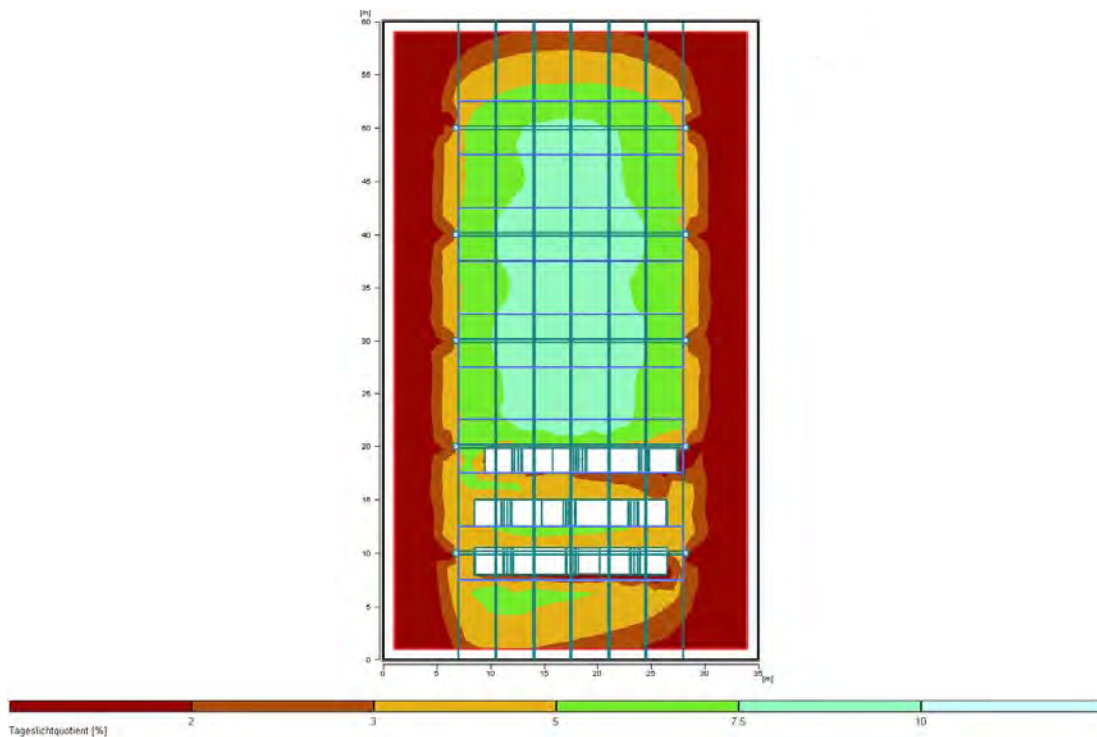


Abbildung 55: Simulierte Verteilung des Tageslichtquotienten in Industriehalle A; Nutzebene 85 cm

Es ist erkennbar, dass sich im freien Teil der Halle in der Mitte ein Tageslichtquotient von etwa 10 % ergibt. Zwischen den Bussen fallen die Werte aber auf circa die Hälfte ab.

Zur messtechnischen Verifizierung wurde an einem Tag bei vollkommen bedecktem Himmel und ausgeschalteter künstlicher Beleuchtung mit Hilfe zweier baugleicher portabler Klasse A Beleuchtungsstärkemessgeräte der Firma Czibula & Grundmann der Tageslichtquotient an ausgewählten Punkten ermittelt. Dazu wird auf dem Dach des Gebäudes die Beleuchtungsstärke bei unverbautem Himmel gemessen, zeitgleich wird jeweils in einem Punkt in der Halle auf einer Nutzebene von 85 cm die Beleuchtungsstärke gemessen.

Aufgrund der vielen Hindernisse in der Halle war die Auswahl der Messpunkte eingeschränkt. Es wurde eine Messreihe unter einem Oberlicht als Querschnitt durch die Halle durchgeführt, eine zweite Messreihe wurde entlang der Längsachse von der Mitte eines Oberlichts bis unter die Mitte eines Deckenteils ausgewählt. Die messtechnisch ermittelten Werte des Tageslichtquotienten sind in Abbildung 56 den aus der Simulation im Bereich der Hindernisse abgelesenen Werten gegenübergestellt.

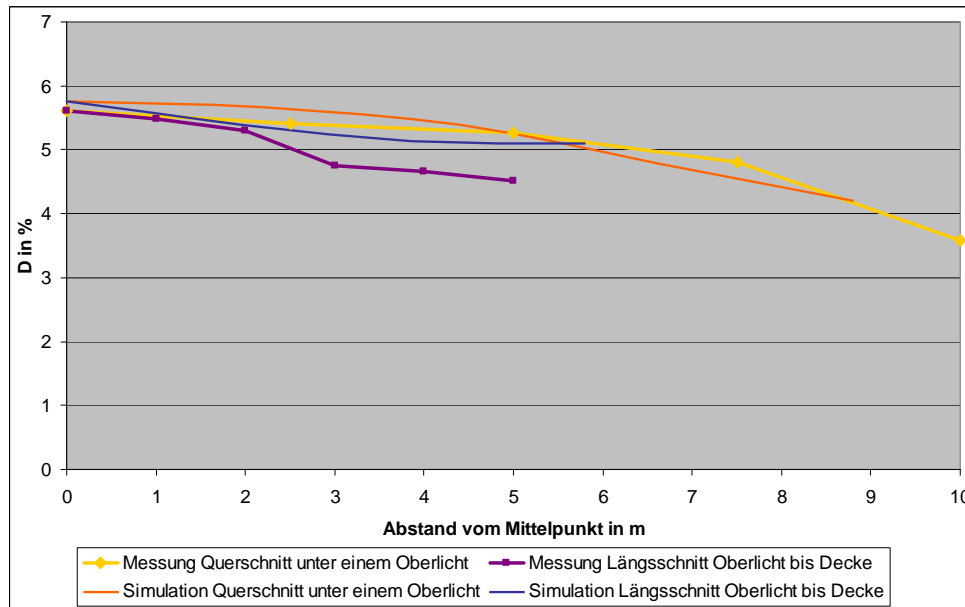


Abbildung 56: Verlauf des Tageslichtquotienten in Industriehalle A; Nutzebene 85 cm

Es zeigt sich eine ausreichende Übereinstimmung der messtechnisch erfassten Werte mit den berechneten Ergebnissen. Geringe Unterschiede sind auf die nicht 100-prozentig realitätsnahe Simulation zurückzuführen. Unter den realen Bedingungen wird für die Industriehalle E nach den Messungen und Berechnungen von einem mittleren Tageslichtquotienten von $D = 4,4 \%$ ausgegangen.

Für die Befragung der in der Halle täglich arbeitenden Nutzer wurde ein kurzer Fragebogen erstellt, der neben den Angaben zum Alter und Geschlecht eine Bewertung der Helligkeit durch das Tageslicht in der gesamten Werkshalle und am Arbeitsplatz ermöglicht. Die Antworten sollten auf einer siebenstufigen Skala mit den Beschriftungen „viel zu dunkel“ (Bewertung 1), „weder noch“ (Bewertung 4) bis „viel zu hell“ (Bewertung 7) angekreuzt werden. Zusätzlich wurde die Nutzungshäufigkeit der elektrischen Beleuchtung abgefragt. Der Fragebogen ist in Abbildung 57 abgedruckt.

Für die Industriehalle A wurden 16 Fragebögen beantwortet, alle Nutzer sind männlich und im Mittel 38 Jahre alt. Abbildung 58 zeigt das Histogramm zur Bewertung der Helligkeit. Es ist eine Tendenz zu erkennen, dass die gesamte Werkshalle eher als zu dunkel empfunden wird. Die Helligkeit am Arbeitsplatz wird insgesamt etwas dunkler als die der gesamten Halle bewertet. Im Mittel wird die gesamte Werkshalle mit 3,5 bewertet, die Tageslichtbeleuchtung am Arbeitsplatz erhält eine mittlere Bewertung von 3,0. (vgl. Abbildung 63) Die Frage zur Nutzung der elektrischen Beleuchtung wird im Mittel mit „off“ bewertet.

1 Zu Ihrer Person

Geschlecht weiblich männlich Alter Jahre

2 Bitte beurteilen Sie die Beleuchtungssituation allgemein durch Tageslicht allein (ohne künstliche Beleuchtung)

Die gesamte Werkshalle empfinden Sie allgemein als

viel zu dunkel weder noch viel zu hell

An Ihrem Arbeitsplatz empfinden Sie die Beleuchtung durch das Tageslicht für Ihre Arbeit allgemein als

viel zu dunkel weder noch viel zu hell

Wie oft wird die elektrische Beleuchtung tagsüber eingeschaltet?

nie selten gelegentlich oft immer

Sie sind nun am Ende des Fragebogens angelangt. Wenn Sie noch allgemeine Anmerkungen zum Fragebogen, zur Tageslichtbeleuchtung in Ihrer Werkshalle oder zum Gebäude haben, die Sie bisher nicht angeben konnten, nutzen Sie bitte die folgenden Zeilen:

.....

.....

.....

.....

Herzlichen Dank für Ihre Mitarbeit!

Abbildung 57: Fragebogen zur Nutzerbewertung der Helligkeit durch das Tageslicht in Industriehallen

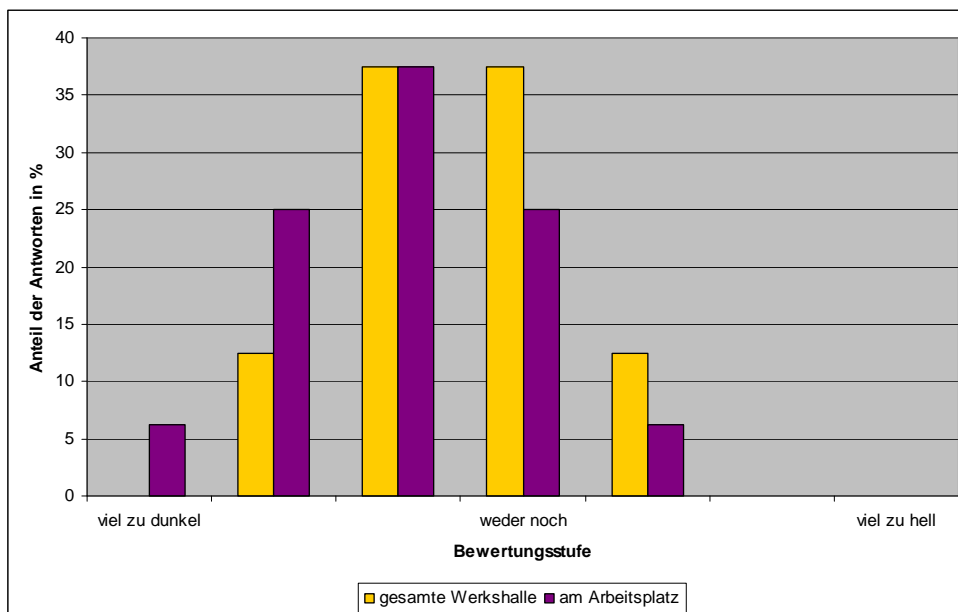


Abbildung 58: Nutzerbewertung der Helligkeit durch das Tageslicht in Industriehalle A; Histogramm

Industriehalle B

In der Metallbau-Industriehalle B werden Sicherheitstüren und Fensterrahmen hergestellt. Die Haupthalle ist 58 m lang und 14 m breit, die Höhe beträgt 8,5 m. Die in Abbildung 59 zu erkennenden Seitenteile werden bei der Ermittlung des Tageslichtquotienten nicht berücksichtigt. Die Halle wird im Wesentlichen durch sieben durchscheinende Oberlichter mit Tageslicht versorgt, deren Rohbauöffnung jeweils 14 m lang und 2,5 m breit ist. Zwei 1 m hohe Fensterbänder an den Seiten sorgen für zusätzliches Tageslicht.



Abbildung 59: Blick in die Industriehalle B

Zur Ermittlung des Tageslichtquotienten wurden nach gleichem Verfahren wie bei Industriehalle A die Werte einer Simulationsrechnung (Abbildung 60) mit den vor Ort messtechnisch ermittelten Werten verglichen und ein mittlerer Tageslichtquotient errechnet.

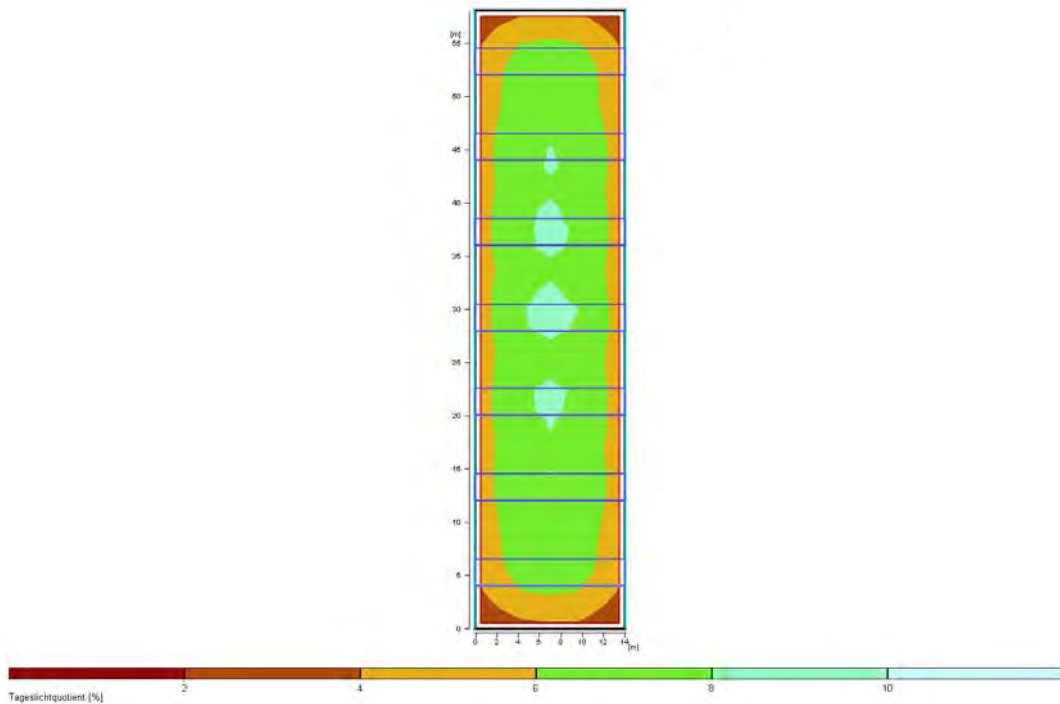


Abbildung 60: Simulierte Verteilung des Tageslichtquotienten in Industriehalle B; Nutzebene 85 cm

Abbildung 61 zeigt die in zwei Querachsen aufgenommenen Werte des Tageslichtquotienten. Es wurde einmal von der Mitte ausgehend nach außen unterhalb eines Oberlichtes gemessen, ein zweites Mal wurde von der Mitte ausgehend zwischen zwei Oberlichtern gemessen. Dazu sind jeweils die aus der Simulation ermittelten Verläufe eingetragen. Für die Industriehalle B ergibt sich ein mittlerer Tageslichtquotient von $D = 6,9 \%$.

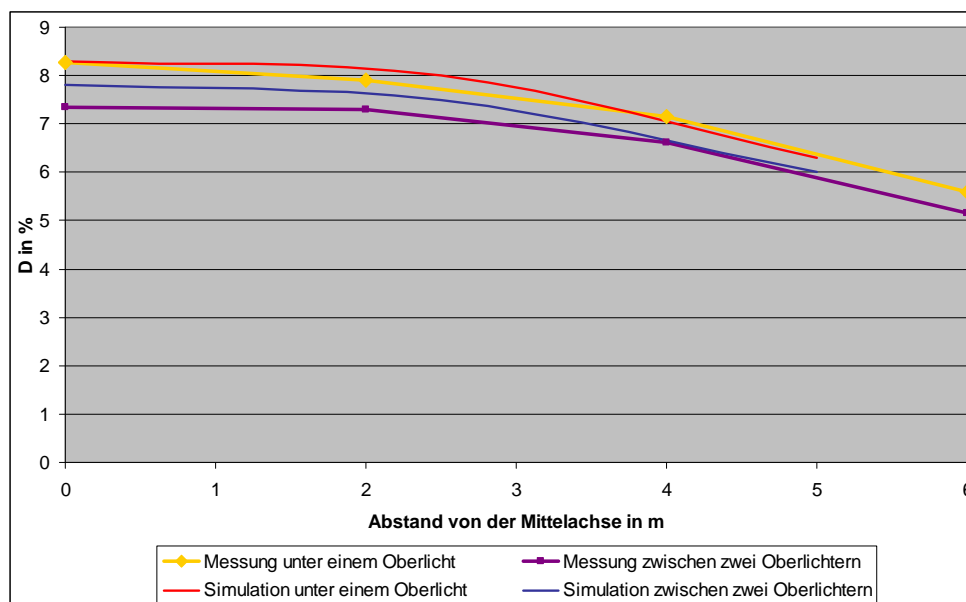


Abbildung 61: Verlauf des Tageslichtquotienten in Industriehalle B; Nutzebene 85 cm

Für die Befragung in der Industriehalle B wurde der bestehende Fragebogen um die Frage nach einer möglichen Wärmebelastung durch Sonneneinstrahlung im Hochsommer ergänzt. Diese wurde durchgehend mit „sehr belastend“ beantwortet.

In Industriehalle B sind alle Nutzer männlich und im Mittel 46 Jahre alt. Abbildung 62 zeigt das Histogramm der Bewertung der Helligkeit in der gesamten Werkshalle sowie am Arbeitsplatz. Im Mittel beträgt die Bewertung der Helligkeit durch das Tageslicht in der gesamten Werkshalle 3,3, die am Arbeitsplatz 2,8. Damit wird die Tageslichtversorgung als etwas zu dunkel bewertet.

Die künstliche Beleuchtung wird in dieser Halle nach Einschätzung der Nutzer „off“ eingeschaltet.

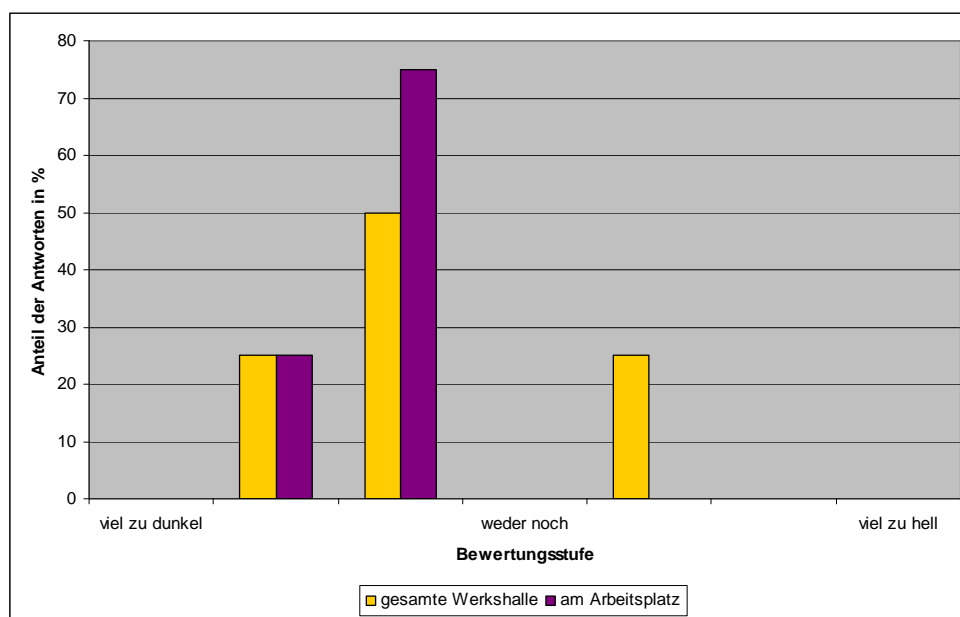


Abbildung 62: Nutzerbewertung der Helligkeit durch das Tageslicht in Industriehalle B; Histogramm

In Abbildung 63 ist die mittlere Helligkeitsbewertung über dem Tageslichtquotient für alle Industriehallen aufgetragen. Es ist trotz deutlich unterschiedlichem Tageslichtquotient in den Hallen kein Unterschied in der Bewertung der Helligkeit durch die Nutzer zu erkennen. Unterschiede treten nur bei der Bewertung der Tageslichtversorgung der gesamten Werkshalle und des Arbeitsplatzes auf. Die Helligkeit am Arbeitsplatz wird durchgehend um 0,5 Skalenpunkte schlechter bewertet, als die der gesamten Werkshalle.

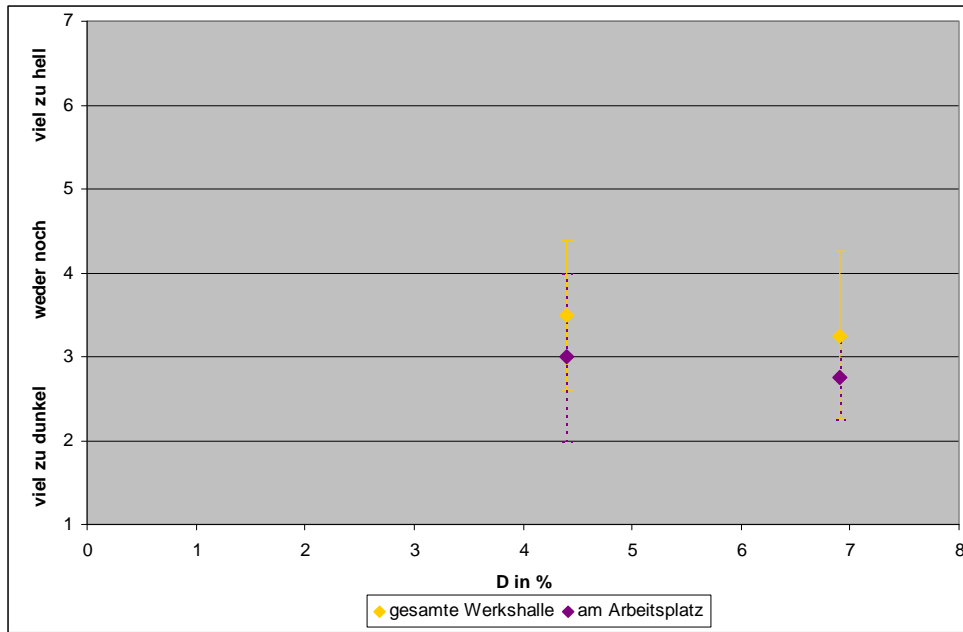


Abbildung 63: Nutzerbewertung der Helligkeit durch das Tageslicht in Industriehallen;
Fehlerbalken +/- 1 SD

2.3.3 Einkaufsarkaden

In der Geschäftsarchitektur werden zunehmend weit über die reine, normgerechte Beleuchtung hinaus regelrechte Lichterlebnisse geschaffen, die eine angenehme Gesamtatmosphäre erzeugen und der Wareninszenierung dienen. Einkaufen ist heutzutage nicht mehr nur ein lästiges Muss – ausgedehntes Shopping ist zu einer beliebten Freizeitbeschäftigung geworden. Die Bedeutung eines hellen, freundlichen Umfelds, in dem die Ware präsentiert und verkauft wird, ist mehr und mehr in den Vordergrund getreten. Eine gute Beleuchtung ist Teil der Marketingstrategie

Bei der Beleuchtung von Verkaufsräumen – insbesondere in den immer mehr verbreiteten Shopping Malls – kommt zunehmend Tageslicht zum Einsatz. Damit kommt bei der Beleuchtung von Einkaufsarkaden der Tageslichtbeleuchtung eine zentrale Rolle zu. Die Dynamik des Tageslichtes sowohl in der Beleuchtungsstärke als auch in seiner Farbe belebt die Atmosphäre in solchen Einkaufs-Arkaden. Neben den vielfältigen Möglichkeiten zur Schaffung eines außergewöhnlichen Ambientes, ist Tageslicht als Ergänzung der künstlichen Verkaufsbeleuchtung außerdem aufgrund seiner idealen Farbwiedergabeeigenschaften hervorragend geeignet, eine einwandfreie Qualitätsbeurteilung der Ware zu ermöglichen.

Das Ziel der im Folgenden vorgestellten Untersuchungen war die Bewertung der Tageslichtbeleuchtung von Einkaufs-Arkaden durch messtechnische Ermittlung der lichttechnischen Parameter und gleichzeitiger Erfassung der Nutzerakzeptanz.

Dazu wurden in fünf repräsentativen Einkaufsarkadendeutschlandweit mit unterschiedlicher Tageslichtversorgung (im Weiteren als Arkade A bis E bezeichnet) lichttechnische Messungen sowie Befragungen der Nutzer mithilfe eines für diese Anwendung entwickelten Fragebogens durchgeführt.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse sollten die spezifischen lichttechnischen Anforderungen für eine visuelle Behaglichkeit der Tageslichtbeleuchtung in Einkaufszentren definiert werden. Insbesondere sollte geprüft werden, ob ein fester Tageslichtquotient (z. B. $D = 8\%$ im Erdgeschoß) die Anforderungen an eine gute Tageslichtbeleuchtung sicherstellen kann.

Die Nutzerbefragung wurde mit Hilfe eines für diesen Zweck entwickelten Fragebogens durchgeführt. Insgesamt wurden über 2000 Probanden befragt. Aufgrund des Fragenumfangs wurde auf eine Erfassung der Probandencharakteristik verzichtet. Stattdessen wurde durch die gezielte Befragung von Probanden durch ausgewiesene Hilfskräfte eine repräsentative Verteilung bezüglich Alter und Geschlecht angestrebt.

Die Befragungen wurden durch Messungen der Beleuchtung mit durchgehenden Aufnahmen der Beleuchtungsstärke an einem repräsentativen Ort des Befragungsbereiches durch Tageslichtbeleuchtung durchgeführt, um eine eventuelle Korrelation zwischen Befragungsergebnissen und Tageslichtsituationen ableiten zu können. Die Befragungen erfolgten

aufgrund der Rücksichtnahme auf den Kundenbetrieb nur in geeigneten Bereichen der Verkehrszonen.

Darüber hinaus befasst sich der Fragebogen mit der allgemeinen Gesamtatmosphäre sowie mit der Wärmebelastung in Arkaden, die allerdings nicht Gegenstand dieser Untersuchungen sind.

Die tageslichttechnischen Messungen beziehen sich auf die Bestimmung des Tageslichtquotienten in Einkaufs-Arkaden. Dazu wurden die Messungen unter Ausschluss der Kunstlichtbeleuchtung sowie des Kundenbetriebes an Sonntagen in EG und OG bei vollkommen bedecktem Himmelszustand gemäß der Norm DIN 5034, Teil 5 (Tageslicht in Innenräumen, Messung) durchgeführt. Hierfür waren gleichzeitig die horizontalen Beleuchtungsstärkeverteilungen in den Arkaden und die Beleuchtungsstärke im Freien (Globalbeleuchtungsstärke) mit Hilfe von Beleuchtungsstärkemessgeräten gleicher Bauart zu erfassen.

Im Folgenden sind die ermittelten Tageslichtquotienten in unterschiedlichen Mallbereichen der Arkaden dargestellt. Repräsentativ für den jeweiligen Bereich wurde auf verschiedenen Mallquerachsen d gemessen.

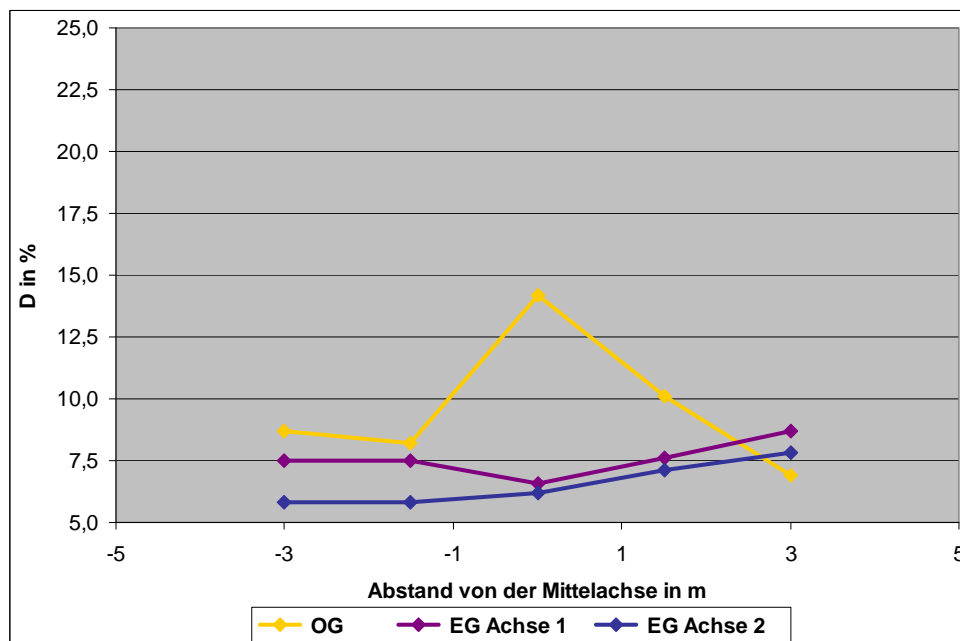


Abbildung 64: Tageslichtquotient Arkade A

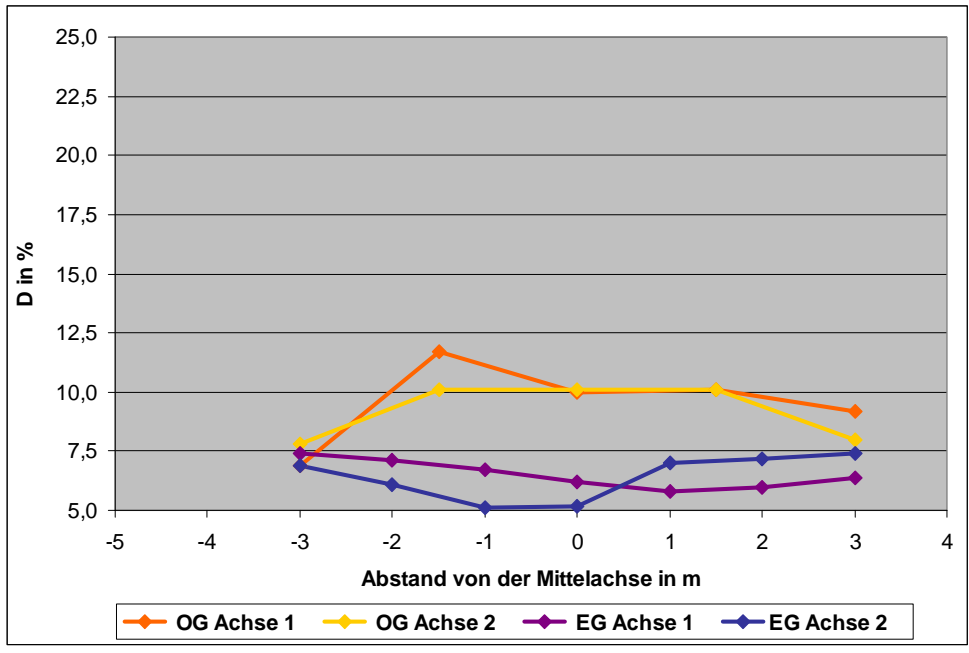


Abbildung 65: Tageslichtquotient Arkade B

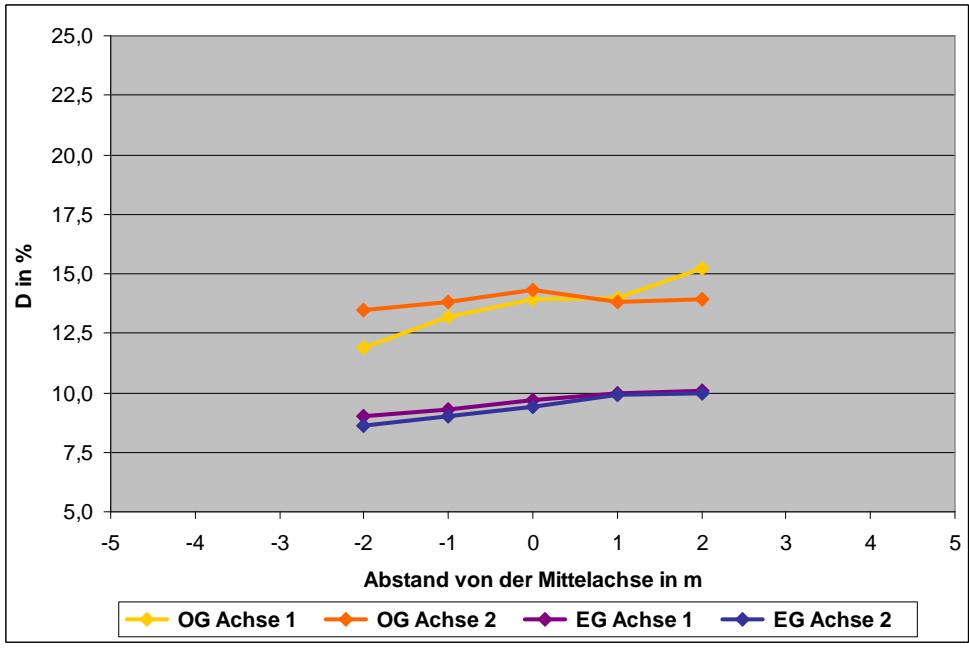


Abbildung 66: Tageslichtquotient Arkade C

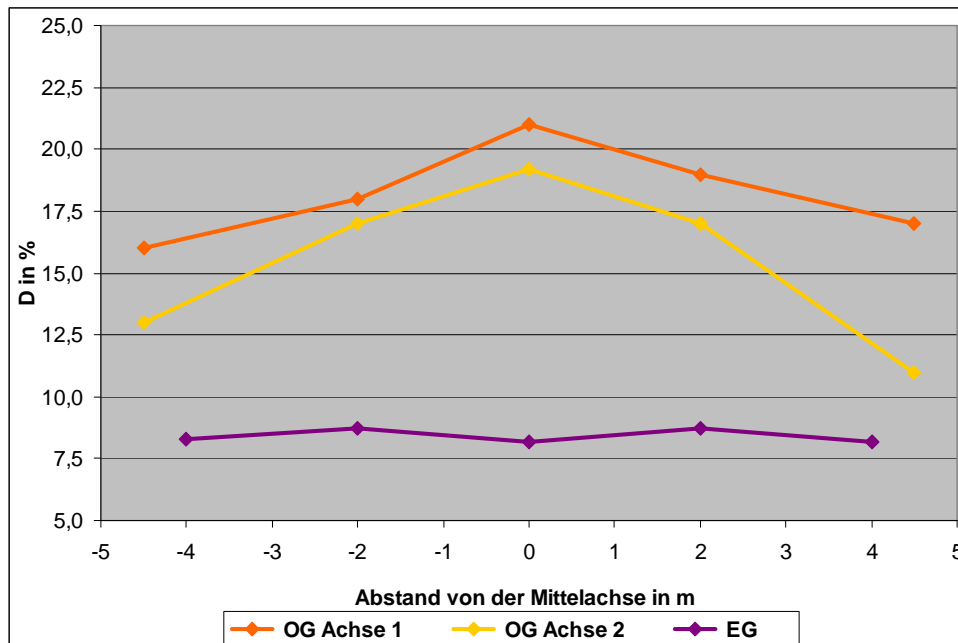


Abbildung 67: Tageslichtquotient Arkade D

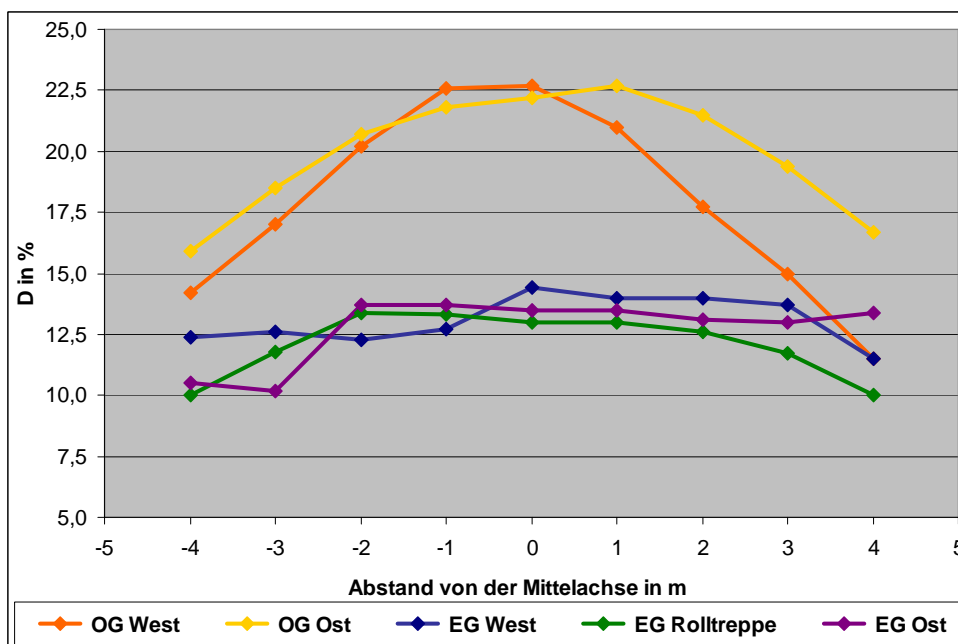


Abbildung 68: Tageslichtquotient Arkade E

Die Messungen zeigen, dass der vorgegebene Planungswert von $D_{\max} = 8\%$ im EG in vier der fünf vorliegenden Objekte eingehalten wird. In der Arkade E liegt D_{\max} zwischen 12 % und 14 %. In den Obergeschossen, in denen keine Angaben bezüglich einzuhalten-der Grenzwerte bestanden, ergaben sich je nach Standort, Verbauungssituation und Art der Oberlichtverglasung sehr unterschiedliche Werte des Tageslichtquotienten. In den Arkaden D und E werden in einem Teilbereich Werte des Tageslichtquotienten von mehr als 20 % erreicht.

Die folgende Abbildung zeigt das Antwortspektrum auf die Frage „Wie empfinden Sie das Tageslicht in der Arkade allgemein“.

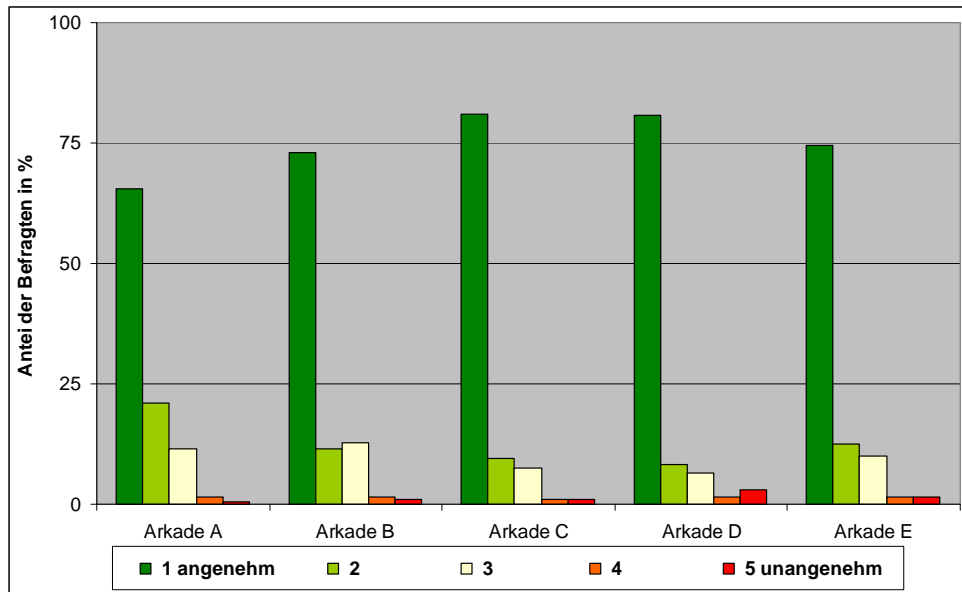


Abbildung 69: Allgemeine Bewertung der Tageslichtbeleuchtung (angenehm / unangenehm)

Aus Abbildung 69 wird deutlich, dass der überwiegende Teil der Befragten die Tageslichtbeleuchtung als angenehm empfinden. Wird nach der Helligkeit gefragt (Abbildung 70), so bewerten immerhin 18 % die Arkade D und 13 % die Arkade E als „hell“ bis „zu hell“, während bei den anderen Objekten nur ca. 8 % entsprechend empfinden. In den Arkaden D und E mit einem Tageslichtquotient von $D > 20\%$ wurde sogar das Tageslicht von 20 % - 30 % der Besucher als „blendend“ bzw. „stark blendend“ empfunden (Abbildung 71).

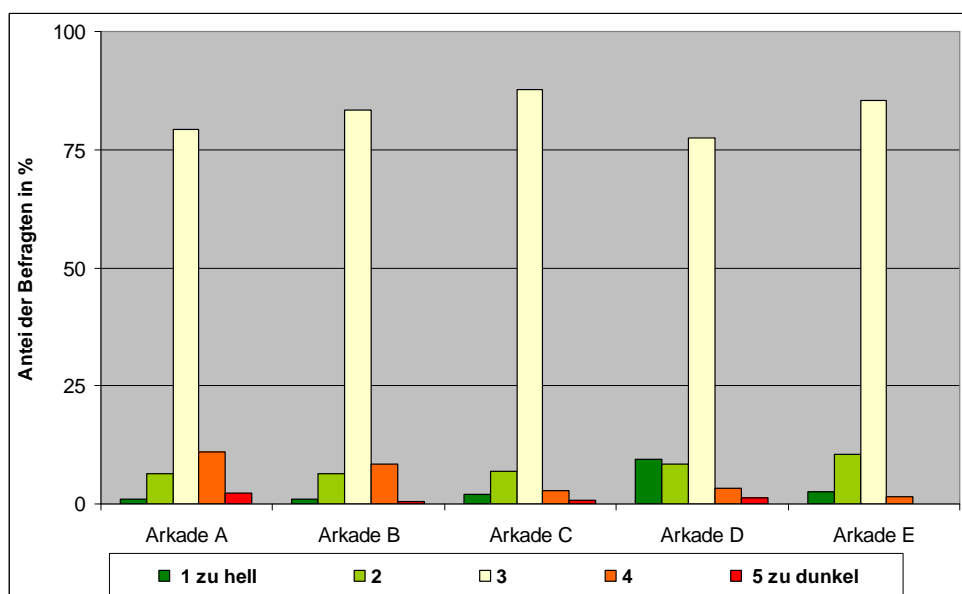


Abbildung 70: Allgemeine Bewertung der Tageslichtbeleuchtung (zu hell / zu dunkel)

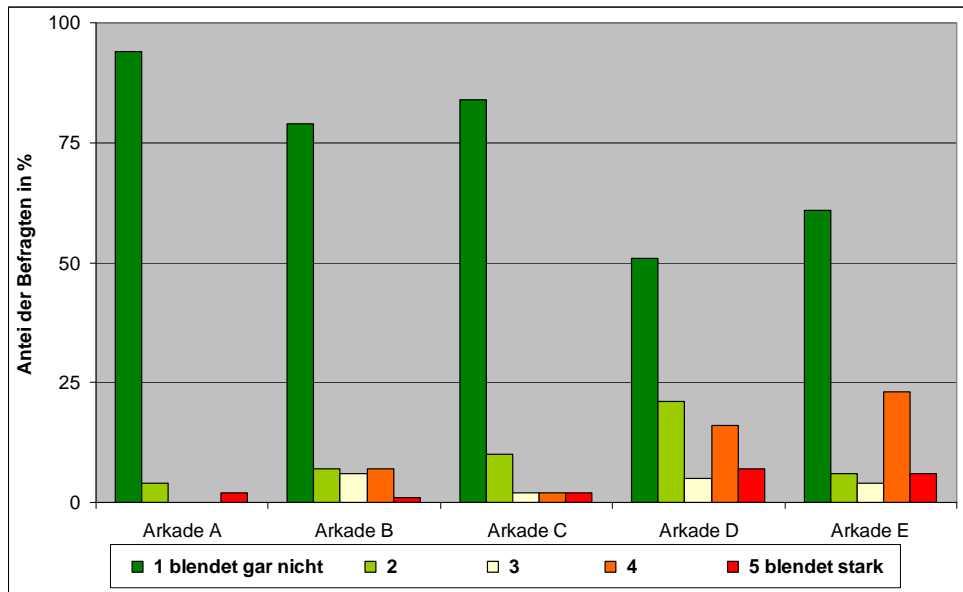


Abbildung 71: Allgemeine Bewertung der Tageslichtbeleuchtung (blendet gar nicht / stark)

2.3.4 Wohngebäude

Einleitung

Tageslicht hat vor allem in Räumen, in denen sich Personen über einen längeren Zeitraum aufhalten, einen großen Einfluss auf das Wohlbefinden des Menschen – so auch in Wohnräumen. Der folgende Teil des Forschungsvorhabens untersucht daher den Helligkeitseindruck von Wohnräumen, der durch das Tageslicht erzielt wird. Dazu werden in einer Befragung Probanden gebeten, den Helligkeitseindruck ihrer Wohnräume gemittelt über das gesamte Jahr zu bewerten. Die Maßzahl, auf die die Bewertung bezogen werden soll, ist dabei der Tageslichtquotient D. Auf diese Weise können die Ergebnisse mit den Mindestanforderungen der DIN 5034 zur Erzielung einer ausreichenden Helligkeit durch Tageslicht verglichen werden, die unter anderem mithilfe des Tageslichtquotienten angegeben werden.

Anders als der Begriff „Wohnraum“ nach DIN 5034 definiert wird, sollen hier weder Schlafzimmer, noch reine Arbeitszimmer in die Bewertung aufgenommen werden. Als Wohnraum werden in dieser Untersuchung Räume verstanden, in denen man sich zu Wohnzwecken über einen längeren Zeitraum am Tage aufhält, in denen aber keine speziellen Sehaufgaben erfüllt werden müssen, die eine höhere Konzentration voraussetzen – wie beispielsweise Wohn- und Kinderzimmer. Da auch in diesen Räumen gewisse Tätigkeiten mit anspruchsvollerer Sehaufgabe nicht ganz ausgeschlossen werden können, wird, wie im Abschnitt „Nutzerbefragung“ gezeigt wird, der Proband gebeten, diese nicht in die Bewertung des Helligkeitseindruckes einfließen zu lassen. Des Weiteren werden nur Räume bewertet, die über eine Sichtverbindung nach außen verfügen. Räume, die nur über Oberlichter mit Tageslicht beleuchtet werden, sind daher nicht Teil der Untersuchung. Auf diese Weise kann ein Einfluss auf den Helligkeitseindruck durch eine gänzlich fehlende Sichtverbindung nach außen ausgeschlossen werden.

Normative Anforderungen an die Tageslichtversorgung in Wohngebäuden

Die DIN 5034 gibt Mindestanforderungen für die Ausleuchtung mit Tageslicht in Wohn-, Arbeits- und sonstigen Aufenthaltsräumen vor. Um einen für die „psychische Bedeutung“ ausreichenden Helligkeitseindruck in Wohnräumen durch das Tageslicht zu erzielen, soll DIN 5034-Teil 1 zufolge mindestens ein mittlerer Tageslichtquotient von 0,9 % erreicht werden. Dieser soll, wie auch in anderen Räumen üblich, aus zwei Punkten ermittelt werden, die auf einer Nutzenebene von 0,85 m Höhe, in halber Raumtiefe und jeweils 1 m von der Seitenwand entfernt liegen. Der kleinere Wert dieser beiden Messpunkte soll dabei nicht geringer als 0,75 % sein. In Räumen, in denen sich Fenster an zwei angrenzenden Wänden befinden, soll der mittlere Tageslichtquotient mindestens 1 % betragen.

Ebenfalls zur besseren Einschätzung des Bewertungsergebnisses diene die Frage nach den grundsätzlichen Eigenschaften einer Wohnung, auf die der Proband Wert legt. Hier sollte herausgefunden werden, wie wichtig dem Proband die Helligkeit im eigenen Wohnraum ist. Um die Antwort nicht durch eine zu offensichtliche Fragestellung zu beeinflussen, wurden hier mehrere Faktoren des Wohnens zur Auswahl gestellt:

10. Unabhängig von Ihrer derzeitigen Wohnsituation, wie wichtig sind Ihnen die folgenden Eigenschaften einer Wohnung? Mehrfachnennungen sind möglich.

- | | |
|---|--------------------------|
| gute Anbindung an öffentliche Verkehrsmittel | <input type="checkbox"/> |
| belebtes Umfeld (in direkter Nähe zum Wohnhaus) | <input type="checkbox"/> |
| ruhiges Umfeld (in direkter Nähe zum Wohnhaus) | <input type="checkbox"/> |
| helle Zimmer | <input type="checkbox"/> |
| große Zimmer | <input type="checkbox"/> |
| Ruhe in der Wohnung | <input type="checkbox"/> |
| niedriger Energiebedarf des Hauses | <input type="checkbox"/> |

Für die Beschreibung der Probandengruppe wurden zusätzlich das Geschlecht und das Alter der Befragungsteilnehmer erfasst.

Aufnahme der Raumparameter

Um die Wohnräume der Probanden so realitätsnah wie möglich simulieren zu können, wurden zunächst folgende Maße aufgenommen.

- Raumhöhe, -tiefe und -breite
- Dicke der Außenwand
- Etage, in der sich der Raum befindet
- Position des Fensters
- Rohbauöffnung der Fenster in Höhe und Breite
- Höhe der Unterkante der Rohbauöffnung
- Sturzhöhe
- Fensterrahmenbreite
- Art der Fenster (Einfachverglasung, Zweifachverglasung, Doppel- bzw. Kastenfenster)
- Art der Versprossung
- No-Sky-Line

Die No-Sky-Line gibt an, wie groß der Anteil des Raumes ist, in dem auf einer Höhe von 0,85 m bei dem Blick aus dem Fenster der Himmel zu sehen ist.

Des Weiteren wurde die Ausrichtung der Räume mithilfe eines Kompasses oder nachträglich über Satellitenbilder ermittelt sowie die Art der Verbauung (z. B. Bäume und Häuser) und deren Oberfläche (glänzend/matt, hell/dunkel) sowie eventuelle Überdachungen (z. B. durch eine Balkon) notiert. Aus Satellitenbildern wurde die Entfernung der Verbauung zum Fenster des bewerteten Raumes ermittelt.

Wenn die Probanden regelmäßig tagsüber einen Sicht- oder Blendschutz vor das Fenster zogen, wurde dies ebenfalls vermerkt und dessen Lichtdurchlässigkeit abgeschätzt. Da regelmäßig am Tag genutzte Vorhänge, Gardinen oder Rollos die Bewertung der Helligkeit im Raum beeinflussen, wurden diese ebenfalls in die Simulation übernommen.

Da neben dem direkten Anteil auch der indirekte Anteil des Tageslichtes einen Einfluss auf den Tageslichtquotienten hat, wurden Fotos von der Einrichtung des Raumes gemacht, um die Reflexionsgrade sämtlicher Oberflächen in der Simulationsphase richtig einschätzen zu können.

Simulation mit DIALux

Die aufgenommenen Daten wurden im Anschluss in das Simulationsprogramm DIALux übernommen. Abbildung 72 bis Abbildung 74 zeigen beispielhaft zwei während der Aufnahme eines Wohnraumes gemachte Fotos sowie die umgesetzte Simulation dieses Wohnraums.



Abbildung 72: Beispiel eines bewerteten Wohnraums 1



Abbildung 73: Beispiel eines bewerteten Wohnraums 2



Abbildung 74: Simulation des bewerteten Wohnraumes in DIALux

Mithilfe der Fotos konnten die wichtigsten Einrichtungsgegenstände realitätsgetreu in der Simulation platziert und die Reflexionsgrade der Wände, der Decke und des Bodens sowie der Möblierung richtig eingeschätzt werden. Da auch die Sicht aus dem Fenster fotografisch festgehalten wurde, konnte die Platzierung der Verbauung im Simulationsprogramm noch einmal mit der tatsächlichen Situation vor Ort abgeglichen werden (Abbildung 75).



Abbildung 75: Blick aus dem Fenster auf die gegenüberliegende Verbauung

Der Reflexionsgrad der Raumbegrenzungsflächen wurde bei weißen Wänden und Decken mit 80 % angesetzt. Holzfußböden beispielsweise wurde ein Reflexionsgrad von 52 % zugewiesen. Der Reflexionsgrad von Häusern mit matter Außenwand wurde je nach Helligkeit der Außenwand auf 20-30 % geschätzt. Bäume erhielten einen Reflexionsgrad von 11 %.

Die Transmission der Fenster wurde mit folgenden Parametern berücksichtigt. Der Transmissionsgrad des Fensterglases wurde auf 75 % gesetzt. Da sich alle Wohnräume der Probanden in städtischen Wohnsiedlungen befanden, wurde der Verschmutzungsgrad der Fenster auf 0,95 geschätzt. Der Korrekturfaktor für nicht-senkrechten Lichteinfall wurde wie üblich mit 0,85 angegeben. Im Zuge der Verifizierung der Simulationen durch die Vergleichsmessungen stellte sich heraus, dass genauere Ergebnisse erzielt werden, wenn anstatt mit der Rohbauöffnung der Fenster, die durch den Versprossungsfaktor korrigiert wird, mit der aus der Datenaufnahme bekannten reinen Glasfläche der Fenster simuliert wird. Der Versprossungsfaktor der Fenster wurde daher in der Simulation auf 1 gesetzt, da eine Reduzierung der Fensterflächen auf diese Weise nicht nötig war.

Referenzmessungen

Zur Verifizierung der Simulationen wurden bei vollständig bedecktem Himmel vier Referenzmessungen durchgeführt. Eine der Messungen erfolgte dabei in einem Neubau mit einer Deckenhöhe von 2,55 m. Eine Verbauung, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Messung des Tageslichtquotienten haben konnte, war hier nicht vorhanden. Drei der Vergleichsmessungen wurden in einem Seitenhaus eines Berliner Altbaus mit einer Deckenhöhe von 3,10 m durchgeführt. Der Tageslichtquotient der zum Innenhof ausgerichteten Räume wurde vor allem durch das gegenüberstehende Seitenhaus beeinflusst. Die Breite des Innenhofes und damit der Abstand zwischen den Seitenhäusern betrug hier 10 m.

Die Messpunkte für die Beleuchtungsstärke im Innenraum wurden, wie nach DIN 5034 gefordert, in halber Raumtiefe, auf einer Nutzebene von 0,85 m Höhe und im Abstand von 1 m zur jeweiligen Wand gesetzt. Da in der Simulation zusätzlich der Tageslichtquotient in der Raummitte auf Höhe der Nutzebene berechnet wurde, wurde auch an diesem Punkt der Räume eine Messung ausgeführt. Die Beleuchtungsstärke im Außenraum wurde im Falle des Neubaus auf einer nahegelegenen unverbauten Wiese vorgenommen, auf der weder Bäume noch Häuser die Messung stören konnten. Zur Ermittlung des Tageslichtquotienten der Altbauräume wurde die Außenmessung auf dem Dach des Hauses durchgeführt.

Abbildung 76 zeigt den Vergleich zwischen den Simulationen und den Vergleichsmessungen. Die Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Tageslichtquotienten liegen dabei im Bereich der Ungenauigkeiten von Simulationsrechnungen.

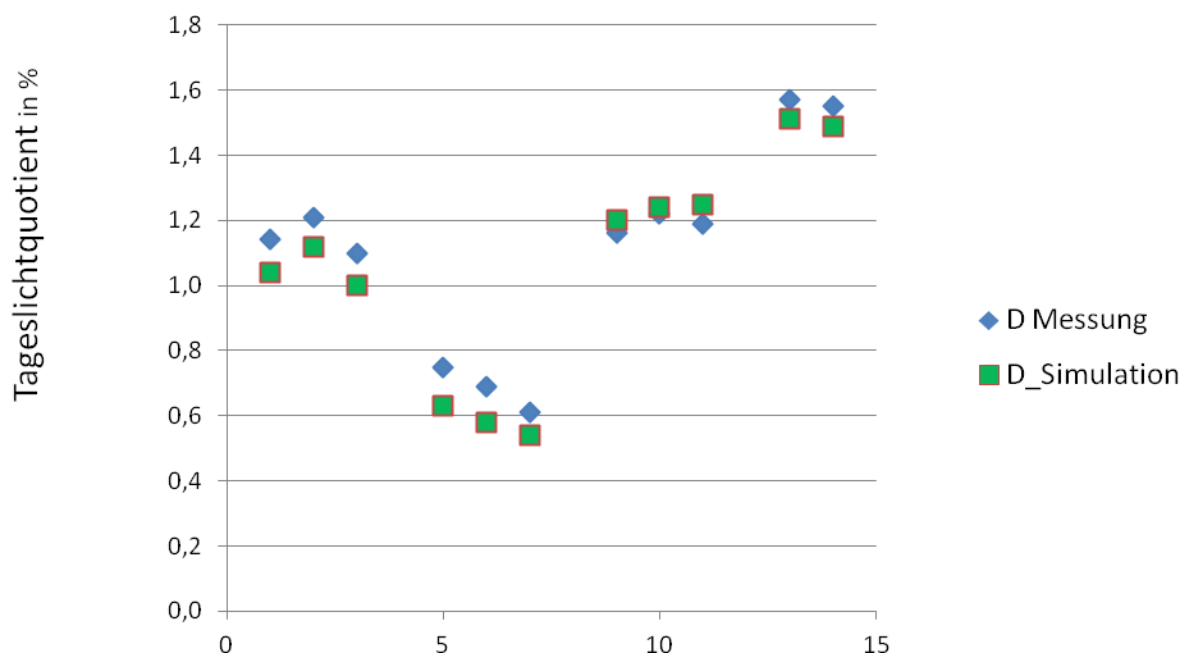


Abbildung 76: Vergleich zwischen den Tageslichtquotienten der Simulationen und der Messungen; 11 Messpunkte in vier Wohnräumen

Auswertung

Es wurden 22 Probanden zum Helligkeitseindruck in ihren eigenen Wohnräumen befragt. Da die meisten Probanden mehrere Wohnräume beurteilen konnten, wurden insgesamt 46 Bewertungen für 21 Räume abgegeben. Von den 22 Probanden sind 10 weiblich und 12 männlich. Abbildung 77 zeigt die Altersstruktur der befragten Personen. 82 % der Befragten gaben an, mit der momentanen Wohnsituation zufrieden oder sehr zufrieden zu sein. In Frage 10 des Fragebogens kreuzten 86 % an, dass ihnen helle Zimmer in der Wohnung wichtig seien.

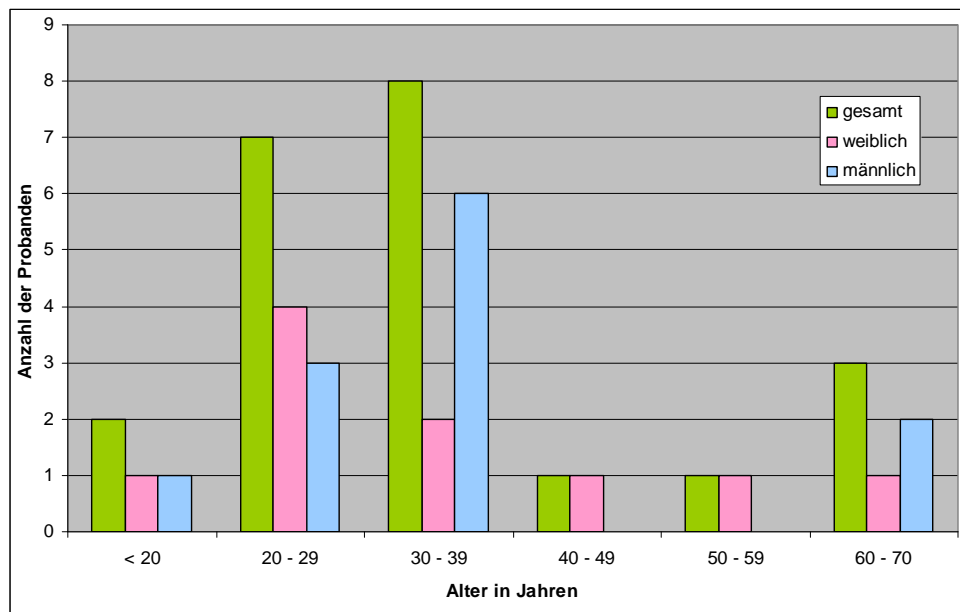


Abbildung 77: Altersstruktur der Probanden

Abbildung 78 veranschaulicht wie sich die Bewertungen auf die Arten der Wohngebäude aufteilen. Dabei wurden 30 Bewertungen in Altbauten, 12 Bewertungen in Neubauten und 4 Bewertungen in Wohnräumen von Einfamilienhäusern abgegeben.

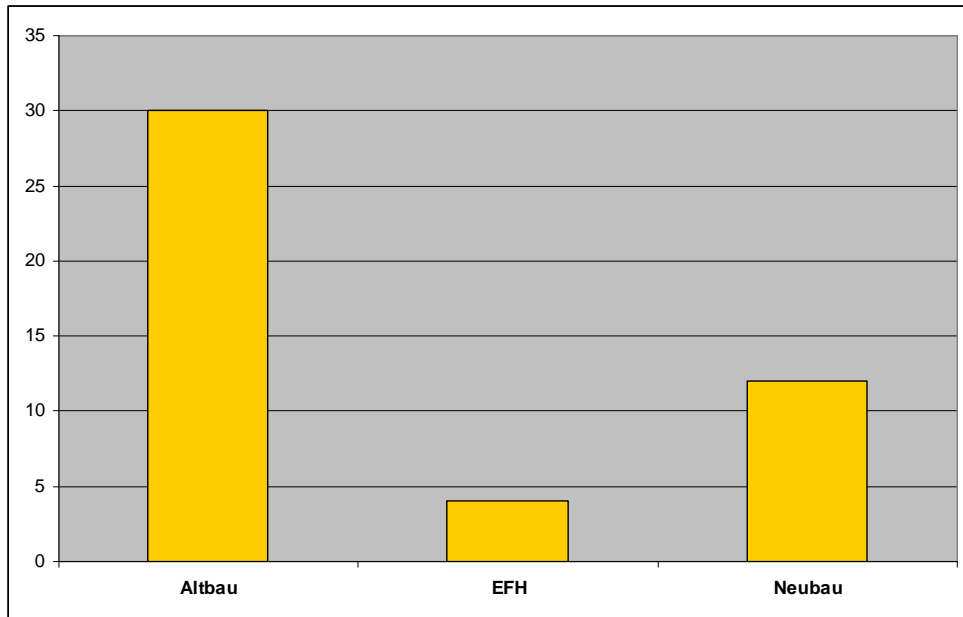


Abbildung 78: Verteilung der Bewertungen auf die unterschiedlichen Arten der Wohngebäude

In Abbildung 79 sind die gemittelten Bewertungen der Probanden über dem aus den zwei Normbezugspunkten gemittelten Tageslichtquotienten $D_{\text{gemittelt}}$ aufgetragen. Es ist zunächst mit steigendem Tageslichtquotienten ein Anstieg der Helligkeitsbewertung durch die Nutzer zu erkennen. Ab etwa $D = 2\%$ wird die Bewertung „genau richtig“ erreicht. Bei höheren Werten des Tageslichtquotienten tritt eine Sättigung auf, selbst viel höhere Werte für D werden nicht als „zu hell“ bewertet.

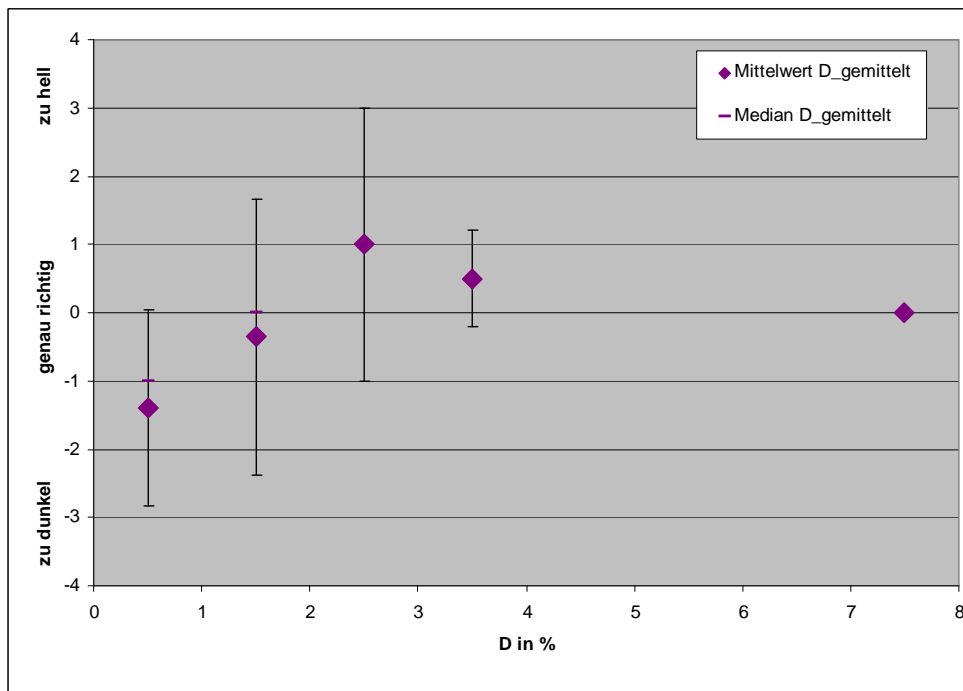


Abbildung 79: Helligkeitsbewertung in Abhängigkeit vom mittleren Tageslichtquotienten; Fehlerbalken +/- 1 SD

Ein ähnlicher Sättigungseffekt ist in Abbildung 80 zu erkennen. Hier ist die Helligkeitsbewertung der Probanden über dem Verhältnis der Rohbaufensterfläche zur Raumfläche aufgetragen. Etwa ab einem Wert von 0,3 wird der Wohnraum als „genau richtig“ hell bewertet, höhere Fensterflächenverhältnisse sorgen nicht für eine hellere Bewertung des Raumes.

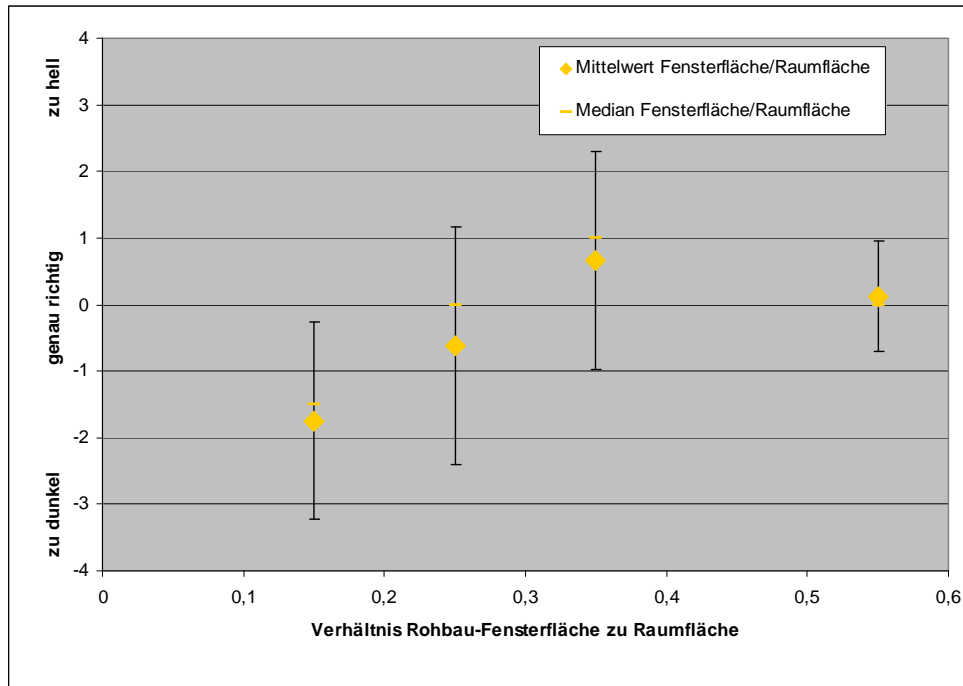


Abbildung 80: Helligkeitsbewertung in Abhängigkeit vom Verhältnis Rohbaufensterfläche zu Raumfläche; Fehlerbalken +/- 1 SD

3 Zusammenfassende Bewertung

Die ausreichende Versorgung von Aufenthaltsräumen mit Tageslicht und angemessene Sichtverbindung nach außen sind essentielle Voraussetzungen sowohl für die Sicherheit, die Gesundheit und das Wohlbefinden als auch für die Leistungsfähigkeit der Menschen. Die im Rahmen dieses Vorhabens aus Messungen, Felduntersuchungen und Nutzerbefragungen gewonnenen Erkenntnisse können zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität in Wohnräumen und zusätzlich zur besseren Gestaltung und zum optimierten Betrieb bezüglich der Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten in Arbeitsstätten bei einer energieeffizienten Beleuchtung beitragen. Die Untersuchungen wurden mit großzügiger Unterstützung durch die Firmen OSRAM AG und SCHÜCO International KG sowie durch den VFL e.V. ermöglicht. Damit stehen Grundlagen zur Bestimmung des Tageslichtbedarfs in Aufenthaltsräumen und zur Erhöhung der visuellen Behaglichkeit durch Tageslichtbeleuchtung in Gebäuden zur Verfügung.

Laboruntersuchungen an Tageslichtbauteilen

Die Laboruntersuchungen an acht verschiedenen Doppelverglasungen und an sieben PC-Platten für Oberlichter basieren auf der Messung des spektralen Transmissionsgrades und lassen eine zuverlässige Bewertung zum Vergleich der Materialien bezüglich gesundheitsspezifischer (a_{cv}), lichttechnischer (τ_{D65}), farbmatischer (T_{CP} , R_a , R_9) und energetischer (g) Größen zu.

Die ermittelten Werte des effektiven circadianen Wirkungsfaktors $a_{cv,eff}$ zeigen, dass sowohl die Verglasungen als auch die untersuchten PC-Platten keine nennenswerte Beeinträchtigung des $a_{cv,eff}$ aufweisen. Allerdings wird die durch die Tageslichtöffnung gesehene melatoninwirksame Strahldichte etwa um den Lichttransmissionsgrad τ_{D65} herabgesetzt. Berücksichtigt man die hohen Leucht- bzw. Strahldichten des Himmels und die Sättigungseffekte der melatoninwirksamen Bestrahlung, ist die Minderung durch Tageslichtbauteile vernachlässigbar.

Alle untersuchten Tageslichtbauteile mit Ausnahme der Verglasung 5 und der PC-Platten 6 und 7 verändern die Lichtfarbe unwesentlich. Bei den erwähnten Ausnahmen wird die ähnlichste Farbtemperatur um 500 - 1000 K herabgesetzt. Die Verglasungen (ausgenommen Sonnenschutzgläser) und die meisten PC-Platten weisen eine sehr gute Farbwiedergabe auf ($R_a > 96$, $R_9 > 80$). Mit den Sonnenschutzverglasungen sowie der PC-Platte 7 mit ähnlichen Eigenschaften werden mit $R_a > 94$ und $R_9 > 67$ gute Farbwiedergabewerte erzielt.

Testraum mit künstlichem Fenster und Probandenversuche

Für die Probandenversuche mit 34 Personen der Altersgruppe 20 bis 39 Jahre wurde ein Testraum mit künstlichem Fenster und Himmel aufgebaut. Dabei ergibt die Auswertung des

d2-R Tests, dass die Beleuchtungsstärke auf dem Arbeitsplatz für diese Altersgruppe auf die mit dem Test gemessene Konzentrationsleistung keinen Einfluss hat. Deutliche Unterschiede sind für die Lichtrichtung in Kombination mit den unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Papiertypen zu sehen. Hier fallen die Werte bei seitlichem Lichteinfall mit semiglänzendem und glänzendem Papier regelmäßig um 4 % höher aus, als bei Direkt-Beleuchtung. Bei Verwendung von mattem nicht spiegelndem Papier sind keine merkbaren Unterschiede festzustellen. Offenbar sorgt die durch die Reflexblendung verringerte Leuchtdichte-kontrastwiedergabe für eine Verschlechterung der Sehbedingungen bei glänzendem Papier und direkter Beleuchtungsart.

Bei den subjektiven Bewertungen der Beleuchtungssituationen durch die Probanden fällt auf, dass die Beleuchtung mit seitlichem Lichteinfall bei gleicher Beleuchtungsstärke auf dem Arbeitsplatz dunkler bewertet wird als die Direkt-Beleuchtung. Dies ist mit den bei Direkt-Beleuchtung durch die Reflexionseigenschaften des Papiers bedingten höheren Leuchtdichten des Sehobjektes zu begründen.

Bezüglich der Papiersorten ist die Einschätzung der Probanden sehr deutlich. Beim mattem Papiertyp fallen die Bewertungen bezüglich der Reflexblendung gleichbleibend niedrig aus, die Reflexionen auf dem semiglänzenden und dem glänzenden Papier werden bei Direkt-Beleuchtung als störend bzw. sehr störend wahrgenommen. Der seitliche Lichteinfall durch den künstlichen Himmel sorgt bei allen Papiertypen für sehr geringe bzw. nicht wahrnehmbare Reflexionen, die dann von den Probanden auch als nicht störend eingestuft werden. Weiterhin wird die Beleuchtung durch den künstlichen Himmel als weniger anstrengend für die Augen eingeschätzt. Die Helligkeit zum Lesen und Schreiben wird bei den Beleuchtungsniveaus von 500 lx und 300 lx ähnlich bewertet. Das 100 lx Helligkeitsniveau wird allgemein als zu dunkel, unangenehm und für die Augen anstrengend bewertet. Ein Proband bemerkte: „Das ist wie Überstunden im Winter, wenn das Licht nicht rechtzeitig eingeschaltet wird.“

Diese Nutzereinschätzungen zeigen deutlich erschwerte Sehbedingungen auf, durch die die mit dem d2-R Test gewonnenen Ergebnisse der Konzentrationsleistung begründet werden können.

Da bei Beleuchtungsplanungen die Oberflächeneigenschaften der Sehaufgabe und des Arbeitsbereiches nicht berücksichtigt werden, ist vom schlechtesten Fall auszugehen. Die Untersuchungen mit glänzenden Papiermaterialien belegen, dass der seitliche Lichteinfall, wie er durch vertikale Tageslichtöffnungen zu realisieren ist, zu deutlich besseren Sehbedingungen führt. Für eine allgemeingültige Quantifizierung sind jedoch zusätzliche Untersuchungen z. B. mit anderen Altersgruppen nötig.

Verwaltungsgebäude

Die Befragung hat gezeigt, dass die meisten Probanden großen Wert auf eine ungehinderte Sichtverbindung nach außen legen. Die Sichtverbindung zu einem Innenhof und zu hohen

gegenüber liegenden Bebauungen wird als „sehr beschränkte Sichtverbindung“ bewertet. Im Gegensatz dazu werden natürliche Verbauungen vor der Fassade, wie z. B. Bäume, nicht als Beschränkung empfunden.

Die Helligkeit des gesamten Raumes wird von den meisten Probanden in der Regel ähnlich bewertet wie die Helligkeit des Arbeitsplatzes. Die Arbeitsplätze mit einem Tageslichtquotient $D > 2 \%$ werden als „besser als ausreichend hell“ bewertet. Arbeitsplätze mit einem geringeren Tageslichtquotienten werden als „nicht mehr ausreichend“ ($1\% < D < 2 \%$) bzw. „zu dunkel“ ($D < 1 \%$) eingeschätzt.

Räume mit großen Fenstern werden allgemein als „gerade richtig hell“ bewertet, unabhängig davon, ob der Tageslichtquotient erheblich höher liegt, als der in DIN 5034 geforderte Wert.

Direkte Blendung durch die durch Fenster gesehene Leuchtdichte des bedeckten Himmels wird als „nicht störend“ wahrgenommen, obwohl dabei zu hohe Himmelsleuchtdichten auftreten können. Diese Bewertung ist auf die positive Wirkung des Tageslichtes in Innenräumen zurückzuführen.

Die Reflexblendung am Bildschirm wird sowohl bei bedecktem Himmelszustand als auch durch das Tageslichtsystem bei Sonnenschein von über 20 % der Befragten als „störend“ bis „unerträglich“ wahrgenommen. Diese Bewertung macht einen Blendschutz auch bei bedecktem Himmelszustand notwendig. Eine weitere wichtige Beeinträchtigung durch Tageslichtjalousiesysteme bei Sonnenschein ist laut den Angaben sowohl die direkte Blendung als auch die Reflexblendung am Bildschirm durch die Lücken zwischen den Lamellen.

Die Felduntersuchungen in dem Verwaltungsgebäude mit modernem Sonnenschutz bei gleichzeitig ermöglichter Sichtverbindung nach außen zeigt, dass noch immer 2/3 der Probanden die Sichtverbindung als nur „leicht beschränkt“ bis „beschränkt“ empfinden. Dabei wird von 90 % der Nutzer keine Direktblendung und auch keine Reflexblendung bemerkt; die restlichen 10 % der Nutzer bewerten die Blendung zum größten Teil als gering. Lediglich die elektronische Kontrolle von Kunst- und Tageslichtbeleuchtung kann zur Unzufriedenheit der Mitarbeiter führen.

Industriehallen mit Oberlichtern

Die untersuchten Industriehallen mit Oberlichtern zeichnen sich durch einen mittleren Tageslichtquotienten von 4 % bis 7 % in der Nutzebene aus. Trotz des mittleren Tageslichtquotienten von 4,4 % wird die gesamte Halle A nicht als zu hell bewertet, es ergibt sich vielmehr eine grenzwertige Einschätzung durch die Nutzer („etwas zu dunkel“). Dies bestätigt den in DIN 5034 geforderten Mindestwert von 4 % für den mittleren Tageslichtquotient.

Die Nutzerbefragung in dieser Halle ergab, dass die Tageslichtbeleuchtung des Arbeitsplatzes dunkler empfunden wird, als die der gesamten Industriehalle. Dies ist auf die in

dieser Halle besonders starke Verschattung der Arbeitsflächen durch die sich vor Ort befindlichen Arbeitsobjekte zurückzuführen, sodass oft die künstliche Beleuchtung zugeschaltet wird. In den untersuchten Hallen waren keine elektronischen Kontrollsysteme für die Beleuchtung installiert mit dem Ergebnis, dass die künstliche Beleuchtung ganztägig eingeschaltet blieb.

Einkaufsarkaden

Bei den Arkaden-Besuchern liegt für den Großteil der Befragten ein deutlicher Wert auf eine angenehme Gesamtatmosphäre beim Einkaufen. Auch die Tageslichtbeleuchtung wurde mehrheitlich als sehr positiv bewertet.

Ab bestimmten Grenzwerten scheint ein großer Tageslichtanteil jedoch störende Wirkung zu zeigen. In den Objekten mit einem maximalen Tageslichtquotienten im OG von $D_{\max} > 15\%$ empfanden 10 % - 20 % der Probanden die Tageslichtbeleuchtung als „hell“ bzw. „zu hell“. In den Objekten mit einem maximalen Tageslichtquotient von $D_{\max} > 20\%$ wurde das Tageslicht sogar von 20 % - 30 % der Besucher als „blendend“ bzw. „stark blendend“ empfunden. Daher ist ein Wert des Tageslichtquotienten von $D_{\max} = 15\%$ im OG als Grenzwert anzusehen.

In den Arkaden mit einem maximalen Tageslichtquotient des EGs von $D_{\max} < 8\%$ wurde die Tageslichtbeleuchtung von ca. 10 % der Besucher als „dunkel“ bzw. „zu dunkel“ empfunden. Höhere Werte des Tageslichtquotienten von $D_{\max} < 15\%$ wurden auch in diesem Bereich von den Besuchern nicht als störend empfunden. Daher sollte der Erfahrungswert von $D_{\max} = 8\%$ zukünftig eher als Mindestwert für die Planung angesehen werden.

Die Tageslichtbeleuchtung sollte also im Bezug auf die visuelle Behaglichkeit so geplant werden, dass der maximale Wert des Tageslichtquotienten im Mallbereich einen Wert von $D_{\max} = 8\%$ nicht unterschreitet und im Obergeschoss einen Wert von $D_{\max} = 15\%$ nicht überschreitet. Mit diesen Werten des Tageslichtquotienten wird gleichzeitig die Strahlungs- und Wärmebelastung entsprechender Objekte weitgehend herabgesetzt.

Wohngebäude

Die Nutzerbefragungen in privaten Wohnräumen ergaben, dass der in DIN 5034 als Mindestwert für eine ausreichende Helligkeit angegebene arithmetische Mittelwert des Tageslichtquotienten aus den beiden Normbezugspunkten von 0,9 % nicht für eine Bewertung einer für den Nutzer positiv empfundenen Tageslichtversorgung geeignet ist. Der Mindestwert von 0,9 % ist als Grenzwert zu deuten und kann als solcher weiterhin gelten, jedoch werden Räume mit derart niedrigen Werten als etwas zu dunkel empfunden.

Es zeigt sich, dass ab einem Mittelwert des Tageslichtquotienten von etwa $D = 2\%$ die Bewertung „genau richtig“ erreicht wird. Höhere Werte führen im Mittel nicht zu einer Bewertung als „zu hell“, hier ist vielmehr ein Sättigungseffekt zu erkennen. Selbst Wohnräume mit

viel höheren Werten für D werden nicht als „zu hell“ bewertet. Wird das Verhältnis der Rohbaufensterfläche zur Raumgrundfläche betrachtet, ergibt sich ab einem Wert von 0,3 die Tageslichtbewertung „genau richtig“.

Schlussbemerkung

Tageslichtversorgung von Innenräumen nimmt unter energetischen, lichttechnischen und arbeitspsychologischen Aspekten einen hohen Stellenwert ein. Das Forschungsprojekt liefert Grundlagen der Tageslichtnutzung sowohl für Normen als auch für die Anwendung bei Beleuchtungs- und Gebäudeplanungen. Es hat sich gezeigt, dass dennoch technische Lösungen für Tageslichtsysteme und elektronische Kontrollsysteme unter besonderer Berücksichtigung der gesundheitlichen und energetischen Bewertung entwickelt und optimiert werden müssen.

Berlin, 25. März 2013

Prof. Dr.-Ing. S. Völker

Prof. Dr. rer. nat. H. Kaase