

Tageslichtsysteme im Spiegel der Nutzer

*Zur Nutzerakzeptanz von Sonnenschutz- und
Lichtlenksystemen in Büroräumen*



Heide G. Schuster

Tageslichtsysteme im Spiegel der Nutzer

***Zur Nutzerakzeptanz von Sonnenschutz- und
Lichtlenksystemen in Büroräumen***

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs,
angenommen an der Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund

Vorgelegt von: Heide G. Schuster, Dortmund im März 2006

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 2006

Prüfungskommission:

Vorsitz: Herr Professor Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf

1. Gutachter: Herr Professor Dr.-Ing. Helmut F.O. Müller

2. Gutachter: Herr Professor Dr.-Ing. Dietrich Gall

Dank

Diese Arbeit ist in einem komplexen Umfeld von laufenden Forschungsprojekten und dem Anspruch an die Lehre am Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur der Universität Dortmund entstanden. Nicht immer war es einfach, die Zeit für das Vorantreiben der eigenen Arbeit zu finden. Ohne eine Vielzahl von Kollegen und fachlichen Beratern, aber auch die Unterstützung aus dem privaten Umfeld, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Deshalb möchte ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Müller, der mir in der Zeit am Lehrstuhl viele Möglichkeiten interessanter Projekte eröffnet hat.

Allen Partnern und Beteiligten aus dem Verbundprojekt „Licht in Büroräumen“, welches die Grundlage für diese Arbeit bildete, insbesondere Frau Sabine Jellinghaus, die nicht nur Kollegin im Verbundprojekt war sondern im Laufe der Zeit auch Freundin geworden ist.

Der Technischen Universität Ilmenau, insbesondere Herrn Professor Dietrich Gall und Frau Dr. Connie Vandahl, für die angenehme und fruchtbare Zusammenarbeit und die vielen Anregungen, sowohl im Forschungsprojekt als auch für meine Dissertation.

Den Studenten am Lehrstuhl, die als „Hiwis“ insbesondere in der Messtechnik und Organisation mitgearbeitet haben. Britta Alker hat meist die Nutzerbefragungen organisiert und mutierte aufgrund des ständig wechselnden Wetters ein wenig zum „Wetterfrosch“. Die Aufstellung von Korrelationen zwischen angesetzten Befragungsrunden und der Häufigkeit plötzlich auftretender Bewölkung wurde in dieser Zeit wohl zum Hobby; trotz gegensätzlicher Wettervorhersagen sämtlicher verfügbarer Online- Dienste versteht sich.

Dem Hochschulrechenzentrum der Universität Dortmund für die gute Beratung bei der Programmierung der Datenbank und der Auswertungen.

Meinen Kollegen für ihre Geduld während der Durchführung der Befragungen am Lehrstuhl. Ich weiß, es war nicht immer angenehm, am Nachmittag zwischen Messfühlern, Kameras und wechselnden Probanden arbeiten zu müssen. Man fühlte sich selbst ein bisschen wie ein Luxsensor.

Natürlich meinen „Korrekturlesern“ Herrn Professor Schäfer, Herrn Dr. Schmitz und Frau Jellinghaus einen besonderen Dank für ihren Einsatz.

Nicht zuletzt meiner Familie und meinen Freunden, die mich in der ganzen Zeit aktiv unterstützt und großes Verständnis aufgebracht haben, wenn ich einmal wieder keine Zeit hatte. Insbesondere meinen Eltern, die mir immer wieder Mut gemacht haben und meinem Freund, der mit einer Engelsgeduld die letzte Phase der Arbeit mitgemacht hat und mir eine sehr große Hilfe war.

Allen, die ich hier aus Platzgründen nicht einzeln nennen konnte.

Heide Schuster, März 2006

Vorwort

Die Evolution auf der Erde geschah unter Einfluss des Sonnenlichtes. So ist der Mensch in seinen visuellen und körperlichen Funktionen auf Tageslicht angewiesen, um dem Körper einen ungehinderten Funktionsablauf zu ermöglichen. Heutzutage jedoch verbringen wir einen Großteil des Tages in geschlossenen Räumen. Die Arbeitswissenschaft beschäftigt sich seit langem mit der Gesundheit am Arbeitsplatz. So waren in früheren Arbeitsstättenrichtlinien der Bezug zum Außenraum und damit letztlich auch eine Tageslichtversorgung gesetzlich verankert. In Büroräumen jedoch herrschen oft andere Bedingungen. Der Einfluss von Tageslicht in Großraumbüros ist kaum vorhanden, die Bedingungen unter Kunstlicht führen häufig zu Müdigkeit und Leistungsabfall, der eingesetzte Sonnenschutz führt zu vermehrtem Einsatz von Kunstlicht und zur Verringerung der Aussicht.

In den letzten Jahren sind vermehrt Tageslichtsysteme entstanden, die zumindest zum Teil die natürlichen Ressourcen nutzen und so den Raum mit natürlichem Licht versorgen. Dennoch bleibt der Widerspruch zwischen dem Ausblick nach draußen, einer Grundbedingung für die Nutzerzufriedenheit, und der Notwendigkeit nach Sonnenschutz gegen Blendung und Überhitzung im Innenraum. Zahlreiche Untersuchungen wurden zum Thema Kunstlicht am Arbeitsplatz durchgeführt, nur wenige unter Tageslichtbedingungen und keine, die unterschiedliche Systeme im Vergleich hinsichtlich der Akzeptanz bei aktivem, also geschlossenem Sonnenschutz betrachten.

Diese Arbeit hat deshalb zum Ziel, die Lücke zwischen den in den Regelwerken genannten Rahmenbedingungen und der gewünschten Lichtumgebung der Nutzer zu schließen. Dabei wird die Komplexität der Wahrnehmung genutzt, um Aufschluss über die Einsetzbarkeit moderner Fassadensysteme für die Planungspraxis zu bekommen. Die Zielgruppe besteht dabei nicht etwa aus nur einer Disziplin, sondern vielmehr aus allen an der Planung eines Bürogebäudes beteiligten Planern. Neben den Architekten sind insbesondere auch Ingenieure und Lichtplaner angesprochen, die sich meist für Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit verantwortlich zeichnen. Aber auch für Bauherren und Investoren, die dem Anspruch an die Kosteneffizienz von Immobilien gerecht werden müssen, werden hinsichtlich der Produktivität und Zufriedenheit von Mitarbeitern und damit auch der Wirtschaftlichkeit einige Anregungen zu finden sein.

Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Licht in Büroräumen“ am Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur der Universität Dortmund in Zusammenarbeit mit dem Solar-Institut Jülich konnten beginnend im Jahr 2001 die notwendigen Bedingungen für lichttechnische Messungen an insgesamt neun unterschiedlichen Tageslichtsystemen geschaffen werden. Die Befragungen für diese Dissertation wurden innerhalb des Projektes am Standort Dortmund an sechs Systemen durchgeführt. Über das Projekt hinausgehend bildet die hier vorgelegte Arbeit die Schnittstelle zwischen der rein lichttechnischen Erfassung von Messdaten, der Wahrnehmung der Nutzer und der resultierenden architektonischen Qualität.

Um dem Anspruch an eine interdisziplinäre Lesergruppe zu erfüllen, wird daher im Einführungsteil grundlegendes über Licht, dessen Wechselwirkung mit dem gebauten Umfeld und dessen Auswirkungen auf den Menschen erläutert. Darüber hinaus werden geltende Regelwerke und die Anforderungen und Bewertungsmaßstäbe an die Beleuchtung in Büroräumen dargestellt. In einem zweiten Teil wird die vorhandene Literatur hinsichtlich der Nutzerakzeptanz unterschiedlicher Lichtumgebungen analysiert. Die Definition der Aufgabe findet sich in Teil 3. Im Anschluss daran folgt ein praktischer Teil mit der Beschreibung des Versuchsaufbaus, den Ergebnissen aus Messungen und Befragungen sowie übergreifenden Analysen, die gemessene Werte mit subjektiven Bewertungen verknüpfen. Dazu wird eine neue, auf komplexe Tageslichtsysteme anwendbare Bewertungsmatrix für den Einsatz in der Praxis erarbeitet. Die Diskussion der Ergebnisse sowie eine Zusammenfassung runden die Arbeit ab.

Heide Schuster, März 2006

Inhalt

1	Einführung	13	2	Zur Nutzerakzeptanz – Auswertung einer Literaturrecherche	36
1.1	Physikalische, lichttechnische und bauphysikalische Größen	13	2.1	Hintergrund	36
1.1.1	Physikalische Grundgrößen	13	2.2	Aktueller Stand von Untersuchungen	37
1.1.2	Lichttechnische Grundgrößen	13	2.2.1	Raumklima – Einflüsse auf das Wohlbefinden	37
1.1.3	Licht und Farben	14	2.2.2	Steuerung von Sonnenschutz- und Kunstlichtanlagen	38
1.1.4	Bauphysikalische Kenngrößen	15	2.2.3	Fassadensysteme und Nutzerakzeptanz	38
1.2	(Tages-) licht	16	2.2.4	Bewertung des Beleuchtungsniveaus	39
1.2.1	Licht und Materie	16	2.2.5	Blendung durch Tageslicht	41
1.2.2	Die Dynamik des Lichts	16	2.2.6	Ausblick und Tageslicht	42
1.2.3	Tageslicht global betrachtet	16	2.2.7	Produktivität	44
1.3	Tageslicht und Mensch	17	2.2.8	Raum- und Lichtwirkung	44
1.3.1	Das visuelle System des Menschen	17	2.2.9	Auswirkungen auf die Gesundheit	46
1.3.2	Sehaufgabe und Sehleistung	18	2.2.10	Lichtfarbe / Lichtspektrum	48
1.3.3	Wahrnehmungsmodelle	19			
1.3.4	Psychologische und emotionale Wirkung von Licht	19	3	Aufgabe und Ziel dieser Arbeit	50
1.3.5	Lichtfarben und ihre Wirkung	20	3.1	Problemstellung	50
1.3.6	Physiologische und psychologische Blendung	20	3.2	Definition der Aufgabe	51
1.3.7	Tageslicht und Kunstlicht	21	3.2.1	Kriterien und Defizite	51
1.3.8	Entwicklung der Lichtforschung	21	3.2.2	Thesen und Fragestellungen	52
1.3.9	Licht und Gesundheit	22	3.2.3	Lösungsansätze und Methode	53
1.4	Tageslicht und Architektur	22	4	Versuchsplanung	55
1.4.1	Planen mit Tageslicht: Früher und heute	22	4.1	Testanlage	55
1.4.2	Gestalten mit Licht	23	4.1.1	Standort und Räumlichkeiten	55
1.4.3	Entwurfparameter: Dem Licht Raum geben	24	4.1.2	Beschreibung der Systeme	56
1.4.4	Energieeffizient	27	4.2	Messprogramm	59
1.4.5	Wirtschaftlichkeit	27	4.2.1	Messpositionen und Rahmenbedingungen	59
1.4.6	Planungsablauf	28	4.2.2	Leuchtdichtemessungen	60
1.5	Rahmenbedingungen - Anforderungen an Büroarbeitsplätze	28	4.2.3	Spektrale Messungen	61
1.5.1	Bürraum im Wandel der Zeit	28	4.3	Nutzerakzeptanzuntersuchungen	62
1.5.2	Anforderungen an die Beleuchtung von Arbeitsplätzen	29	4.3.1	Statistische Versuchsplanung	62
1.5.3	Überblick über geltende Regelwerke	30	4.3.2	Auswahl der Probanden	62
1.5.4	Bewertungsgrößen und Berechnungsverfahren für Tageslicht	31	4.3.3	Entwicklung der Fragebögen	62
			4.3.4	Ablauf der Befragungen	63

4.4 Auswertungsmethode	64	6 Feldversuche - übergreifende Analyse	111
4.4.1 Struktur der Auswertung	64	6.1 Ziel	111
4.4.2 Statistische Methoden	65	6.2 Faktorenanalyse	111
4.4.3 Ergebnisanalyse	66	6.2.1 Vorgehensweise	111
5 Feldversuche – Messungen und Befragungen	68	6.2.2 Arbeitsplatz	112
5.1 Ergebnisse - Allgemeine Parameter	68	6.2.3 Innenraumtemperatur	114
5.1.1 Personendaten	68	6.2.4 Ausblick	117
5.1.2 Zeitliche Verteilung der Befragungen	68	6.2.5 Blendung	121
5.1.3 Wetterbedingungen und Systemzustand	69	6.2.6 Funktion	126
5.2 Ergebnisse Messwerte	69	6.2.7 Raumhelligkeit	128
5.2.1 Beleuchtungsstärken außen	69	6.2.8 Lichtlenkung	133
5.2.2 Beleuchtungsstärken im Innenraum	69	6.2.9 Farb- und Raumwirkung	134
5.2.3 Leuchtdichten im Innenraum	72	6.3 Schwellwertanalyse	138
5.2.4 Spektrale Messungen	74	6.3.1 Vorgehensweise	138
5.2.5 Raumtemperatur	77	6.3.2 Arbeitsplatz	138
5.3 Beurteilungen der Probanden	78	6.3.3 Temperatur	138
5.3.1 Vorgehensweise	78	6.3.4 Ausblick	139
5.3.2 Arbeitsplatz	78	6.3.5 Blendung	139
5.3.3 Innenraumtemperatur	80	6.3.6 Funktion	140
5.3.4 Ausblick	82	6.3.7 Raumhelligkeit	140
5.3.5 Blendung	85	6.3.8 Farb- und Raumwirkung	142
5.3.6 Funktion	88	7 Entwicklung und Anwendung eines Bewertungsverfahrens	144
5.3.7 Raumhelligkeit	94	7.1 Hintergrund	144
5.3.8 Lichtlenkung	97	7.2 Entwicklung des Verfahrens	144
5.3.9 Farb- und Raumwirkung	98	7.2.1 Vorgehensweise	144
5.3.10 Privatheit	102	7.2.2 Anwendung auf Ergebnisse der Befragungen	146
5.3.11 Gesamtbeurteilung	104	7.2.3 Anwendung auf Ergebnisse der Messungen	148
5.4 Interkategorieelle Abhängigkeiten	104	7.3 Eine Signatur für komplexe Tageslichtsysteme	150
5.4.1 Ziel	104	8 Diskussion	152
5.4.2 Arbeitsplatz im Bezug zum Ausblick	105	8.1 Ergebnisse Messungen	152
5.4.3 Arbeitsplatz im Bezug zur Raumtemperatur	106	8.1.1 Beleuchtungsstärkemessungen	152
5.4.4 Arbeitsplatz im Bezug zur Helligkeit	106	8.1.2 Leuchtdichtemessungen	153
5.4.5 Aussicht im Bezug zur Helligkeit	106	8.1.3 Farbmessungen	153
5.4.6 Aussicht im Bezug zur Lichtlenkung	107	8.2 Ergebnisse Nutzerbefragungen	154
5.4.7 Eingriffsmöglichkeit im Bezug zur Blendung	108	8.2.1 Arbeitsplatz	154
5.4.8 Schutzfunktion im Bezug zur Blendung	108	8.2.2 Temperatur	155
5.4.9 Persönliche Einstellungen im Bezug zur Aussicht	108	8.2.3 Ausblick	156
5.4.10 Persönliche Einstellungen im Bezug zur Helligkeit	109		
5.4.11 Lichtlenkung im Bezug zur Raumwirkung	110		

8.2.4	Blendung	158
8.2.5	Funktion	159
8.2.6	Raumhelligkeit	161
8.2.7	Lichtlenkung	163
8.2.8	Farb- und Raumwirkung	163
8.2.9	Privatheit	164
8.2.10	Gesamtnoten	164
8.3	Überprüfung der in Kapitel 3 aufgestellten Thesen	165
8.4	Bewertungsmatrix	169
9	Zusammenfassung	171
9.1	Aufgabe und Ziel	171
9.2	Methode	171
9.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	172
9.4	Anwendbarkeit für die Praxis	174
10	Schlussfolgerungen und Ausblick	175
11	English summary	177
11.1	Task and aim of the study	177
11.2	Methodology	177
11.3	Summary of results	178
11.4	Usability within the planning reality	180
11.5	Conclusions	180
12	Anhang	182
12.1	Literaturverzeichnis	182
12.2	Abbildungsverzeichnis	190
12.3	Verzeichnis der Tabellen	194
12.4	Projektdokumentation	196
12.4.1	Technische Daten der Systeme	196
12.4.2	Messprogramm und –aufbau	198
12.4.3	Messtechnik	199
12.4.4	Musterfragebogen	200
12.5	Ergebnisse	207
12.6	Lebenslauf	207

1 Einführung

1.1 Physikalische, lichttechnische und bauphysikalische Größen

1.1.1 Physikalische Grundgrößen

Grundsätzlich wird derjenige Teil der elektromagnetischen Strahlung (100 nm - 1 nm) als Licht bezeichnet, der für das menschliche Auge sichtbar ist. Er spiegelt jedoch nur den sehr kleinen Teil der Gesamtstrahlung im Bereich von 380-780 nm wieder. Im kurzwelligeren Bereich schließt sich die energiereiche Strahlung an, im langwelligeren Bereich die Wärmestrahlung. Abbildung 1.1-1 zeigt die Gesamtstrahlung auf der Erdoberfläche mit dem Anteil der sichtbaren Strahlung. Die Verteilung der Strahlung auf die einzelnen Wellenlängenbereiche wird als Spektrum bezeichnet. Das Maximum der Sonnenstrahlung liegt im blauen Spektralbereich (436 – 495 nm).

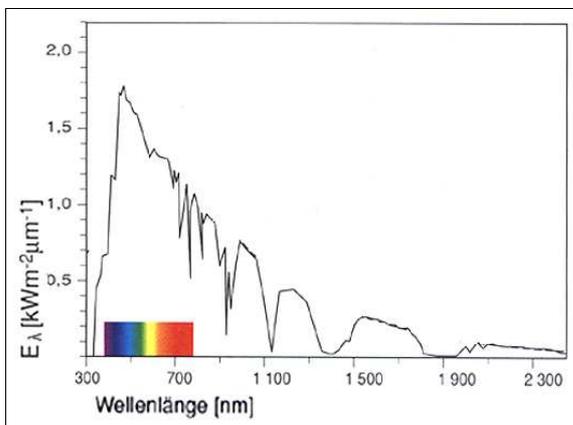


Abbildung 1.1-1: Elektromagnetische Strahlung auf der Erdoberfläche mit dem sichtbaren Anteil [LAN]

Die Strahlungsleistung ist definiert als der Strahlungsfluss, der pro Zeiteinheit von elektromagnetischen Wellen transportiert wird. Sie wird in Watt angegeben. Die direkte Einstrahlung (senkrecht zur Sonne gemessen) trifft im Jahresmittel in Deutschland mit einer Wahrscheinlichkeit von 37% auf eine Südfassade auf. Für Ost- und Westfassaden halbiert sich der Wert in etwa. Allerdings trifft die direkte Strahlung an Ost- und Westfassaden im Sommer aufgrund der Sonnenstände mit höherer Intensität auf. Diffuse Einstrahlung ist die durch die Atmosphäre gestreute Einstrahlung. In Zahlen gefasst (Normwerte nach [VDI 6011]) gelten für einen bedeckten Himmel mit hohem Sonnenstand Bestrahlungsstärken von 170 W/qm und für einen klaren Himmel bei hohem Sonnenstand 600-1000 W/qm.

1.1.2 Lichttechnische Grundgrößen

Der Lichtstrom [Φ] wird beschrieben als die von einem Strahler in den Raum abgegebene Strahlungsleistung bezogen auf die spektrale Hellempfindlichkeit des Auges $V(\lambda)$ (Kapitel 1.3.1). Er wird angegeben in Lumen [lm] und ist die photometrische Entsprechung zur Strahlungsleistung. Typische Werte für die Lichtausbeute sind 115 lm/W für bedeckten Himmel, 125,4 lm/W für klaren Himmel und 60-90 lm/W für die direkte Sonne.

Die Leuchtdichte beschreibt den Helligkeitseindruck von Flächen [cd/m^2]. Sie wird als Lichtstärke pro Flächeneinheit definiert, wobei die Lichtstärke wiederum definiert ist als Lichtstrom eines Strahlers in einem begrenzten Raumwinkel, der zur Charakterisierung der Abstrahlung von Leuchten verwendet wird. Für die Leuchtdichte gilt die tatsächlich gesehene Fläche, das heißt im Falle geneigter Flächen wird die Winkelfunktion mit berücksichtigt. In anderen Worten, die Leuchtdichte beschreibt den Helligkeitseindruck einer Fläche, also das „Licht“, welches von

einer Fläche ins menschliche Auge trifft, oder aber eine selbst leuchtende Lichtquelle. Sie ist abhängig von den Eigenschaften der betrachteten Flächen. Die Bewertung der Leuchtdichte durch den Menschen ist abhängig von den umgebenden Leuchtdichten, da der Mensch nur Leuchtdichtereaktionen, nicht jedoch absolute Werte, wahrnehmen kann [LAN]. Typische Leuchtdichten werden in Tabelle 1.1-1 zusammengefasst.

Tabelle 1.1-1: Typische Leuchtdichten nach VDI 6011

Typische Leuchtdichten nach VDI 6011	
Bedeckter Himmel	1 000 - 6 000 cd/m ²
Klarer Himmel	2 000- 12 000 cd/m ²
Besonnte Wolke	10 000 cd/m ²
Sonne	1 600 000 cd/m ²
Mattierte Glühlampe	100 000 cd/m ²

Die Beleuchtungsstärke E ist der flächenbezogene Lichtstrom. Sie hat die Einheit Lux [lx]. Im Gegensatz zur Leuchtdichte kann man die Beleuchtungsstärke nicht sehen. Typische Beleuchtungsstärken, wie sie in unserer Umwelt auftreten, gemessen in horizontale Beleuchtungsstärken im Freien werden Tabelle 1.1-2 in zusammengefasst.

Tabelle 1.1-2: Typische Beleuchtungsstärken nach VDI 6011

Typische Beleuchtungsstärken nach VDI 6011	
Bedeckter Himmel	3 000 Lux
Sonniger Sommertag	60 000 - 100 000 Lux
Trüber Sommertag	20 000 Lux
Trüber Wintertag	3 000 Lux
Vollmondnacht	0,25 Lux

1.1.3 Licht und Farben

Materialfarben kommen dadurch zustande, dass sie aus dem vorhandenen Beleuchtungslicht verschiedene spektrale Teile absorbieren und wiederum andere reflektieren. Der reflektierte Anteil fällt in das menschliche Auge, wird von den Rezeptoren erfasst und resultiert in einem Farbeindruck. Das Aussehen dieser Körperfarben ist abhängig von der spektralen Zusammensetzung des vorhandenen Beleuchtungslichtes (z.B. Tageslicht und Kunstlichtquelle, Kapitel 1.3.7) [KÜP]. Der Helligkeitseindruck ist mit dem Farbempfinden eng verbunden und hat einen großen Einfluss auf die Befindlichkeit und Leistungsfähigkeit des Menschen (Kapitel 1.3.5).

Unter der spektralen Verteilung versteht man daher die Anteile des Spektrums, die im Licht enthalten sind, also die auf ein Wellenlängenintervall bezogene Strahldichte (Dichte der Strahlungsleistung bezogen auf die Fläche und den Raumwinkel).

Die Farbe einer Lichtquelle kann durch einen Vergleich mit der Farbe des „Schwarzen Strahlers“ oder „Planck'schen Strahlers“, einer idealisierten Modellvorstellung eines Körpers, der alle auftreffende Strahlung absorbiert, bestimmt werden. Dieser sendet in Abhängigkeit seiner Erhitzungstemperatur Licht verschiedener spektraler Zusammensetzungen aus, wodurch Farben mit der Farbtemperatur beschrieben werden können. Die Angabe erfolgt in Kelvin [K]. Beispiele für die ähnlichste Farbtemperatur werden in Tabelle 1.1-3 für Tageslicht und Kunstlicht dargestellt [LAN].

Tabelle 1.1-3: Typische Farbtemperaturen nach [LAN]

Farbtemperaturen	
Bedeckter Himmel	4000 Kelvin
Klarer Himmel	10 000 Kelvin
Direkte Sonne	4 000 - 6 000 Kelvin
Kunstlicht warmweiß	< 3300 Kelvin
Kunstlicht neutralweiß	3300 - 5000 Kelvin
Kunstlicht tageslichtweiß	> 5000 Kelvin

Mit der ähnlichsten Farbtemperatur bezeichnet man praktische Lichtarten, bei denen der empfindungsgemäße Farbunterschied zwischen der zu kennzeichnenden Farbart und dem zugehörigen Punkt auf dem Planck'schen Farbzug minimal ist. Die Farbtemperatur lässt sich auch in Mired (englische Abkürzung für Micro Reciprocal Degrees, $1\,000\,000/\text{Farbtemperatur in Kelvin} = 1\text{ Mired}$) angeben.

Die Farbwiedergabe bezeichnet die Auswirkungen der Strahlung einer Lichtquelle auf den Farbeindruck von Objekten. Dieser kann je nach Lichtquelle einen unterschiedlichen Farbeindruck auf der gleichen zu beurteilenden Fläche erzeugen.

1.1.4 Bauphysikalische Kenngrößen

Der Lichttransmissionsgrad gibt an, welcher Anteil des einfallenden Lichtstroms durch eine Verglasung durchtritt, der Lichtreflexionsgrad beschreibt den Teil des einfallenden Lichtstroms, der reflektiert wird und der Lichtabsorptionsgrad gibt an, welcher Teil des einfallenden Lichtstroms absorbiert und in Wärme umgewandelt wird [VDI 6011]. Zusätzlich wird der Gesamtenergiedurchlassgrad g [-] für Verglasungen verwendet. Er setzt sich aus der Wärmekonvektion und dem Strahlungstransmissionsgrad für Globalstrahlung zusammen (Abbildung 1.1-2).

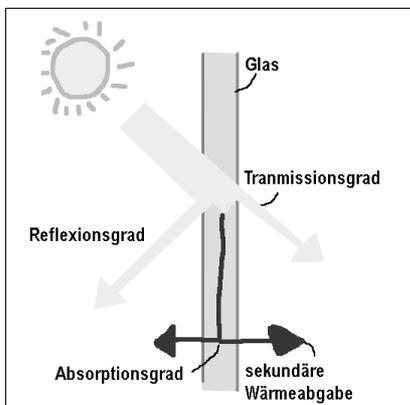


Abbildung 1.1-2: Gesamtenergiedurchlassgrad

Übliche Werte für den g -Wert sind 0,1-0,3 für einen außen liegenden Sonnenschutz, 0,2-0,6 für einen im Scheibenzwischenraum liegenden Sonnenschutz und 0,3-0,6 für einen innen liegenden Sonnenschutz. Ein Sonnenschutzglas erreicht etwa 0,3-0,65. Idealerweise ist der g -Wert im Sommer so gering wie möglich, im Winter dagegen höher, um die Raumerwärmung zur Nutzung solarer Energiegewinnung zu ermöglichen. Der Abminderungsfaktor F_c beschreibt die Wirksamkeit des Sonnenschutzes gegen Sonneneinstrahlung und ist Grundlage für die Berechnung des g -Wertes. Er liegt für einen konventionellen außenliegenden Sonnenschutz bei 0,18.

1.2 (Tages-) licht

1.2.1 Licht und Materie

Die Definitionen für Licht und die entsprechenden Bewertungsgrößen wurden in Kapitel 1.1.1 bereits beschrieben. Die Farben des Lichtes spiegeln den sichtbaren elektromagnetischen Bereich der Strahlung wider. Licht wird jedoch vom Menschen hauptsächlich durch die Reflexion an Objekten oder Raumboflächen wahrgenommen. Je nach Beschaffenheit und Farbe der Oberflächen wird die eintreffende Strahlung diffus oder gerichtet zurückreflektiert. Abbildung 1.2-1 zeigt unterschiedliche Reflexionseigenschaften von Oberflächen auf.

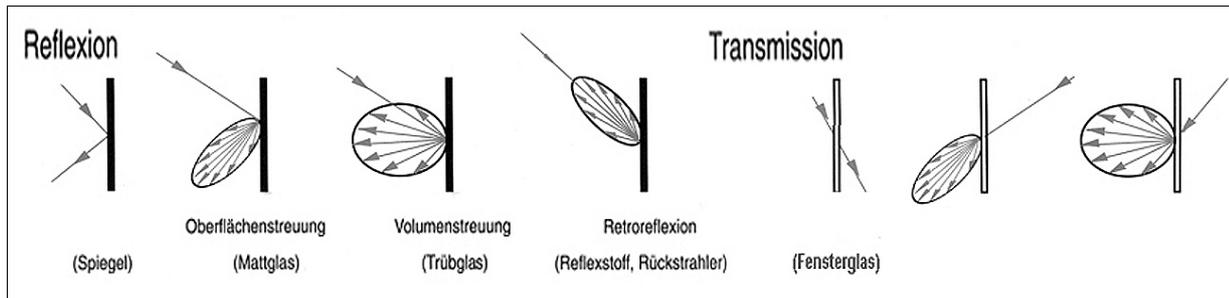


Abbildung 1.2-1: Reflexionseigenschaften nach [LAN]

Auf diese Art und Weise bekommen wir auch Informationen über die Farbe und den Härtegrad eines Objektes.

1.2.2 Die Dynamik des Lichts

Licht kann in seiner natürlichen Umgebung sehr unterschiedliche Facetten aufweisen, z.B. bei unterschiedlichen Wetterbedingungen. Das diffuse Licht des bedeckten Himmels gegenüber dem des Sonnenlichtes oder aber der teilweise bedeckten Himmelszustände tragen zur Dynamik, also der ständigen Veränderung der Lichtverhältnisse im Bezug auf Helligkeit, Farbe und Lichtrichtung, bei (Abbildung 1.2-2).



Abbildung 1.2-2: Himmelszustände: Bedeckter Himmel, klarer Himmel, teilweise bewölkter Himmel

Selbst die weitgehend richtungslose diffuse Strahlung des bedeckten Himmels stellt sich in der Realität nicht wirklich gleichmäßig über den Himmelsraum verteilt dar, sondern variiert mit dem Höhenwinkel und der Orientierung. So weist der steilste Höhenwinkel auch immer die höchste Leuchtdichte auf [DIN 5034]. Die Lichtfarbe ändert sich ebenfalls mit der Sonnenhöhe, den Schattenlängen oder der Intensität der Strahlung. Die spektralen Anteile des Sonnenlichtes werden, je nach Sonnenstand unterschiedlich von der Atmosphäre reflektiert und gestreut, dies erklärt die unterschiedlichen „Farben“ über den Tag gesehen.

1.2.3 Tageslicht global betrachtet

Tageslichtverfügbarkeit, Sonnenstand und Sonnenstunden hängen von der Lage des jeweiligen Ortes ab. Bereits Vitruvius hat dies in seinen „Zehn Büchern über Architektur“ erläutert:

„... Denn die besonderen Gattungen von Wohngebäuden müssen anders in Aegypten als in Spanien, nicht in derselben Gestalt am Schwarzen Meer, von diesen abweichend in Rom, sowie den weitem Orten je nach den Eigentümlichkeiten ihrer Lage und Himmelsstriches durchgeführt werden; weil die Erdoberfläche an dem einen Orte durch die Sonnennähe versengt wird, an dem andern weit von ihr entfernt ist und wieder anderen in richtigem Abstände sich befindet...“ [VIT 6]

Um dies zu verdeutlichen werden in Abbildung 1.2-3 zwei Sonnenstandsdiagramme für Dortmund und für Hongkong im Vergleich dargestellt.

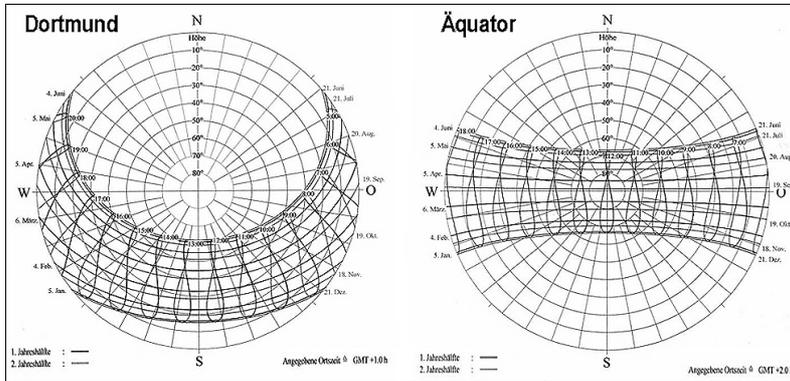


Abbildung 1.2-3: Sonnenlauf für Dortmund und den Äquator

Die direkte Strahlung ist abhängig vom Bewölkungsgrad und variiert je nach Witterung und Klimazone erheblich. Dabei weist beispielsweise Essen eine Jahressumme an horizontaler Beleuchtungsstärke von 106 600 Luxstunden (lxh) auf und ein Ort am Äquator beispielsweise in der Summe 195 900 Luxstunden (Abbildung 1.2-4).

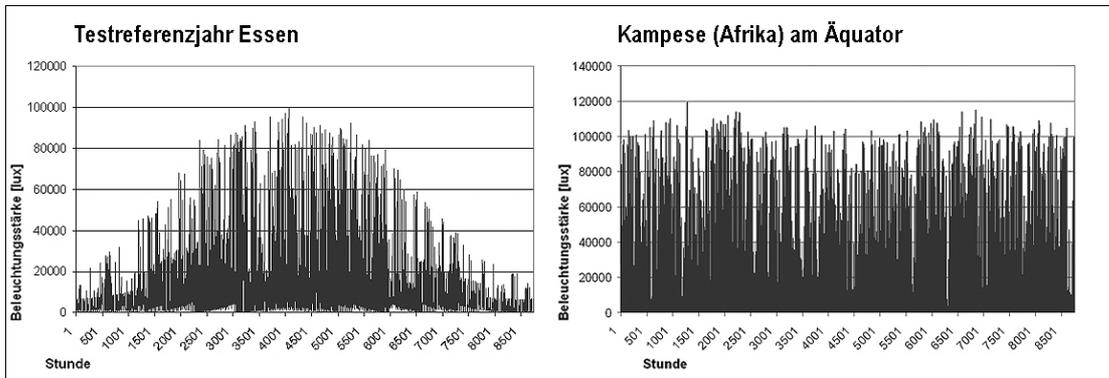


Abbildung 1.2-4: Horizontale Beleuchtungsstärke für das Testreferenzjahr Essen und für Kampese in Afrika (Äquator) [TRY]

1.3 Tageslicht und Mensch

1.3.1 Das visuelle System des Menschen

Das visuelle System des Menschen erfüllt verschiedene Funktionen. Die Rezeptoren für die Verarbeitung von Lichtimpulsen sitzen auf der Netzhaut des Auges, der Retina (Abbildung 1.3-1 links). Den Maßstab für die Bewertung bildet die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges in Abhängigkeit der Wellenlänge der Strahlung (Kapitel 1.1.1). Sie wird beschrieben als Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ und hat ihr Maximum bei 555 Nanometer. Unter 400 nm und über 750 nm sinkt sie nahezu auf Null ab. Die Bewertungskurven für helladaptiertes und dunkeladaptiertes Sehen für einen normalsichtigen durchschnittlichen Menschen ist von der Commission International d' Eclairage (CIE) bereits im Jahr 1927 festgelegt worden und aus Abbildung 1.3-1 (rechts) ersichtlich. Dabei zeichnen sich die Stäbchen des Nachtsehens verantwortlich für das Kontrastsehen und die Zapfen des Tagsehens für das Unterscheiden der Farben. Zusätzlich ist in Abbildung 1.3-1 (rechts) die Kurve für den circadianen Rhythmus eingetragen,

der gegenüber dem Sehen in den Blaubereich verschoben ist und für den Tag-Nachtrhythmus des Menschen verantwortlich ist.

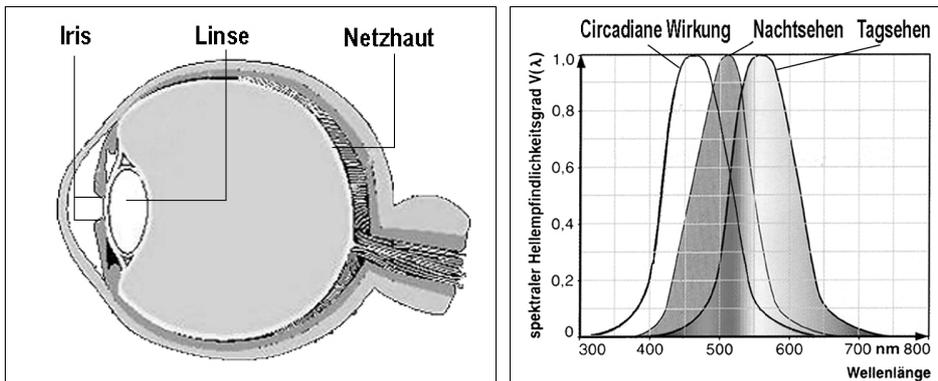


Abbildung 1.3-1: Links: Das menschliche Auge; rechts: Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ sowie circadianer Empfindlichkeitsgrad $c(\lambda)$

1.3.2 Sehaufgabe und Sehleistung

Ein Sehobjekt ist durch das visuelle System des Menschen grundsätzlich nur zu erkennen, wenn ein Mindestkontrast eingehalten wird, die zu erkennenden Objekte eine Mindestgröße vorweisen, eine Mindestleuchtdichte vorhanden ist, das Auge an das Gesichtsfeld und seiner Leuchtdichte angepasst ist sowie ein bestimmter Zeitraum für das Sehen eingehalten wird. Außerdem wird die Sehleistung beeinflusst durch mögliche Sehschwächen und durch den Grad der Ermüdung. Die Sehaufgabe definiert die daher notwendige Sehleistung [LAN]. Eine große Bedeutung hat, neben der reinen Hellempfindlichkeit, auch die Fähigkeit, Leuchtdichteunterschiede benachbarter Flächen wahrzunehmen. Diese wiederum ist abhängig vom Adaptationszustand des Auges.

Die Adaptation beschreibt die Fähigkeit des Auges, sich an unterschiedliche Leuchtdichten anzupassen. Sie beeinflusst das Maß der Sehfunktion. Im Bereich von 100 cdm^{-2} bis $10\,000 \text{ cdm}^{-2}$ wird eine fast konstante Sehleistung durch die Adaptation des Auges auf die Umgebung erreicht. Die Geschwindigkeit der Adaptation ist abhängig von den Leuchtdichteunterschieden und der Richtung des Verlaufs, so benötigt die Helladaptation (Änderung des Sehmufeldes von dunkel nach hell) zwischen einer und zehn Minuten, die Dunkeladaptation hingegen kann bis zu einer Stunde betragen.

Der photometrische Kontrast wird als die Leuchtdichte eines Objektes im Bezug zur Umfeldleuchtdichte beschrieben. Die Fähigkeit, Kontraste wahrzunehmen ist abhängig vom tatsächlichen Kontrast, der Objektgröße und der Leuchtdichte im Gesichtsfeld. Ist die Gesichtsfeldleuchtdichte zu groß, so entsteht Blendung.

Die Sehschärfe bezeichnet die Fähigkeit, eng zusammen liegende kleine Objekte getrennt wahrzunehmen. Sie ist ebenfalls abhängig von der Leuchtdichte im Gesichtsfeld mit einem optimalen Kontrast zwischen Sehobjekt und Umgebung von mindestens 90%, bei größeren Helligkeiten wird auch die Sehschärfe besser (z.B. 300 Lux gegenüber 1000 Lux am Arbeitsplatz). Als Akkommodation bezeichnet man die Fähigkeit des Auges, unterschiedlich weit entfernte Objekte scharf abzubilden. Bei schlechter Beleuchtung verlängert sich die Akkommodationszeit. Daher ist die Beleuchtung am Arbeitsplatz ein wichtiges Kriterium für die schnelle Erfassung von Inhalten.

Das Farbsehen geschieht ausnahmslos durch die für das Tagsehen verantwortlichen Zapfen. Es setzt ebenfalls eine Mindestleuchtdichte des Objektes voraus. Bei schlechter Beleuchtung oder nachts sieht der Mensch „unbunt“, wofür die Stäbchen des Nachtsehens ausgelegt sind. Drei verschiedene Rezeptoren des Tagsehens bilden zusammen den Farbeindruck. Eine Wahrnehmung einzelner spektraler Anteile ist dabei nicht möglich. Das heißt, dass unterschiedliche Objekte mit unterschiedlichem Reflektionsvermögen (der Farben) durchaus „gleich“ aussehen

können, wenn sie von unterschiedlich zusammengesetzten Lichtquellen beleuchtet werden. („bedingt gleiche Farben“ oder „metamere Farben“).

Da visuelle Information grundsätzlich aus Form- und Farbinformationen eines Objektes bestehen, so schätzt man, dass Farben etwa 40% der Informationen, die der Mensch erhält, ausmachen [KÜP].

1.3.3 Wahrnehmungsmodelle

Etwa 80% der Informationen erhält der Mensch über das visuelle System [KÜP]. Dabei ist nicht nur das aktive Lesen oder Sehen gemeint, sondern vielmehr alle visuellen Sinneseindrücke, die durch das Gehirn verarbeitet werden und letztlich zur Wahrnehmung führen. Dabei geht man von verschiedenen Wahrnehmungsmodellen aus [SCH1 a]. Eines davon bildet das Reiz-Antwort Wahrnehmungsmodell, das heißt, aus der Umgebung kommt eine Information (Blick nach draußen), diese wird wahrgenommen und in eine Antwort umgesetzt; z.B. scheint die Sonne im Außenbereich, welche in einem positiven Feedback resultiert. Eine grelle Leuchte hingegen erregt Aufmerksamkeit durch ihre Helligkeit, bietet jedoch keinen Reiz bzw. keine Information, weswegen sie leicht als störend empfunden wird (siehe auch Kapitel 1.3.6).

Ein zweites Modell, die „Look-up“ Wahrnehmung, geht davon aus, dass zur Verarbeitung von visuellen Informationen bei einem jedem Menschen mentale Konzepte, das heißt Erfahrungswerte, zugrunde liegen. Das würde bedeuten, dass gleiche objektive Informationen unterschiedlich wahrgenommen werden können. Im Bezug auf Licht ist dies in unterschiedlichen Kulturen tatsächlich der Fall. Darüber hinaus geht man davon aus, dass durch die Wahrnehmung auch Eigenschaften vom Betrachter erkannt werden können, die nicht direkt durch die visuelle Information bereitgestellt werden, beispielsweise der Härtegrad eines Materials, und dass eine Selektion in wichtige und unwichtige Details erfolgt, wodurch ein Raum innerhalb kürzester Zeit wahrgenommen werden kann (visuelle Mustererkennung). Gleichzeitig mit der reinen Informationsverarbeitung geschieht auch die subjektive Bewertung (affektive Bewertung), die eine Information als angenehm – unangenehm oder beruhigend – anregend etc. einstuft und die Attributierung, die eine Vorstellung von positiven oder negativen Effekten des Gesehenen auf unsere Gesundheit einschließt, beispielsweise „Neonlicht macht krank“.

Die Güteermale einer Arbeitsplatzbeleuchtung gründen sich auf das Reiz-Antwortmodell, um Lichtqualität und Grenzwerte für Störungen zu beschreiben, während „Look-up“ Modell eher der Wahrnehmung im alltäglichen Leben entspricht [SCH1 b]. Um ein Arbeitsumfeld zu schaffen, in dem die Menschen sich wohl fühlen und produktiv sein können, müssen Räume und die Raumbelichtung über die rein visuelle Wahrnehmung hinaus im Bezug auf die vorhandenen mentalen Konzepte gestaltet werden.

1.3.4 Psychologische und emotionale Wirkung von Licht

Die physiologische Wirkung von Licht auf den Menschen kann leicht beschrieben werden durch das Helligkeitsempfinden (Kapitel 1.1.2) und den Einfluss auf den circadianen Rhythmus (Kapitel 1.3.1), das heißt durch objektiv messbare Wirkungsweisen. Im Gegensatz dazu steht die psychologische oder emotionale Wirkung von Licht auf den Menschen, die sich weitaus komplexer darstellt, aber eine große Rolle in der Gebäudeplanung spielt. Sie ist eng verzahnt mit der Art und Weise der Wahrnehmung (Kapitel 1.3.3) [SCH1 b und c].

Lam beschreibt die emotionale Wirkung des Lichtes unter anderem mit der Notwendigkeit nach Orientierung durch Zeit, basierend auf dem natürlichen Wechsel zwischen Tag und Nacht [LAM]. Dieser löst eine Erwartungshaltung dem Licht gegenüber aus und zieht eine entsprechende Bewertung der Beleuchtung nach sich. Dabei geht der Betrachter davon aus, dass es tagsüber heller ist als nachts, das gilt auch für Innenräume. Ein Bruch in dieser Wahrnehmung würde darin bestehen, wenn ein sehr dunkel getöntes Glas (wie in den 1970er Jahren vielfach der

Fall) eingesetzt wird, und der Raum durch die notwendige Kunstlichtbeleuchtung tagsüber heller erscheint als der Außenraum. Die psychologische oder emotionale Wirkung wäre die Ablehnung dieser Situation, da sie nicht der Erwartungshaltung entspricht. Zusätzlich hat die möglicherweise zu lösende Sehaufgabe bei der Entscheidung, welches Licht auf welche Weise bewertet wird, einen großen Einfluss und kann die zuerst genannten Faktoren aufheben [SCHM b]. Wird nach erstgenannten Kriterien entschieden, kann für den Abend zum Beispiel ein dunkleres Licht gewünscht werden, wofür die Leuchtdichte der raumbegrenzenden Oberflächen entscheidend ist. Soll aber ein schwieriger Text gelesen werden, so überwiegt die Anforderung an die Sehaufgabe, hierfür wird das Arbeitslicht am Arbeitsplatz ausschlaggebend sein.

Einer der wichtigsten Parameter ist die Information, die dem Nutzer mit der Aussicht über Wetterbedingungen und Tageszeit zugetragen wird [LAM]. Störungen durch Tageslicht (Kapitel 1.3.6) werden nur dann empfunden, wenn es keine Ausweichmöglichkeiten gibt oder die Sehaufgabe nicht erfüllt werden kann. Die Information durch Tageslicht stellt daher einen wichtigen Parameter für die Beleuchtung von Innenräumen [IES] dar. Sonnenschutz- oder Tageslichtsysteme, die Licht ausblenden, ohne aber die Funktion erkennen zu lassen, können dieses Bedürfnis nach Information nicht erfüllen [LIT].

1.3.5 Lichtfarben und ihre Wirkung

Zahlreiche Untersuchungen befassen sich mit der emotionalen Farbwirkung. Insbesondere in der Werbung (rötlich = gemütlich, blau = frisch etc.) und im Verkauf von Lebensmitteln (Beleuchtung von Fleisch und Wurstwaren) wird der manipulative Effekt zur besseren Vermarktung genutzt [KÜP]. In der Gebäudeplanung haben sich unterschiedliche Lichtfarben sowohl in der Effektbeleuchtung als auch in der Nutzbeleuchtung durchgesetzt. Für die Nutzbeleuchtung von Büroräumen sind drei grundsätzliche Lichtfarben erhältlich: warmweiße (< 3300 Kelvin), neutralweiße (3300 - 5000 Kelvin) und tageslichtweiße (> 5000 Kelvin), die jedoch nicht das Spektrum des Tageslichtes widerspiegeln (Kapitel 1.1.3). Grundsätzlich gilt, dass warmweiße Lichtfarben eher bei niedrigen, tageslichtweiße eher bei höheren Beleuchtungsstärken als angenehm empfunden werden. Die von Kruithof ermittelte Behaglichkeitskurve der als angenehm empfundenen Helligkeit in Abhängigkeit der Lichtfarbe auf Basis empirischer Untersuchungen ist in Abbildung 1.3-2 dargestellt [LAN].

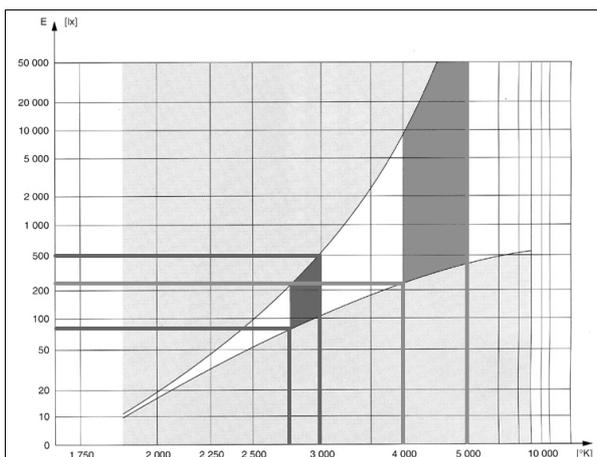


Abbildung 1.3-2: Kruithofsche Behaglichkeitskurve [LAN]

Diese von Kruithof ermittelten Zusammenhänge wurden jedoch zum Teil widerlegt [DAV] (Kapitel 2.2.10).

1.3.6 Physiologische und psychologische Blendung

Die physiologische Blendung ist eine messbare Beeinträchtigung der Sehfunktion, ausgelöst durch eine erhöhte Schleierleuchtdichte (Streulicht im Auge aufgrund fehlender Adaptation, Kapitel 1.3.2), während die psychologische

Blendung eine Unbehaglichkeit beim Sehen beschreibt. Sie ist in Innenräumen häufiger anzutreffen als die physiologische Blendung und kann das allgemeine Wohlbefinden, die Arbeitsleistung und die Konzentrationsfähigkeit beeinflussen sowie zu Ermüdung führen.

Die Direktblendung beschreibt die Störung bzw. Blendung in ihrer Ursache, das heißt das direkte Sehen in eine Blendquelle, z.B. Sonne oder Kunstlichtquelle. Dabei führen meist zu hohe Leuchtdichten oder zu hohe Kontraste zu einer Störung. Unter Reflexblendung versteht man die Blendung durch Spiegelbilder von Lichtquellen, die im Blickfeld sichtbar werden, so z.B. die sich spiegelnde Sonne auf verkehrt eingestellten Sonnenschutzlamellen oder dem Computerbildschirm oder auch die Reflexion von Leuchten auf spiegelndem Papier. Reflexblendung tritt meist an Oberflächen mit stark gerichteten Reflexionseigenschaften auf. Unter Kontrastblendung versteht man nahe aneinander gelegene stark unterschiedlich helle Flächen, z.B. ein zu helles direktes visuelles Umfeld im Vergleich zum Umfeld.

1.3.7 Tageslicht und Kunstlicht

Licht dient dem Sehen und Erkennen von Sehaufgaben und Gegenständen. Die Unterschiede zwischen den Lichtquellen Tageslicht und Kunstlicht sind häufig nicht präsent, deren Einfluss auf das Wohlbefinden und den Organismus des Menschen nur zum Teil bekannt.

Die prägnantesten Unterschiede zwischen Tageslicht und Kunstlicht sind die Verteilung des Lichtes von der Lichtquelle aus, die spektralen Anteile des Lichtes und damit auch die Farbwahrnehmung unserer Umgebung sowie die Dynamik, die das Tageslicht automatisch mit sich bringt. Birgt Sonnenlicht alle Spektralfarben in sich, so weist das Kunstlicht, z.B. eine Glühlampe, seinen höchsten Anteil im gelben oder roten Bereich auf, während der blaue Spektralbereich unterrepräsentiert bleibt. Sonnenlicht hingegen weist eine weitgehend gleichmäßigere Verteilung über alle Spektralfarben auf. Abbildung 1.3-3 zeigt die spektrale Verteilung eines blauen Himmels und einer Glühlampe beispielhaft auf.

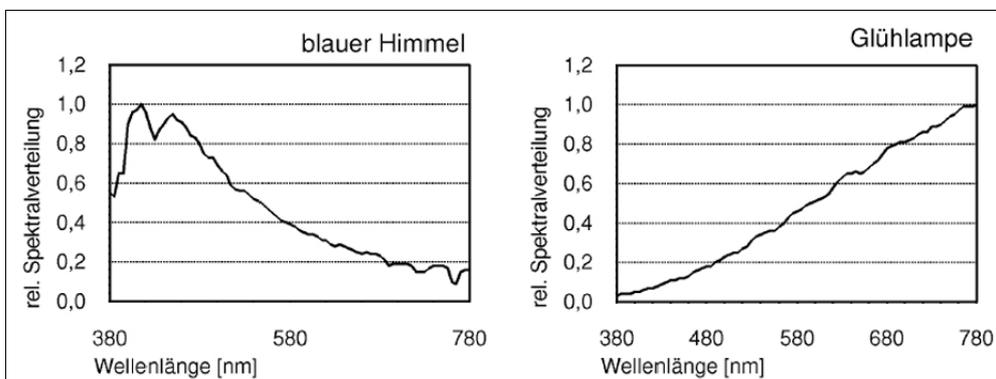


Abbildung 1.3-3: Spektrale Verteilung von Tageslicht und einer konventionellen Leuchte (Glühlampe) [GAL b]

Während der Mensch das Tageslicht mit seiner Vielfalt und Veränderlichkeit schätzt, erwartet er vom Kunstlicht, dass es ihm zu Nutzen ist [LAM]. Blendung zum Beispiel wird unter gleichen Voraussetzungen bei Kunstlicht weit aus eher wahrgenommen und als störend empfunden als bei Tageslicht. Dies hängt unter anderem mit der zusätzlichen Information zusammen, die ein Mensch durch ein Fenster neben der Versorgung mit Tageslicht erhält (Kapitel 1.3.3 und 1.3.4).

1.3.8 Entwicklung der Lichtforschung

In der Medizin wird das Phänomen Licht und seine Auswirkung auf die Menschen bereits seit über 500 Jahren studiert. Dagegen stand in der Architektur meist die Lichtwirkung im Vordergrund. Allerdings wussten die damaligen

Planer um die positiven Effekte des Sonnenlichtes (Kapitel 1.3.9 und 1.4.1). Aber erst Mitte des 19. Jh. wurde Licht als gesundheitlich positiver Effekt beispielsweise in Krankenhäusern umgesetzt, was durch die Erfindung des elektrischen Lichtes später jedoch wieder in Vergessenheit geriet. Die Entdeckung der retinalen Rezeptoren für Tag- und Nachtsehen im Jahre 1834 schaffte detaillierte Einblicke in das visuelle System des Menschen, wie es zuvor nicht möglich gewesen war. Dass Licht neben den visuellen auch biologische und medizinische Effekte aufweist, wird in der Medizin seit etwa einem viertel Jahrhundert untersucht, darunter der Schlaf-Wachrhythmus, die Aufmerksamkeit, allgemeine Gesundheit und die Qualität des Schlafes. Im Jahr 2002 wurde schließlich, neben den für das Sehen verantwortlichen, ein dritter Rezeptor auf der Retina entdeckt [BRA b, THA]. Er zeichnet sich verantwortlich für die „biologische Uhr“ des Menschen und wird aktiviert durch den natürlichen Rhythmus von Tag und Nacht, also durch Licht. Seitdem konzentriert sich die Forschung unter anderem auf den Einfluss des Sonnen- und/ oder Kunstlichtes auf den circadianen Rhythmus; und auch in Architektur und Lichtplanung gibt es erste Ansätze, Licht über die visuellen Bedürfnisse und die Lichtwirkung hinaus zu betrachten [GAL c].

1.3.9 Licht und Gesundheit

Licht hat Einfluss auf viele Funktionen des Menschen. Der Einfluss auf den Organismus hängt von der Intensität und der Dauer der Einstrahlung ab, das heißt der Menge des Lichtes insgesamt. Während für das Sehen die von den Regelwerken geforderten Mindestbeleuchtungsstärken von meist 500 Lux ausreichen und es nur eine geringe tageszeitliche Veränderung der visuellen Empfindlichkeit gibt, wird der biologische Rhythmus erst bei weitaus höheren Werten und einer gewissen Zeitdauer durch Licht beeinflusst. Wo genau die Sollwerte liegen ist bisher noch nicht vollständig geklärt. Zudem haben die natürlichen Hell-Dunkel-Zyklen Einfluss auf viele Verhaltensweisen und Körperfunktionen des Menschen, unter anderem den Schlaf-Wach-Rhythmus, die Körpertemperatur, Hirnaktivitäten, die subjektive Wachsamkeit und die Leistungsfähigkeit [BRA b, BEL, BOM a, REA, VEI a und b].

Der Unterschied zwischen visuellem und circadianem System liegt unter anderem in der Geschwindigkeit der Verarbeitung von Lichtreizen. Während beim visuellen System die Reize über neuronale Strukturen übertragen werden benötigt das circadiane System Zeit für die Aktivierung. Es beruht auf dem Prinzip der Hormonausschüttung des Schlafhormons Melatonin in den Blutkreislauf, dessen Dauer bei Aufwachen etwa zehn Minuten in Anspruch nimmt und nach Ausschalten des Lichts etwa 15 Minuten zur Rückkehr in den Schlafzustand benötigt [REA]. Darüber hinaus rufen hellere Lichtimpulse eine schnellere Melatoninunterdrückung hervor als dunklere.

Die Quantität von Licht, seine spektrale Zusammensetzung, räumliche Verteilung, Zeitpunkt und Dauer der Einwirkung ist für beide Systeme (visuell und circadian) derart unterschiedlich, dass davon auszugehen ist, künftig Empfehlungen für „gutes Licht“ nach zwei Kriterienätzen zu formulieren [REA]. Entgegen dem visuellen System, bei dem die Anforderungen an Beleuchtung auf die Nutzfläche (Arbeitsebene) bezogen leicht gemessen werden können, kann das circadiane System nur auf Basis der tatsächlichen Einstrahlung auf die Retina bewertet werden. Das heißt, dass vertikal gemessen und die Verschattung durch Nase und Auge berücksichtigt werden muss. Darüber hinaus hat das visuelle System seine höchste Empfindlichkeit bezogen auf das Farbspektrum des Lichtes im grün-gelben Bereich während die des circadianen Systems in den Blaubereich verschoben ist (Kapitel 1.3.1).

1.4 Tageslicht und Architektur

1.4.1 Planen mit Tageslicht: Früher und heute

„Bei allen jenen Bauanlagen möge man dafür Sorge tragen, dass sie eine genügende Beleuchtung erhalten.“ [VIT 6]

In der Gebäudeplanung wurde historisch gesehen aus der Notwendigkeit heraus ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt. Man wusste um die Charakteristik und Wirkungsweise von Tageslicht, weil kein anderes Medium eine ausreichende

Beleuchtung sichern konnte. Vitruvius wies in seinen „Zehn Büchern über Architektur“ [VIT 1-10] bereits auf die Notwendigkeit einer guten Tageslichtplanung und deren Einfluss auf den Menschen hin und formulierte klare Richtlinien zur Lage eines Bauplatzes, zu Gebäudeabständen und der Orientierung.

Mit der Erfindung des elektrischen Lichts verschwand das Wissen um das Tageslicht aus den Köpfen der Architekten und Planer. Mit gesteigertem Kunstlichteinsatz und der Teilung der Planung in Entwurf, Bauphysik, technische Gebäudeausrüstung und Tragwerk verlor sich die ganzheitliche Betrachtung von Raum und Licht und trat eine eher physikalische Betrachtung in den Vordergrund. Kunstlicht ermöglichte fensterlose Räume und große Raumtiefen bei konstanter Beleuchtung, die industrielle Entwicklung der Bautechnik große Öffnungen oder ganze Fassaden aus Glas und Stahl. Der Einsatz von Klimaanlage kompensierte die aus den hohen Glasanteilen hervorgehende Überhitzung von Gebäuden. Das Innere eines Gebäudes konnte auf diese Weise unabhängig von Klima und Wetterbedingungen gekühlt und beleuchtet werden. Die fehlende Notwendigkeit der Tageslichtnutzung über mehrere Generationen von Planern hinweg führte zu fehlender Ausbildung und Wissen in diesem Bereich.

Heute, nach der Energiepreiskrise der 1970er Jahre, in der man sich erstmals wieder mit der Ressource Sonne beschäftigte, sind technologische Möglichkeiten vorhanden, mit denen sich viele Probleme früherer Glasfassaden minimieren lassen. Das Interesse an der sinnvollen Nutzung des Tageslichtes, zum einen, um eine Senkung von Kosten für Beleuchtung und Kühlung zu erzielen, und zum anderen, um den Komfort der Nutzer zu erhöhen, gewinnt wieder mehr Raum. Zudem wird in den letzten Jahren der Einfluss des Innenraumklimas auf die Gesundheit, insbesondere in Bürogebäuden, vermehrt diskutiert [CAK].

1.4.2 Gestalten mit Licht

Licht bildet das „Material“ in der Architektur, denn ohne Licht kann ein Raum nicht wahrgenommen werden. Tageslicht ist lebendig und vielfältig; wer es intelligent einsetzt, kann eine große Intensität in der Raumwirkung erlangen und beim Betrachter Emotionen wecken. Licht kann in Farbe und Intensität manipuliert oder direkt und indirekt genutzt werden (Abbildung 1.4-1 links). Öffnungen können den Übergang vom Innen- zum Außenraum verschwimmen lassen oder bewusst ein „Bild“ des Außenraumes darstellen (Abbildung 1.4-1 rechts).



Abbildung 1.4-1: Links: Direkte und indirekte Beleuchtung (Universität Porto, Portugal); rechts: Das Fenster als Bild (Garten der Meister der Netze in Suzhou, China) und Übergang zwischen innen und außen (Bauhaus Dessau) und

Zu unterscheiden ist grundsätzlich zwischen der Effektbeleuchtung, die eine gewisse Wirkung, zum Beispiel in Kirchen einen mystischen Raumeindruck erzeugen soll (Abbildung 1.4-2 links) und der Nutzbeleuchtung, die zur Nutzung des Gebäudes unabdingbar ist, beispielsweise in Bürogebäuden (Abbildung 1.4-2 rechts). Innerhalb dieser Arbeit kommt ausschließlich die Nutzbeleuchtung in Büroräumen zum tragen, deren Wirkung auf den Menschen jedoch nicht außer Acht gelassen wird.



Abbildung 1.4-2: Links: Mystische Lichtwirkung (Don Bosco Kirche in Brasília, Brasilien); rechts: Nutzbeleuchtung (Büroraum im Gebäude von Deloitte & Touche, Düsseldorf)

1.4.3 Entwurfparameter: Dem Licht Raum geben

1.4.3.1 Umgebung und Städtebau

Die Tageslichtverfügbarkeit im Innenraum hängt von der Lage des jeweiligen Ortes, dem Klima, der Topographie und der Verbauung in der Umgebung ab. Lichtfarbe, Sonnenhöhe und Schattenlängen sowie die Intensität der Strahlung auf die Fassaden ändern sich über Tag und Jahr und in den jeweiligen Klimazonen sehr unterschiedlich. Diese Randbedingungen müssen aufgrund ihres großen Einflusses auf den späteren Energieverbrauch für Beleuchtung und Kühlung eines Gebäudes bei der Planung bereits in den ersten Skizzen eines Gebäudeentwurfs berücksichtigt werden. Das Beispiel eines innerstädtischen Gebietes in der chinesischen Stadt Shenzhen zeigt ein unzureichend mit Tageslicht versorgtes Wohnviertel (Abbildung 1.4-3).



Abbildung 1.4-3: Innerstädtisches Gebiet in der chinesischen Stadt Shenzhen, 2001

1.4.3.2 Baukörper und Gebäudehülle

Die Kubatur des Baukörpers und seine Einordnung in das gebaute Umfeld geben Orientierung und Raumtiefen vor, die später für die Gestaltung der Gebäudehülle sowie des notwendigen Kunstlichteinsatzes eine große Rolle spielen. Wichtige Einflussgrößen bilden Raumtiefen und -höhen, die Ausbildung von Höfen, Atrien oder Lichtschächten, sowie die Terrassierung oder Setbacks von Hochhäusern, die im Idealfall einen Tageslichteinfall bis zum Grund ermöglichen.

Die Gebäudehülle schafft den Übergang vom Innen- zum Außenraum und umgekehrt. Sie bildet je nach Ausführung eine Membran, die den Austausch von Licht, Luft und der menschlichen Wahrnehmung ermöglicht. Darüber hinaus regelt sie die Qualität der Beleuchtung in Verbindung mit der dahinter liegenden Nutzung von Innenräumen und lässt im Idealfall Licht und Wärme soweit nötig in das Gebäude ein, vermeidet jedoch Blendung und Überhitzung durch entsprechende Vorrichtungen zur Verschattung. Außerdem dient sie als Ausdrucksmittel und sichert die Pri-

vatsphäre der Nutzer. Die Anordnung, Größe und Teilung von Fenstern spielt bei der Planung von Fassaden eine große Rolle. So hat das Weglassen eines Fenstersturzes beispielsweise den Effekt, Tageslicht tiefer in den Raum einfallen zu lassen (Abbildung 1.4-4), während eine gläserne Brüstung ohne nennenswerten Vorteil für die Beleuchtung im Innenraum bleibt.

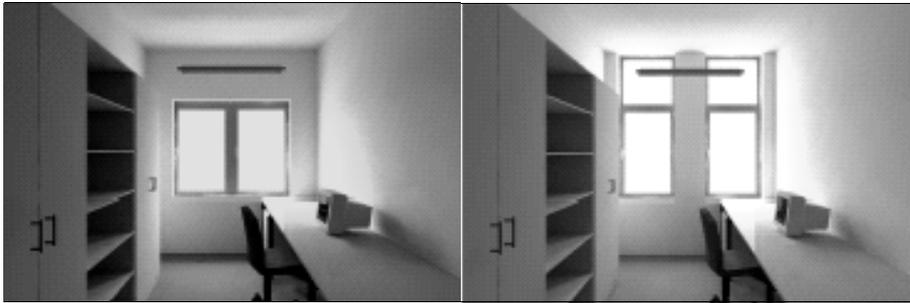


Abbildung 1.4-4: Effekt unterschiedlicher Fensterformate auf die Innenraumbeleuchtung [EME]

1.4.3.3 Das Tageslichtsystem: Sonnenschutz – Blendschutz – Lichtlenkung

Die Fassade übernimmt zum einen eine Schutzfunktion gegen Überhitzung und Blendung und zum anderen eine Versorgungsfunktion durch Licht und Wärme, also thermische und visuelle Aufgaben. Aus diesen Bedingungen ergeben sich für eine zeitgemäße und an aktuelle Arbeitsplatzbedingungen angepasste Gebäudeplanung drei Funktionen für ein Tageslichtsystem: Der Sonnenschutz, der Blendschutz und die Lichtlenkung, aber auch die Sichtverbindung nach draußen (Abbildung 1.4-5).

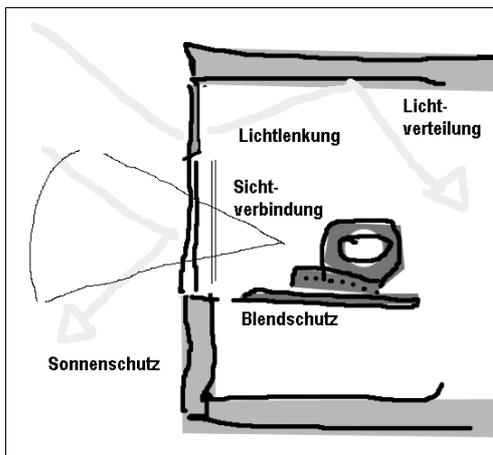


Abbildung 1.4-5: Funktionen einer Fassade: Sonnen- und Blendschutz, Lichtlenkung

Der Sonnenschutz verhindert, dass durch Sonneneinstrahlung auf die Fassade zu viel Wärmestrahlung (repräsentiert durch den g-Wert, Kapitel 1.1.4) in den Innenraum gelangt und trägt so zur Vermeidung zu hoher Raumtemperaturen bei. Mit der Reduktion der Wärmestrahlung ergeben sich jedoch meist auch die Reduktion des Tageslichtes sowie die Einschränkung der Sichtverbindung.

Ein Blendschutz übernimmt die Aufgabe, bei direkter oder diffuser Einstrahlung die Gefahr durch direkte Blendung oder aber Reflexblendung in Arbeitsräumen zu minimieren. Grundsätzlich kann ein Sonnenschutz auch gleichzeitig Blendschutzfunktionen übernehmen. Häufig ist es jedoch effektiver, einen vom Sonnenschutz getrennten Blendschutz, etwa einen semitransparenten „Screen“ im Innenraum, zu verwenden, der individuell und unabhängig von thermischen Erfordernissen einstellbar ist.

Werden Innenräume mit einseitigen Tageslichtöffnungen aus dem vorgegebenen Umfeld oder der Nutzung heraus tiefer, so dass eine einseitige Beleuchtung durch Fenster nicht ausreichend ist, so müssen Maßnahmen zur Licht-

lenkung ergriffen werden. Sie können im oberen Bereich eines Fensters angebracht werden und lenken insbesondere direktes Sonnenlicht an die Decke und durch Reflexion in die Tiefe des Raumes um. Voraussetzung ist eine mit dem Lichtlenksystem abgestimmte Oberflächenbeschaffenheit der Decke, um die Lichtlenkeigenschaften optimal zu nutzen.

Die aus den Anforderungen des Sonnenschutzes auf der einen Seite und der Tageslichtnutzung auf der anderen Seite heraus resultierenden Konflikte für Sommer- und Wintersituationen sind in Tabelle 1.4-1 dargestellt.

Tabelle 1.4-1: Zielkonflikte von Sonnenschutz und Tageslichtnutzung in Innenräumen

Anforderung Sommer	Optimierung	Konflikt
Tageslichtnutzung	Sonnenschutz auf	Blendung/
Blendschutz	Sonnen-/ Blendschutz zu	Tageslichtnutzung
Raumtemperatur	Sonnenschutz zu	Tageslichtnutzung
Luftqualität	Fenster auf	Energieverbrauch Kühlung
Energieverbrauch (Heizung/ Kühlung)	Sonnenschutz zu	Tageslichtnutzung
Anforderung Winter	Optimierung	Konflikt
Tageslichtnutzung	Sonnenschutz auf	Blendschutz
Blendschutz	Sonnen-/ Blendschutz zu	Tageslichtnutzung
Raumtemperatur	Sonnenschutz auf	Tageslichtnutzung
Luftqualität	Fenster auf	Energieverbrauch Heizung
Energieverbrauch (Heizung/ Kühlung)	Sonnenschutz auf (Solare Gewinne)	Blendschutz

Alle drei genannten Funktionen – Sonnenschutz, Blendschutz und Lichtlenkung – können von einem System übernommen oder aber durch drei getrennte Komponenten geleistet werden und werden unter dem Begriff Tageslichtsystem zusammengefasst [VDI 6011], der auf im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet wird. In den letzten Jahren wurden vermehrt Tageslichtsysteme entwickelt, so dass mittlerweile eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen auf dem Markt verfügbar ist [MÜL a, BIN, VDI 6011]. Dabei gibt es statische oder selbstregulierende Systeme (statisch mit Reaktion auf unterschiedliche Lichteinfallrichtungen), einachsig oder zweiachsig nachführbare oder wegfahrbare Systeme wie Raffstores oder Jalousien.

1.4.3.4 Regelung und Steuerung von Tageslichtsystemen

Der Einsatz von Sonnenschutzsystemen sowie die resultierende Innenraumbelichtung hängen unmittelbar von den Außenbedingungen ab. Häufig werden bewegliche Sonnenschutzsysteme deshalb mit einer automatischen auf die Ortsangaben, die Verbauung und das einfallende Sonnenlicht abgestimmten Steuerung versehen. Diese kann an die zentrale Gebäudeleittechnik angekoppelt werden und so Überhitzung im Sommer auch bei Abwesenheit der Nutzer vermeiden. Einen Nachteil dieser vollautomatisch gesteuerten Anlagen bildet die Einschränkung der individuellen Wünsche eines jeden Nutzers. Eine auf reine Infrarotstrahlung ausgerichtete Steuerung ist aufgrund der fehlenden Informationsvermittlung für den Nutzer häufig nicht nachvollziehbar und daher störend [KRÜ]. Im schlimmsten Fall werden beispielsweise zu häufig gefahrenen Sonnenschutzanlagen, die sowohl akustische als auch visuelle Störungen hervorrufen können, blockiert. Eine zusätzliche manuelle Eingriffsmöglichkeit bei Anwesenheit erlaubt die Einstellung persönlicher Präferenzen. Zusätzlich kann eine Informationsvermittlung durch eine auf dem Computerdesktop erscheinende Rückmeldung über den Zustand aller technischen Anlagen bezogen auf die klimatischen Bedingungen eine Transparenz für den Nutzer schaffen und so zu Verständnis und Zufriedenheit beitragen [SCHU d].

1.4.4 Energieeffizient

„Die beste und wirksamste Form des Energiesparens ist Denken“ [PRO]

Die Voraussetzung für eine Einsparung von Beleuchtungsenergie besteht in einer (teilweise) automatischen Steuerung und Regelung des Sonnenschutzes und dem Zuschalten von Kunstlicht in Abhängigkeit vom Tageslicht. Eine Quantifizierung des erforderlichen Kunstlichteinsatzes als Ergänzung zum Tageslicht kann beispielsweise durch die Tageslichtautonomie (Prozent der jährlichen Arbeitsstunden mit Tageslichtbeleuchtung) beschrieben werden. Studien im Rahmen der International Energy Agency [IEA b] zeigten in der Vergangenheit deutliche Schwankungen des Energieverbrauchs in Abhängigkeit der Tageslichtbeleuchtung, also den eingesetzten Tageslichtsystemen. Dies konnte auch durch eigene Untersuchungen bestätigt werden [MÜL b und c].

Eine Untersuchung unterschiedlicher Tageslichtsysteme zeigt eine Tageslichtautonomie von etwa 34% für ein konventionelles System im Vergleich zu 45% unter Einsatz einer perforierten Lamelle, die im Sommer sogar annähernd 90% erreichte [DIE]. Sie fasst die Parameter für den Energieverbrauch in Bürogebäuden wie folgt zusammen [SIC b]:

- Architektur, Kubatur
- Orientierung
- Umgebende Bebauung
- Optische Eigenschaften von Hüllflächen
- Nutzungsanforderungen
- Dynamische Einflüsse: Klima, Nutzungsverlauf, Kontrollstrategien

1.4.5 Wirtschaftlichkeit

Über die reine Energiebilanz eines Gebäudes hinausgehend sprechen auch weitere ökonomische Gesichtspunkte für eine Minimierung des Kunstlichteinsatzes. Während Solarenergie und damit Tageslicht frei verfügbar ist, muss für den Kunstlichteinsatz elektrischer Strom bereitgestellt werden und die zusätzlich entstehende Wärme durch Kühlung kompensiert werden. Dies trägt nicht unerheblich zu den Betriebskosten von Gebäuden, insbesondere von Büro- und Verwaltungsgebäuden, bei. Sonnenlicht ist im Gegensatz zum Kunstlicht darüber hinaus hinsichtlich seiner Lichtausbeute deutlich effizienter als künstliche Lichtquellen (Sonnenlicht: etwa 110 lm/W, Glühlampe: 12 lm/W, Leuchtstofflampe: 80 lm/W).

Die rein monetäre Betrachtung bezieht die Investitions- und laufenden Kosten für den Einsatz von Tageslichtsystemen in Gebäuden mit ein. Fenster jedoch stellen mit dem Ausblick und der Tageslichtnutzung wichtige Komponenten für die Zufriedenheit und das Wohlbefinden und damit die Produktivität am Arbeitsplatz dar. In diesem Zusammenhang sei eine im Jahr 2000 veröffentlichte Studie zum Thema Energieeinsparung durch Tageslichtsysteme genannt [EHL a und b], die ein Einsparpotential von 14% für die künstliche Beleuchtung bei Tageslichtsystemen gegenüber herkömmlichen Systemen aufzeigt. Bezieht man die Steigerung der Arbeitsplatzqualität und deren positive Auswirkung auf die Arbeitskraft mit ein, kann bei einer Steigerung der Effektivität von nur 0,5% aufgrund einer verbesserten Beleuchtung durch Tageslichtsysteme sich dies bereits in drei Jahren amortisieren. In den USA wurde eine Studie zum Kaufverhalten im Einzelhandel mit und ohne Dachoberlichter durchgeführt, die von 40% mehr an Umsatz in Märkten mit Tageslicht durch Dachoberlichter verzeichnet werden konnte als bei Märkten ohne Tageslicht [HMG a].

1.4.6 Planungsablauf

Die Einflüsse der Planung auf die Tageslichtnutzung reichen vom Klima, der Einordnung eines Gebäudes in das gebaute Umfeld über die Planung der Kubatur und der Fassaden hin bis zu den ausgewählten Tageslichtsystemen. Hertzsch hat die Auswirkung verschiedener Planungsschritte im Bauablauf hinsichtlich ihres Einflusses auf die Wirtschaftlichkeit der Baumaßnahmen und deren Optimierungspotenzial untersucht [HER]. Erfolgt die Integration tageslichtnutzender Komponenten nicht von Beginn an, sondern erst, wenn die Nutzung von Räumen bereits feststeht, so kann sich der wirtschaftliche Nutzen solcher Komponenten um bis zu 10% verschlechtern. Wenn dazu die genauen Raumgrößen bereits feststehen steigern sich die Einbußen auf bis zu 15%, da die Verminderung des Raumbedarfs für eine optimierte technische Gebäudeausrüstung nicht mehr beeinflusst werden kann; bei bereits feststehenden Lichtöffnungsgrößen kann sich der auf 35% steigern. Die Integration tageslichtnutzender Elemente muss, um den vollen wirtschaftlichen Nutzen zu erzielen von Beginn an erfolgen, damit sowohl flächenreduzierende als auch raumbezogene Maßnahmen durchgeführt werden können.

Eine integrale Planung, also die Planung mit interdisziplinärer Zusammensetzung von Beginn an, bietet daher Vorteile gegenüber der linearen Planung, wie sie konventionell meist noch betrieben wird (Abbildung 1.4-6).

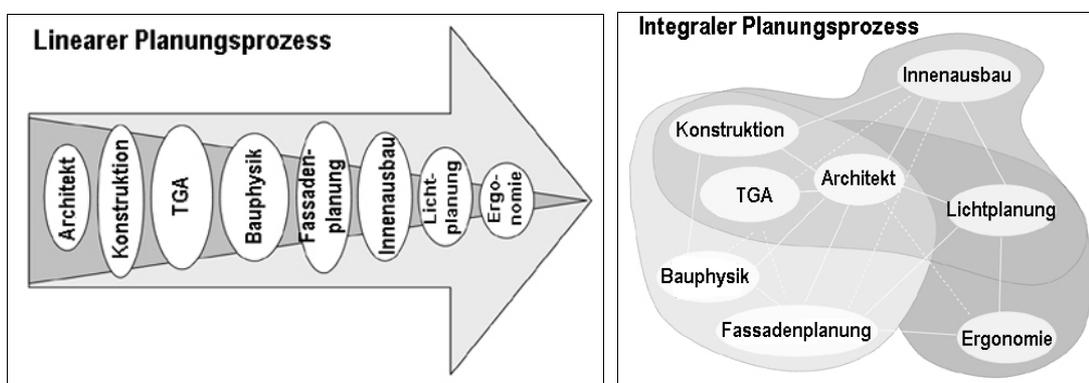


Abbildung 1.4-6: Links: Linearer Planungsprozess; rechts: Integraler Planungsprozess

Der Grund liegt in den immer enger werdenden Rahmenbedingungen, die ein jeder Fachplaner dem nachfolgenden Planer vorgibt und innerhalb derer er Lösungen suchen muss. Dies kann Innovationen bremsen und macht die optimale Lösung aufgrund fehlender Interaktionen schwierig. Der vernetzte Planungsprozess bietet hier den Vorteil, von Beginn an alle Rahmenbedingungen aufeinander abzustimmen [SCHU e].

1.5 Rahmenbedingungen - Anforderungen an Büroarbeitsplätze

1.5.1 Büroraum im Wandel der Zeit

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts bildeten Großraumbüros den Standard für Arbeitsplätze. Deren teilweise ungünstige Auswirkungen auf die Arbeitsatmosphäre, unter anderem bedingt durch fehlende Möglichkeit, auf sein Arbeitsklima Einfluss zu nehmen [FRI], führte zur vermehrten Nutzung von Zellenbüros bis hin zu heutigen Kombibüros, bei denen kleine Zellenstrukturen in den Außenbereichen verbunden werden mit temporären Gruppenarbeitszonen im Gebäudeinneren. Mit der Umsetzung solcher flexiblen Konzepte wird es immer wichtiger, Tageslicht, über das normale Maß (Kapitel 1.4.3.2) tief in das Gebäude hinein zu transportieren, um auch fassadenferne Raumzonen noch ausreichend beleuchten zu können und möglichst nur partiell Kunstlicht zuzuschalten.

War lange Zeit der feste Arbeitsplatz ein „Muss“, so ändern sich die Strukturen und Anforderungen mit der sich immer weiter entwickelnden IT- Technologie hin zu flexiblen Arbeitswelten mit unterschiedlichen Anforderungen [HLA a und b]. Die Art der Arbeit wandelte sich aufgrund des fast automatisierten Ablaufs von überwiegender Routi-

nearbeit (z.B. Schreibsäle) hin zu mehr „Denkarbeit“. Hinzu kommen flexiblere und vor allem erweiterte Arbeitszeiten, die es notwendig machen, dem Nutzer ein angenehmes und dem Wohlbefinden zuträgliches Arbeitsumfeld zu ermöglichen. Nicht zuletzt deshalb, weil das Personal einen Großteil der Kosten einer Firma ausmacht, ist es sinnvoll, diese möglichst effizient einzusetzen, und ein Umfeld zu schaffen, welches größtmögliche Produktivität erlaubt. In diesem Zusammenhang werden immer häufiger die Begriffe des „Intelligent Office“ [SCHN] oder aber auch „New Work“ [HLA a und b] verwendet. Das Büro steht damit nicht nur als Gebäude sondern für die darin stattfindenden Arbeitsprozesse. „Intelligent Office“ versteht sich als nutzungsorientierter Ansatz zur Betrachtung des Gebäudegefüges, in dem die wertschöpfenden Erträge stattfinden. „New Work“ steht für die geänderten Arbeitsprozesse, z.B. Gruppenarbeit, und Arbeitsorte, z.B. Heimarbeit.

Neue Tendenzen können zusammengefasst werden als „intelligente“ oder „adaptive“ Gebäudekonzepte, die reaktionsfähige Fassaden aufweisen und im Innenraum fast frei gestaltet werden können. Faktoren, die den Wertewandel mit sich bringen sind nach [KRAE] und [KRÜ]:

- Zwang zu kosteneffizientem und energiesparendem Bauen
- Wandel des Hauptkostenanteils vom Rohbau hin zum Ausbau
- Wertewandel in Unternehmen und Gesellschaft mit einem höheren Grad an Kommunikation
- Flexibilisierung der Arbeitsform und Arbeitszeit
- Technisierung des Arbeitsplatzes und Mehrbelastung durch Bildschirmarbeit
- Notwendigkeit für horizontale und vertikale Arbeitsebenen aufgrund von Einzel- und Gruppenarbeit
- Sorgsamer Umgang mit Sonnenschutz und Tageslicht durch den Einsatz neuer Materialien
- Steigendes ökologisches Bewusstsein
- Nutzeranforderungen an Steuerungs- und Regelungssysteme

Betrachtet man die Defizite in der täglichen Büroarbeit, so beklagen sich etwa 40% über zu wenig Tageslicht und ca. 13% sogar über zu viel Tageslicht, insgesamt fühlen sich 56% an Mitarbeitern durch schlechte Beleuchtung beeinträchtigt [SCHN, CAK]. Weitere Störungen werden verursacht durch zu niedrige oder zu hohe Temperaturen, oder aber auch durch Lärm und Geräusche [CAK].

1.5.2 Anforderungen an die Beleuchtung von Arbeitsplätzen

Die Anforderungen an Büroarbeitsplätze mit Bildschirmarbeitsplätzen sind vielfältig. Über das Licht hinausgehend gibt es unterschiedliche Einflussfaktoren, die für das Wohlbefinden und die Produktivität am Arbeitsplatz wichtig sind. Der Arbeitswissenschaftler Schierz beschreibt dies mit den drei Funktionen von Licht [SCHL c]:

- Sehen mit Licht: Der Sehvorgang basiert auf Licht, darf jedoch nicht durch Blendung oder Kontrastminderung gestört werden.
- Aktivieren mit Licht: Durch Licht wird der Mensch leistungsfördernd aktiviert.
- Wohlfühlen mit Licht: Die angepasste Lichtinszenierung einer abgestimmten Tageslicht- und Kunstlichtplanung fördert das Wohlbefinden und dient der Akzeptanz im Arbeitsumfeld.

Alle drei Faktoren führen zu einer Gesamtbehaglichkeit, die, wenn nur einer davon gestört wird, insgesamt zu Unbehaglichkeit und Leistungsabfall führen. Die VDI- Richtlinie 6011 fasst die notwendigen Kriterien für die (Tageslicht) -planung wie folgt zusammen [VDI 6011]:

- Erzeugung ausreichender Beleuchtungsstärken je nach Anforderung mit individueller Anpassung für größtmögliche Nutzerzufriedenheit
- Vermeidung von Direkt- oder Reflexblendung

- Erzeugung einer harmonischen Leuchtdichteverteilung mit geringen Leuchtdichteunterschieden zwischen Arbeitsfläche, Umfeld und Umgebung
- Erzeugung einer bestimmten Lichtrichtung mit angenehmer Schattigkeit zur Erleichterung des räumlichen Erkennens von Gegenständen (natürlicher Lichteinfall)
- Die Sehaufgaben unterstützende Lichtfarbe und Farbwiedergabe
- Erzeugung geringer Kühllasten sowie Wirtschaftlichkeit

Die genannten Faktoren beruhen meist auf der Annahme, dass die Sehaufgabe das Kriterium für Lichtqualität ist. Kramer macht den Versuch, Lichtqualität etwas weiter gefasst zu beschreiben [KRA a]. Dabei spielen der Bezug zur Außenwelt, die Orientierung im Raum, die Kommunikation mit Menschen, gute Arbeitsbedingungen und das Verstehen der Situation und der Zusammenhänge eine Rolle. Licht soll die Orientierung in Raum und Zeit ermöglichen, integraler Bestandteil der Architektur sein und dem Entwurf entsprechen, also nicht eigenständig wirken. Dazu soll Licht eine Atmosphäre erzeugen, die dem Anspruch und der Erwartung des Menschen gerecht wird (Kapitel 1.3.3 und 1.3.4) und die Kommunikation fördern. Eine immerwährend gleiche Beleuchtung oder immer gleiche Lichtmotive führen dagegen zu Ermüdung.

1.5.3 Überblick über geltende Regelwerke

Bezogen auf die Planung von Büroräumen hat es in den letzten Jahren Änderungen in den geltenden Regelwerken gegeben, zum Teil sind diese auch noch in der Überarbeitungsphase.

Seit 2002 regelt die Musterbauordnung [MBO] die Abstandsflächen für Wohn-, Gewerbe- und Industriegebäude neu. Hiernach werden die zuvor zulässigen Mindestabstandsflächen stark verringert. Cornelius untersuchte die Auswirkung auf die Tageslichtversorgung der entsprechenden Gebäude [COR]. Eine deutliche Verringerung zu den alten Regelungen war zu erkennen. Somit werden trotz der erhöhten Aufmerksamkeit auf die Auswirkungen von Licht auf den Menschen Regelungen aus wirtschaftlichen Gründen zu Ungunsten der Tageslichtversorgung und damit des Menschen ausgelegt. Umgesetzt werden diese Regelungen in Form der Landesbauordnungen, die Hinweise auf Mindestöffnungsgrößen geben.

Die Arbeitsstättenverordnung 2004 [ArbStättV] enthält im Gegensatz zu früheren Versionen keine konkreten Zahlenangaben für Mindestgrundfläche, lichte Höhe und Mindestluftraum mehr, diese werden nun in Abhängigkeit der Nutzung gefordert. Die genaueren Anforderungen zu präzisieren bleibt den branchen- und tätigkeitsbezogenen technischen Regeln vorbehalten. Der Hinweis auf eine adäquate Aussicht in Arbeitsräumen ist nicht mehr enthalten. Dafür wird der Fokus der Beleuchtung insgesamt zugunsten der Tageslichtbeleuchtung geändert.

Die DIN 5034 „Tageslicht in Innenräumen“ regelt die Größe von Tageslichtöffnungen hinsichtlich der Besonnung, der Tageslichtversorgung und des Sonnenschutzes [DIN 5034]. Hierin enthalten ist der Tageslichtquotient als Bewertungsgröße, der die Innenraum- im Verhältnis zur Außenbeleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel beschreibt. Als Ergänzung dient die VDI 6011 „Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung“ mit Hinweisen zur Tageslichtplanung und der Abstimmung mit dem Kunstlicht [VDI 6011].

Seit 2003 gilt die EN 12464 „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen“ in fast ganz Europa als jeweils nationale Norm [EN 12464]. Zusammen mit der Begriffsnorm DIN EN 12665 ersetzt sie in Deutschland seitdem teilweise die DIN 5035 „Beleuchtung mit künstlichem Licht“. Geändert haben sich der Bereich der Sehaufgabe als neue Bezugsebene (bisher Nutzebene des Arbeitsraumes), die Ablösung der Nennbeleuchtungsstärke durch den Wartungswert der Beleuchtungsstärke (d.h. wird der Wert unterschritten, muss die Anlage gewartet werden bzw. die Lampen ausgetauscht werden), sowie die Integration des UGR Blendungsbewertungssystems (Unified Glare Rating zur Bestimmung der Direktblendung durch Leuchten). Dazu

wurden Leuchtdichtegrenzwerte bei der Beleuchtung von Bildschirmarbeitsplätzen aktualisiert und damit auf 1000 cd/m² heraufgesetzt (nähere Erläuterungen finden sich in der BGI 856 und der DIN 5035 -7).

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Planungshilfen, herausgegeben von der Verwaltungs- Berufsgenossenschaft (VBG) in Zusammenarbeit mit der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG), die die oben genannten Regelwerke für die Praxis konkretisieren; so zum Beispiel die BGI 827 „Sonnenschutz im Büro“ und die BGI 856 „Beleuchtung im Büro“.

In der Energieeinsparverordnung, die in der aktuellen Form nur noch im Jahr 2005 gelten wird, da sie ersetzt bzw. auf Basis der neuen EU- Richtlinie „Gesamtenergieeffizienz in Gebäuden“ überarbeitet wird, sind die Forderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und die Ermittlung von Fensterflächen enthalten. Die neue EU - Richtlinie wird den Nachweis der Beleuchtungsenergie und damit Berechnungen zur Tageslichtversorgung und dem Kunstlichtein- satz für Nicht- Wohngebäude enthalten. Diese neue Norm wird im Jahr 2006 deutschlandweit umgesetzt.

Alle genannten Regelwerke gemeinsam vertreten die Mindestanforderungen nach Licht für das Sehen; andere Wirkungsweisen von Licht, also die unspezifischen Wirkungsweisen wie die circadiane Wirkung, und die Definition von Lichtqualität bleiben dem Planer vorbehalten. Büntemeyer kommentiert hierzu, dass das so genannte „Ambient Management“ eingesetzt werden könnte, ein Vorab - Test von Räumen im Maßstab 1:1, in dem alle Einflusskrite- rien, so auch die Beleuchtung, hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Menschen getestet werden [BÜN].

1.5.4 Bewertungsgrößen und Berechnungsverfahren für Tageslicht

1.5.4.1 Beleuchtungsstärke

Die horizontale Beleuchtungsstärke E_h bezeichnet den auf einer horizontalen Ebene auf Arbeitsflächenhöhe (85 cm über dem Fußboden) gemessenen Wert. Die vertikale Beleuchtungsstärke E_v wird auf einer vertikalen Ebene unter Angabe der Bezugsfläche gemessen. Die mittlere Beleuchtungsstärke E bildet den arithmetischen Mittelwert an verschiedenen Punkten einer Raumzone und dient der Beurteilung der Raumbeleuchtung. Die minimale und maxi- male Beleuchtungsstärke E_{min} und E_{max} bilden das Maß für Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke einer Beleuch- tungsanlage (Empfehlung: E_{min}/E 1:1,5). Unter der zylindrische Beleuchtungsstärke E_z versteht man den arithmeti- schen Mittelwert der im 360° Bereich vertikal gemessenen Beleuchtungsstärke. Dieser Wert ist der Beleuchtungs- stärke auf dem Auge am nächsten, denn durch unterschiedliche Blickbewegungen reicht eine vertikale Beleuch- tungsstärke am Auge nicht aus. Zu beachten ist, dass auch diese Beleuchtungsstärken nicht ungehindert auf das Auge auftreffen, da je nach Gesichtsform durch z.B. die Nase noch einmal eine Verschattung stattfindet. Das tat- sächlich auf die Rezeptoren im Auge auftreffende Licht ist wird also noch einmal reduziert.

Der Wartungswert bildet die mittlere Soll - Beleuchtungsstärke des Büroraumes bzw. der entsprechenden Raumzo- ne. Hierfür wird die Beleuchtungsanlage (Kunstlicht) ausgelegt. Dieser Wert bezieht sich auf die horizontal in Ar- beitsflächenhöhe gemessenen Beleuchtungsstärken und bezieht die Alterung und Wartungshäufigkeit von Kunst- lichtenanlagen mit ein.

1.5.4.2 Tageslichtquotient

Der in der DIN 5034 und VDI 6011 beschriebene Tageslichtquotient D , das Verhältnis der Innen- zur Außenbeleuch- tungsstärke bei bedecktem Himmel, also nur diffusem Licht, ist ein Richtwert für ausreichende Helligkeit in Räumen bis 50qm. Er ist sinnvoll zur Überprüfung der Öffnungsanteile eines Raumes sowie der Transmission des verwendeten Glases. Er gibt keinen Aufschluss über unterschiedliche Orientierungen, da er von einem gleichmäßig bedeck- ten Normhimmel ausgeht. Auch gibt er keine Aussage darüber, wie sich ein Tageslichtsystem (Kapitel 1.4.3.3) im

Fälle hoher Einstrahlung (Sonne) verhalten wird. Für moderne Tageslichtsysteme, die ihre Eigenschaften je nach Einstrahlungsart und -richtung ändern, ist er nicht aussagekräftig.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Licht in Büroräumen“ [MÜL b, GÖT] wurde der Sonnenlichtquotient entwickelt, der Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme in aktivem, also geschlossenem Zustand und bei sonnigen Verhältnissen beschreibt. Dieser Wert kann eine gute Ergänzung zum Tageslichtquotienten bei bedecktem Himmel darstellen, da er das System in seiner aktiven Funktion mit einbezieht. Dabei wird die Innenbeleuchtungsstärke an einem definierten Punkt im Raum im Verhältnis zur Außenbeleuchtungsstärke bei geschlossenen oder aktiven Sonnenschutzsystemen betrachtet.

1.5.4.3 Mindestanforderungen an das Beleuchtungsniveau

Für Arbeitsplätze im Büro gilt eine minimale Beleuchtungsstärke von 500 Lux ausgehend von der Kunstlichtplanung; liegen die Arbeitsplätze direkt an einem Fenster so reichen 300 Lux in der Arbeitsebene aus. Für Großraumbüros gelten 750 bis 1000 Lux, je nach Reflexionsgrad der raumbegrenzenden Oberflächen [ASR 7/3]. Das durch den Nutzer gewünschte Beleuchtungsniveau liegt meist höher. Dazu zeigt Abbildung 1.5-1 Ergebnisse einer Untersuchung zu den bevorzugten Beleuchtungsstärken an Arbeitsplätzen [LAN].

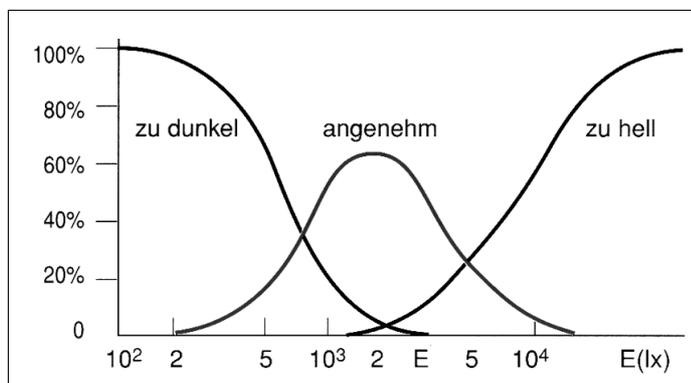


Abbildung 1.5-1: Gemittelte Urteile von Beobachtern zur bevorzugten Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz [LAN]

1.5.4.4 Gleichmäßigkeit

Bereits bei bedecktem Himmel gibt es vom Fenster zur Raumtiefe einen deutlichen Abfall der Beleuchtungsstärke. Bei direkter Sonneneinstrahlung und einem konventionellen Sonnenschutzsystem ist dies noch deutlicher. Diese ungleichmäßige Verteilung kann als unangenehm empfunden werden, wenn sich das Auge von sehr hellen zu sehr dunklen Flächen ständig anpassen muss. Eine Umlenkung des direkten Lichtes in die Raumtiefe kann den Beleuchtungsstärkeabfall ausgleichen und eine insgesamt angenehme Gleichmäßigkeit erzeugen (Kapitel 1.4.3.3). Bezogen auf bevorzugte Leuchtdichten kann die Relation 10:3:1 für das direkte Arbeitsumfeld zu näherem und weiterem Umfeld gelten [DIN 5035].

1.5.4.5 Nutzungszeit und relative Nutzungszeit

Nach DIN 5034 wird die Nutzungszeit beschrieben als das Zeitintervall, während dessen eine vorgegebene Beleuchtungsstärke allein durch Tageslicht an einem Arbeitsplatz oder in einer Raumzone im Innenraum erreicht oder überschritten wird [DIN 5034]. Sie wird auf die jährlichen Arbeitsstunden bezogen. Wenn diese zu 100% gesetzt werden, erhält man so die relative jährliche Nutzungszeit, also die Zeit insgesamt, in der die Beleuchtung mit Tageslicht möglich ist. Diese Zeit ist maßgeblich für das Energieeinsparpotential einer tageslichtabhängig gesteuerten künstlichen Beleuchtung.

1.5.4.6 Nutzbelichtung, Sollbelichtung, Tageslichtautonomie

Der Begriff der Belichtung berücksichtigt nicht nur das tageslichtabhängige Ein- und Ausschalten der künstlichen Beleuchtung, sondern eine Quantifizierung der Tageslichtnutzung bei gedimmtem Zustand des Kunstlichts. Dabei wird nur bis zum Erreichen der Mindestanforderungen Kunstlicht hinzugeschaltet, dies wird als tageslichtabhängige Beleuchtung bezeichnet.

Die Nutzbelichtung bezeichnet das Integral der Beleuchtungsstärke durch Tageslicht über der Arbeitszeit ohne Berücksichtigung der über dem Sollwert erzielten Beleuchtungsstärken (Beleuchtungsstärke (lx) x Zeit (s)). Als Sollbelichtung gilt das Produkt aus Nennbeleuchtungsstärke und Arbeitszeit, die relative jährliche Nutzbelichtung wiederum bezeichnet den Quotienten aus Nutz- und Sollbelichtung [LAN].

Die Tageslichtautonomie drückt aus, zu wie viel Prozent der täglichen Arbeitszeit (Normalfall 8 – 18.00 Uhr) allein das natürliche Tageslicht die Mindestanforderungen an die Beleuchtung sicherstellt. Dabei wird die Summe für ein Jahr durch stündliche dynamische Simulationen dargestellt. Sie bildet die Basis für die Berechnung des notwendigen Jahresstromverbrauchs durch Kunstlicht. Ausgehend von der Berechnung kann sowohl das Raumpotential ermittelt werden, welches ohne Verglasung und Sonnenschutz berechnet wird und genau darlegt, in wie weit sich Fenster- und Raumformat auf die Tageslichtversorgung auswirken. Außerdem kann die Teilung von Fassaden, mögliche verschattende Strukturen (Fluchtbalkone o.ä.) und natürlich das Glas mit einbezogen werden. Die Tageslichtautonomie wird im Standard für den bedeckten Himmel berechnet.

Sonnenschutz- und Blendschutzsysteme schränken die Tageslichtversorgung bei Sonne unter Umständen ein. Die Einbeziehung sonniger Zustände in die Berechnung der Tageslichtautonomie kann daher genauere Ergebnisse liefern. Im Rahmen mehrerer Studien wurde dies an der Universität Dortmund [EME, SOY, MÜL c] auf Basis von Testreferenzjahren durchgeführt und zusammen mit der thermischen Belastung zu einem Gesamtenergieverbrauch für unterschiedliche Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme Systeme durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass die sonnigen Wetterzustände je nach eingesetztem System einen deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch haben und deshalb nicht ausgeschlossen werden sollte.

1.5.4.7 Blendungsbewertung

Blendung durch Tageslicht ist nicht gleichzusetzen mit der Blendung durch Kunstlicht (Kapitel 1.3.7). Zum einen weisen Kunstlichtquellen im Gegensatz zum Fenster meist kleine Blendquellen vor, zum anderen hat Tageslicht in Innenräumen einen positiven Effekt auf die Nutzer, da ein Außenbezug hergestellt und somit Informationen über den Außenraum geliefert werden (Kapitel 1.3.4).

Die Blendung durch Kunstlicht wird durch die Unified Glare Rating - Formel (UGR) berechnet, die für punktförmige Blendquellen entwickelt wurde [BOU, CHA], oder auch durch die Visual Glare Probability (VCP), die in Nordamerika genutzt wird und Blendquellen unterschiedlicher Größe, Leuchtdichten und Anzahl sowie des Ortes innerhalb des visuellen Umfeldes gegen die Hintergrundleuchtdichte setzt [REV, IES].

Bei der Blendung durch Fenster hat man es dagegen meist mit flächenhaften Blendquellen größeren Ausmaßes zu tun. Die Leuchtdichte der Blendquelle muss deshalb als adaptationsbestimmend im Blendwert berücksichtigt werden [HOP, PET, BOU]. Aufbauend auf die „Cornel Formel“ von Hopkinson wurde deshalb der Daylight Glare Index (DGI) entwickelt, der die Leuchtdichte der blendenden Fläche, die Umfeldleuchtdichte, einen modifizierten Raumwinkel und den Raumwinkel der Blendquelle beinhaltet. Bisher gibt es keine verlässliche Möglichkeit, Blendung durch Tageslicht eindeutig zu bestimmen, insbesondere wenn im Gegensatz zum großflächigen Fenster komplexe Sonnenschutz- oder Lichtlenksysteme eingesetzt werden, bei denen der DGI - Wert nicht gilt [IWA, VEL, NEV a, WIE c].

Eine grobe Richtlinie bilden Leuchtdichtegrenzwerte für bestimmte Sehaufgaben. So definiert die [DIN 5035] eine durch ein Fenster gesehene maximale Leuchtdichte bis 4000 cd/m^2 in hellen Räumen als unkritisch. Raumflächen sollten im Flächenmittel 1000 cd/m^2 und als Maximalwert 2000 cd/m^2 nicht überschreiten, damit Spiegelungen auf Bildschirmen vermieden werden. Diese Werte sind abhängig von der Güteklasse der Bildschirme und werden bei den heute eingesetzten Flachbildschirmen immer unwesentlicher.

1.5.4.8 Farbwiedergabeindex

Künstliche Lichtquellen enthalten meist nur einen Teil des im Sonnenlicht vorhandenen Spektrums. Von Kunstlicht beleuchtete Flächen können deshalb nur einen kleinen Teil des Spektrums (der im Licht enthalten ist) wiedergeben. Aus diesem Grund ändert sich der Farbeindruck von Materialien je nach Lichtart. Um die Güte einer Kunstlichtquelle zu beschreiben bedarf es des Farbwiedergabeindex R_a , der durch Vergleiche mit vorgegebenen Standardlichtquellen gewonnen wird. Ein Farbwiedergabeindex von 100 würde ein identisches Licht wieder spiegeln. Meist liegen die Werte darunter. In der Beleuchtungsplanung gibt es sechs Farbwiedergabestufen: 1A und 1B (sehr gut), 2A und 2B (gut), 3 (genügend) und 4 (ungenügend), in denen sich die Güte der Leuchte widerspiegelt.

1.5.4.9 Circadianer Wirkungsfaktor

Der heutige Stand der Technik in der Bürobeleuchtung gibt noch keine Hinweise auf die biologische Wirkung. So werden von unterschiedlichen Forschergruppen Vorschläge von einer bisher rein an den photopischen Bedürfnissen ausgerichteten Beleuchtung hin zu einer dem circadianen Rhythmus entsprechenden gegeben [BRA b, c sowie REA und SCHI d]. Dabei spielt sowohl die Lichtmenge, aber auch die Dauer der Exposition und vor allem die Lichtfarbe eine große Rolle. Obwohl der Rezeptor für die biologische Aktivierung des Menschen erst vor kurzer Zeit entdeckt wurde (Kapitel 1.3.9) und daher noch keine Regelungen in den heutigen Normen enthalten sind, gibt es bereits erste Ansätze zur Messung und Berechnung einer circadianen Wirkungsfunktion ($c(\lambda)$). An der Technischen Universität Ilmenau wurden hierzu Untersuchungen durchgeführt, die eine gute Näherung an die Kurve der spektralen Empfindlichkeit des Rezeptors erkennen lassen und an die bekannten strahlungsphysikalischen Einheiten angelehnt sind [GAL c]. Der circadiane Wirkungsfaktor wird als Verhältnis von circadianen zu lichttechnischen Größen dimensionslos beschrieben (a_{cv}). Auf diese Weise kann jeder Wellenlänge ein circadianer Wirkungsfaktor zugeordnet werden [GAL d, e]. Eine Messung ist mit einer an die circadiane Empfindlichkeit $c(\lambda)$ angepassten Kamera auch direkt möglich [TEC]. Ein Vergleich der Wirkungsfaktoren gäbe in der Praxis zum Beispiel für den bedeckten Himmel einen Wert von 1 und für eine Glühlampe einen Wert von 0,35, das heißt rund 35% dessen, was das Tageslicht zu leisten vermag [GAL e]; ein blauer Himmel käme dabei auf einen Wert von 1,7. Der circadiane Wirkungsfaktor steigt mit der Farbtemperatur an.

1.5.4.10 Übergeordnete Bewertungsansätze

Um Sonnenschutz- und Tageslichtsysteme in ihrer Gesamtheit beurteilen und vergleichen zu können, hat es in der Vergangenheit über die allgemeinen Anforderungen hinaus (Kapitel 1.5.2) verschiedene Ansätze zur Bewertung gegeben. So wurde im Jahr 1995 innerhalb des Schweizer Projektes Tageslichtnutzung DIANE [DIA] Kriterien für eine Tageslichtsignatur definiert, das heißt unterschiedliche Bewertungskriterien in einen Gesamtwert zusammengefasst, die einen direkten Vergleich für die Planungspraxis ermöglicht. Die Tageslichtsignatur wurde im Vergleich eines Tageslichtsystems zu einem Standardmodell herangezogen. Integriert wurden die in Tabelle 1.5-1 dargestellten Komponenten zur Bewertung der Beschattung, der Blendungsbegrenzung, der Tageslichtnutzung sowie der Aussicht und der Regelung und Steuerung von Beschattungsanlagen.

Tabelle 1.5-1: Tageslichtsignatur des Projektes Tageslichtnutzung DIANE

Tageslichtsignatur Projekt DIANE		Raumbewertung		
		1	2	3
Beschattung	g-Wert	0,3	0,2	0,1
	Beweglich	nein	teilweise	voll
	Lichttransmission	gering	mittel	hoch
Blendungsbegrenzung		schwerwiegende Probleme		
		Probleme	übrige Fälle	außerordentlich gut gelöst
Tageslichtgewinnung	Tageslichtquotient in der Raumtiefe	D < 1%	1% < D < 3%	D > 3%
Aussicht	Himmel bedeckt	versperrt	beschränkt	frei
	Himmel klar, Fassade besonnt	versperrt	beschränkt	frei
	Himmel klar, Fassade nicht besonnt	versperrt	beschränkt	frei
Lichtabhängige Steuerung		keine Steuerung	automatische Lichtabschattung	koordinierte Steuerung für Sonnenschutz und Beleuchtung

Sick führte ähnliche Bewertungen durch, integrierte jedoch zusätzlich den mittleren Tageslichtquotienten, die Gleichmäßigkeit, die relativen Zeichenkontraste sowie die Gesichtsfeldkontraste. Außerdem wurde Blendung durch den UGR –Wert berücksichtigt, die Wirtschaftlichkeit durch die Tageslichtautonomie und die Einfachheit eines Systems mit einbezogen [SIC a, b, c, d].

Beide Ansätze berücksichtigen die Tageslichtsituation bei bedecktem Himmel und die Schutzwirkung des Systems, nicht aber die Tageslichtnutzung bei geschlossenen Systemen und sonnigen Bedingungen. Ein Bewertungssystem, welches den visuellen Komfort wie auch andere in diesem einführenden Teil beschriebenen Kapitel integriert, und auch auf innovative komplexe Systeme bezogen werden kann, existiert bisher nicht.

2 Zur Nutzerakzeptanz – Auswertung einer Literaturrecherche

2.1 Hintergrund

Die Zusammenhänge bezogen auf die Akzeptanz der Bürobeleuchtung – in einem ähnlichen Maße gilt dies auch für die Tageslichtbeleuchtung - erklären sich nach Schmits wie in Abbildung 2.1-1 dargestellt [SCHM a]. Dabei spielen lichttechnische Gütemerkmale wie die Beleuchtungsstärken eine Rolle, die nicht lichttechnischen Merkmale der Beleuchtung beziehen sich beispielsweise auf die Raumwirkung und die Einflussgrößen ohne Bezug zur Beleuchtung zum Beispiel auf subjektiv empfundenen Stress. All diese Kriterien führen im guten Fall zur Akzeptanz beim Nutzer und damit zu Produktivität und Gesundheit am Arbeitsplatz.

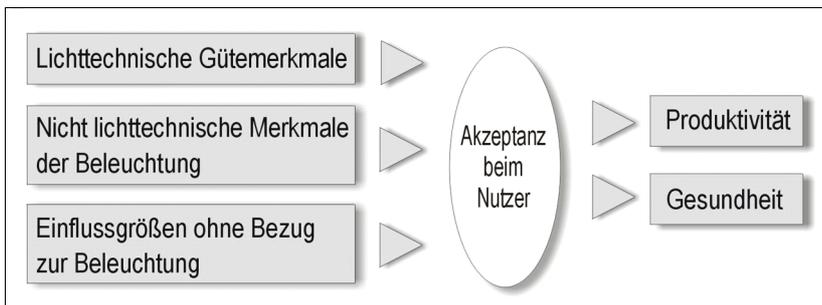


Abbildung 2.1-1: Einflussgrößen auf die Akzeptanz des Nutzers in Anlehnung an [SCHM a]

Die Diskrepanz zwischen Regelwerken und Wünschen der Nutzer liegt meist darin, dass die nicht lichttechnischen Merkmale sowie die Einflussgrößen ohne Bezug zur Beleuchtung nicht ausreichend beachtet werden [KRA b]. Für die Bewertung durch einen Nutzer spielen jedoch alle drei Kriterien eine wichtige Rolle, da sie zur Wahrnehmung gehören, die durch Kultur, eigene Erfahrungen und dem Wohlbefinden beeinflusst sind (Kapitel 1.3.3 und 1.3.4). Kramer dokumentiert aus der Planungspraxis heraus, dass Fehlervermeidung und Nutzerakzeptanz nur durch eine integrale Planung möglich ist, aber auch, dass insbesondere im Bezug zu Bildschirmarbeitsplätzen Theorie und Praxis häufig stark voneinander abweichen und die Empfehlungen und Normen nicht unbedingt den Bedürfnissen und Wünschen der Nutzer entsprechen [KRA b]. Untersuchungen zum Biorhythmus werden üblicherweise von Medizinern durchgeführt, häufig bezogen auf Schichtarbeit oder auch zur Behandlung von Krankheiten. Nur wenige Studien betrachten gesunde Nutzer an durchschnittlichen Arbeitsplätzen im Bezug zum Tageslicht.

Es gibt drei Methoden, um Aufschluss über die „richtige“ Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz zu bekommen [SCHM b]. Die physiologische Methode, die auf die Erfüllung der Sehaufgabe ausgerichtet ist und von den zu lösenden Aufgaben abhängt. Diese Methode zeigt sich im heutigen Büroalltag mit unterschiedlichen Aufgaben als wenig praxistauglich und kann eher für spezielle Aufgabenbereiche als Richtgröße fungieren. Die arbeitswissenschaftliche Herangehensweise ermittelt die Fehlerhäufigkeit bei unterschiedlichen Beleuchtungssituationen. Ergebnisse zeigen, dass grundsätzlich bei höheren Beleuchtungsstärken auch bessere Ergebnisse erzielt werden. Auch sie fokussiert auf die zu lösende Aufgabe. Die dritte Methode ist die psychologische Betrachtung. Sie verzichtet auf die Lösung von Sehaufgaben und dokumentiert den subjektiven Eindruck der Nutzer bei realen oder aber fiktiven Aufgaben.

Im Folgenden werden einige Studien ausgewertet, die sich mit Licht und dessen Auswirkung auf den Menschen am Arbeitsplatz auseinandersetzen. Im Wesentlichen sind dies Studien, die sich mit dem Thema Nutzerakzeptanz beschäftigen haben, also der psychologischen Betrachtungsweise. Viele der Untersuchungen (insbesondere zu gewünschten Beleuchtungsstärken und zur Blendung) wurden jedoch bei reinen Kunstlichtsituationen durchgeführt. Es sei angemerkt, dass bei Tageslicht sowohl die Dynamik als auch der Ausblick sowie der damit verbundene Informa-

tionsgehalt eine große Rolle spielt, und Untersuchungen zum Kunstlicht nur bedingt auf das Tageslicht übertragbar sind. Dennoch geben sie Hinweise darauf, welche Art und welches Niveau an Beleuchtung von Nutzern gut angenommen werden.

2.2 Aktueller Stand von Untersuchungen

2.2.1 Raumklima – Einflüsse auf das Wohlbefinden

Die thermische Behaglichkeit bezeichnet diejenige Raumtemperatur, bei denen sich der Mensch wohl fühlt, ihm weder zu kalt noch zu warm ist. Sie ist abhängig von Lufttemperatur, mittlerer Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte [VDI 6011]. Das Sonnenschutzsystem nimmt mitunter einen großen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit, zum einen durch die insgesamt auftreffende Strahlung und die resultierende Innenraumtemperatur aber auch durch die Oberflächentemperatur der Scheiben, die leicht als unangenehm hoch empfunden werden kann. Somit ist die thermische Behaglichkeit auch beeinflusst durch das eingesetzte Fassadensystem. Aber auch andere Faktoren wie unzureichende Abschirmung gegen Lärm, eine nicht ausreichende Luftqualität oder unzureichende Beleuchtung können zu Unbehaglichkeit im Innenraum führen.

Störfaktoren im Innenraum wurden durch unterschiedliche Forschergruppen in realen Büroräumen untersucht. Dabei hat Cakir bei Untersuchungen mit über 800 Testpersonen festgestellt, dass es die meisten Beschwerden über die Luftqualität (61%) gibt, gefolgt von störendem Lärm (60%) und unzureichender Beleuchtung (57%) (Abbildung 2.2-1) [CAK].

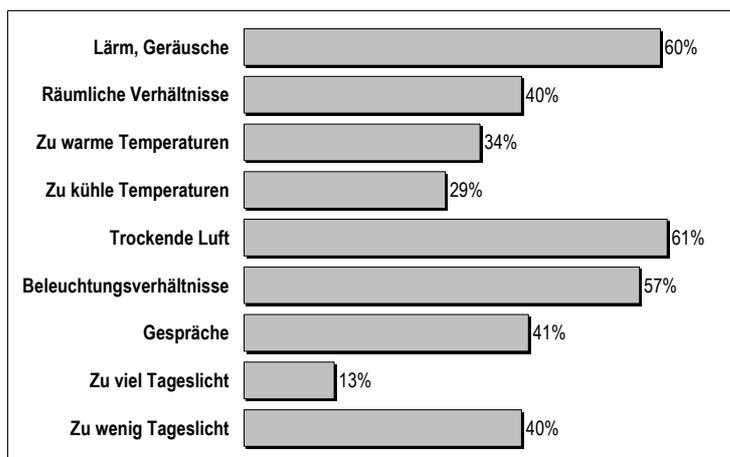


Abbildung 2.2-1: Prozentsätze der regelmäßig mäßig bis stark störenden Ursachen nach [CAK]

In einer Studie an etwa 1500 Arbeitsplätzen mit ca. 4500 Probanden zum Thema Innenraumklima in Bürogebäuden werden als wichtig erachtet: Die Lüftung von 73,4%, die Beleuchtung von 65,7% und die Innenraumtemperatur von 64,5% aller befragter Probanden [BIS]. Darüber hinaus zeigte sich ein möglicher Eingriff auf das Raumklima signifikant positiv gegenüber denjenigen Räumen, in denen kein individueller Eingriff möglich war. Die Raumzufriedenheit und Einschätzung des Raumklimas wurden als ein Prädiktor für die sensorische Befindlichkeit (Körperliches Empfinden und allgemeines vegetatives Empfinden im Moment der Befragung) klassifiziert. Nach der amerikanischen Forschergruppe Heschong Mahone Group erklärt das Raumklima mit den Faktoren Luft, Licht, Lärm und Temperatur etwa 10 bis 30% aller Varianzen der subjektiven Beurteilungen [HMG b]. Dies wurde bei einer Befragung an Büro- und Call-Center-Arbeitsplätzen festgestellt. Die Beleuchtungssituation allein wird für etwa 5% der Varianzen verantwortlich gemacht.

Insgesamt zeigt sich ein deutlicher Einfluss des Raumklimas in Abhängigkeit der individuellen Eingriffsmöglichkeiten auf das Wohlbefinden und die Akzeptanz der Nutzer.

2.2.2 Steuerung von Sonnenschutz- und Kunstlichtanlagen

Eine automatische Steuerung von Sonnenschutz führt häufig zu Störungen bei Nutzern. Die Eingriffsmöglichkeit bildet somit einen wichtigen Parameter für die Zufriedenheit am Arbeitsplatz [KRÜ]. Zudem hat das Nutzerverhalten einen Einfluss auf die Energieeffizienz. Zum Betrieb von Sonnenschutz und Kunstlichtbeleuchtung wurde bereits 1979 herausgefunden, dass die Beleuchtung, wenn sie eingeschaltet wird, meist erst wieder bei Verlassen des Gebäudes ausgeschaltet wird [HUN]. Der Grenzwert für das manuelle Einschalten lag dabei bei 500 Lux auf der Arbeitsebene. Es schien eine persönliche Präferenz an Systemeinstellungen zu geben, die sich unabhängig von Außenbedingungen darstellt. Nicht untersucht wurden bei dieser Studie die Innenbeleuchtungsniveaus.

Reinhard fand heraus, dass 40% der Büronutzer bei 400 Lux in der Arbeitsebene das Kunstlicht zuschalteten, 30% bei zwischen 400 und 800 Lux und nur 10% bei 1200 Lux [REIN]. Rea und sein Team stellten bei Untersuchungen in realen Büroräumen fest, dass über den Tag keine Veränderungen an Sonnenschutzanlagen stattfand, auch wenn sich die Lichtbedingungen änderten; Orientierung und Himmelsbedingungen schienen die Einstellungen des Sonnenschutzes zu beeinflussen, nicht jedoch die Tageszeit [REA a]; allerdings wurden hier die Innenbeleuchtungsstärken nicht aufgezeichnet. Reinhard dagegen berichtet, dass die meisten Änderungen am automatisch fahrenden, manuell jedoch zu verändernden und qualitativ sehr hochwertigen Sonnenschutz (zweigeteilt mit zusätzlichem Lichtschwert) am Morgen zugunsten von Aussicht und Tageslicht stattfanden; dies allerdings bei einem Sollwert der Beleuchtungsstärke von nur 400 Lux [REIN].

Die Zufriedenheit hängt maßgeblich von der Eingriffsmöglichkeit ab, so berichtet Vine in einem Versuch mit unterschiedlichen Steuerungsvarianten einer konventionellen Sonnenschutzanlage [VIN] im Zusammenhang mit Kunstlicht. Eine Zufriedenheit von 85% konnte mit einer manuellen Variante, von 78% mit einer halbautomatischen und nur 57% mit einer vollautomatischen Regelung erreicht werden. Dabei wurden die Eingriffsmöglichkeiten mit bis zu 93% als wichtig erachtet, die Lichtverteilung wurde bei der vollautomatischen Regelung am stärksten kritisiert, ebenso die Helligkeit im Raum. Klagen über zu wenige Eingriffsmöglichkeiten gab es auch bei Untersuchungen von Velds [VEL], die Befragungen an einem Sonnenschutz- und Lichtlenksystem durchführte und diesen aufgrund eines anderen Schwerpunktes der Studie vollautomatisch regeln ließ. Dabei beschwerten sich 24% über nicht regelbaren Sonnen- und Blendschutz und 44% über das nicht individuell einstellbare Kunstlicht. Sowohl bei der automatischen als auch bei der halbautomatischen Version wurde mit je 29% bei 500 Lux mehr Licht gefordert. Zufrieden mit der Anpassbarkeit des Lichtniveaus, also der Helligkeit waren 7% im vollautomatischen Modus, 43% im halbautomatischen und 76% im manuellen Betrieb. Die meisten Probanden empfanden die Eingriffsmöglichkeit als wichtig (zwischen 79% und 93%), am wichtigsten diejenigen im manuellen Betrieb.

Untersuchungen zum Thema Blendung durch Tageslicht [NEV a und b] zeigten die Wichtigkeit des gebauten Umfeldes und dessen Wirkung auf den Menschen; so fanden 93,8% der Befragten das physikalische Umfeld wichtig oder sehr wichtig, ebenso viele erlebten die individuellen Eingriffsmöglichkeit und 81% den Ausblick aus einem Fenster als wichtig.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die individuellen Anpassung von Sonnen- und Blendschutz sowie des Kunstlichtes die Zufriedenheit am Arbeitsplatz maßgeblich fördert.

2.2.3 Fassadensysteme und Nutzerakzeptanz

Die positiven Auswirkungen von Tageslicht auf den Menschen sind durchaus bekannt (Kapitel 1.3.4), weniger bekannt jedoch ist die Akzeptanz bei Einsatz unterschiedlicher Fassadensysteme. Nur wenige Studien hatten solche Untersuchungen zum Ziel.

Cooper berichtete bereits 1973 von Sonnenschutzgläsern, die die Lichttransmission stark verringern und auf die befragten Probanden dunkel wirkten und einen bedrückenden Ausblick nach sich zogen [COO]. Der Einsatz von elektrochromem Glas wurde von Fasano getestet, allerdings mit einer unüblichen Arbeitsplatzanordnung und einem zweiten Fenster mit Weißglas über Eck [FAS]. Dabei gab es wenig Auswirkung der bläulichen Farbe des elektrochromen Glases auf die subjektiven Bewertungen, allerdings sehr schlechte Bewertungen des eingesetzten kaltweißen Kunstlichtes. Bei reiner Tageslichtversorgung wünschten sich etwa 57% das Zuschalten von Kunstlicht und 33% mehr als 500 Lux auf der Arbeitsebene. 30% waren nicht einverstanden mit der Lichtverteilung, was allerdings durch das zweite Fenster und daher schlechten Reproduzierbarkeit an Relevanz verliert.

Aus dem Bartenbach LichtLabor in Österreich wird von vergleichenden Studien unterschiedlicher Systeme berichtet, bei denen unter anderem Leistungstests durchgeführt wurden [BAR a und b, WIT a und c]. Dabei schnitten gelochte Umlenklamellen gegenüber einem Referenzfall ohne Sonnenschutz, Umlenklamellen mit einer Lochung nur im oberen Bereich und einem Blendschutzsystem, welches die Lichttransmission deutlich verringert, am besten ab. Nicht die Beleuchtungsstärke selbst hatte dabei den größten Einfluss auf Leistung und Ermüdung, sondern die Lichtverteilung im Raum, die bei den gelochten Lamellen in der Raumtiefe am gleichmäßigsten war.

In Holland wurden zwei kleine Studien für die Realisierung eines Gebäudes in Testräumen [MEU a und b] und in einem Mock-up Raum [HEU] durchgeführt. In den Testräumen wurden hoch reflektierende Lamellen getestet, die in einer Klimafassade integriert und in Kombination mit Reflektoren an der Raumdecke eingesetzt wurden. Dabei hatten 47% der Probanden den Behang im unteren Bereich geöffnet und 67% das Kunstlicht eingeschaltet. Im Mock-up Raum kam ebenfalls eine gelochte Lamelle im Vergleich zu einer ungelochten zum Einsatz. Die gelochte Variante wurde von über 100 Testpersonen hinsichtlich der Akzeptanz besser bewertet als das konventionelle System. Insgesamt wurde festgestellt, dass, wenn frei einstellbar, die Sonnenschutzanlagen meistens mindestens im Sichtbereich zugunsten der Aussicht geöffnet wurden. Im realen Einsatz ließen 51% der Büroinsassen die Steuerung der Lamellen automatisch laufen, 35% stellen die Tageslicht- und Kunstlichtmenge manuell ein, 11% gaben ein bestimmtes Beleuchtungsniveau vor und 3% ließen die Lamellen grundsätzlich offen.

Zusammenfassend wurde die Akzeptanz unterschiedlicher Fassadensysteme bisher nur wenig untersucht. Diejenigen, die eine bessere Beleuchtung hinsichtlich Lichtniveau und -verteilung aufwiesen als dies ein konventioneller Sonnenschutz zu leisten vermag, scheinen grundsätzlich besser akzeptiert zu werden und eine bessere Leistung zu erlauben.

2.2.4 Bewertung des Beleuchtungsniveaus

Wie bereits in Kapitel 1.5.4.3 kurz beschrieben gibt es eine Diskrepanz zwischen den in den Regelwerken geforderten Mindestbeleuchtungsstärken und dem von Probanden gewünschten Beleuchtungsniveau an Arbeitsplätzen. Zahlreiche Studien wurden hierzu verfasst, die meisten jedoch unter Kunstlichtbedingungen.

Flynn hatte im Jahr 1973 bereits den Einfluss unterschiedlicher Beleuchtungsstärken auf die Bewertung von Kunstlichtszenarien untersucht [FLY]. Außer bei der „empfundenen visuellen Klarheit“ spielten diese keine große Rolle. Die Bewertung wurde vielmehr durch die Leuchtdichteverteilung im Raum beeinflusst. Je mehr Licht aus der Peripherie kam, je heller also Wände und Decken waren, und je weniger uniform das Licht war, desto freundlicher und größer wurde ein Raum bewertet. Laborversuche von Boyce zeigten einen linearen Anstieg der Leistung (Task performance) bei höheren Beleuchtungsstärken [BOY a]. Dabei wurden 100 Lux auf der Arbeitsebene subjektiv schlecht beurteilt, dann gab es einen Anstieg bis etwa 1600 Lux und einen Abfall der positiven Bewertungen ab 1600 Lux aufwärts.

Eine der wenigen Studien mit Tageslichteinfluss führte Begemann in realen Arbeitsräumen durch [BEG]. Dabei wurden die Probanden jede Stunde gezwungen, das Lichtniveau (von 200 -2000 Lux auf der Arbeitsebene) neu einzustellen. Das Lichtniveau lag allein durch Tageslicht meist bereits bei über 500 Lux. Dabei ergab sich bei den Einstellungen durch die Probanden kein Bezug zur Jahreszeit, aber ein deutlicher Bezug zu den vorherrschenden Wetterbedingungen draußen. Im Durchschnitt wurden 800 Lux (von plus 300 bis plus 1200 Lux) an Kunstlicht zum Tageslicht hinzu addiert, bei bedecktem Himmel weniger, bei klarem Himmel oder Sonne mehr. Dies konnte auch durch Völker bestätigt werden [VÖL]. War der Sonnenschutz geschlossen, wurde eher weniger Licht hinzuaddiert, war er offen, wurde eher mehr Licht gewünscht. Die horizontale Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene stellte dabei nicht das wichtigste Kriterium für die gewünschten Einstellungen dar, sondern vielmehr die vorherrschenden Kontraste. Die Menge des zugefügten Kunstlichtes korrelierte mit der Wachsamkeit. Ein weiteres Kriterium war die Raumtiefe; Arbeitsplätze am Fenster forderten ein höheres Lichtniveau als Arbeitsplätze weiter in der Raumtiefe. Insgesamt folgten die Einstellungen der Beleuchtung dem natürlichen Tagesverlauf, wurden keinesfalls über den Tag konstant gehalten und hatten immer ein höheres Niveau als in den Regelwerken vorgeschrieben. Dies konnte auch durch Juslén bestätigt werden, bei dem der Einfluss einer Lichtniveausteigerung auf die Produktivität an Industriearbeitsplätzen untersucht wurde [JUS].

Eine Befragung, die ebenfalls in realen Büroräumen mit hohem Tageslichtanteil durchgeführt wurden, ergab aus Messungen und Nutzerbewertungen den klaren Vorzug des Tageslichtes mit 69% der Probanden (19% enthielten sich einer Aussage) gegenüber dem Kunstlicht [NEV a und b]. Bezogen auf das Beleuchtungsniveau und die Verteilung des Lichtes konnten hohe Korrelationen bei den zylindrischen Beleuchtungsstärken gefunden werden, was auch bei Untersuchungen von Moosmann bestätigt wurde [MOO a]. Hier wurden im Median (repräsentiert denjenigen Werte, bei dem 50% der Urteile darüber und 50% darunter liegen) 1000 Lux als genau richtig angesehen, 500 Lux als zu dunkel. Die beste Korrelation mit der Bewertung des Beleuchtungsniveaus des Gesamtraumes konnten bei der zylindrischen Beleuchtungsstärke gefunden werden, gefolgt von einer aus dem visuellen Umfeld berechneten vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge.

Vandahl berichtet über Labormessungen ohne Tageslicht, dass 500 Lux in der Arbeitsebene nur für 64% der befragten Personen ausreichend waren [VAN]. 57% Zufriedenheit mit 500 Lux konnte auch [VIN] in Versuchen an realen Arbeitsplätzen bestätigen, mit einer Steigerung auf 71% bei 700 Lux. 90% versprachen sich durch Zuschalten einer Einzelplatzleuchte zur Allgemeinbeleuchtung Verbesserungen [VAN]. Als genau richtig wurden 1200 Lux Gesamtbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit von den Außenbedingungen gesehen (diejenigen, die aus sonnigen Verhältnissen den Raum beurteilten wünschten höhere Beleuchtungsstärken), was vorhergehende Untersuchungen unterstützt [BEG]. Die jeweils vorangegangene Lichtsituation hat Auswirkungen auf die Zufriedenheit, ebenfalls ist die individuelle Einstellmöglichkeit als Indikator für Zufriedenheit gefunden worden. In Feldversuchen wurde ein Lichtniveau von 600 – 800 Lux als gut angesehen.

Die Untersuchung an Industriearbeitsplätzen zeigt in Kurzzeitversuchen 500 Lux für 95% der Befragten als ausreichend, während Langzeitversuche höhere Beleuchtungsstärken forderten (bis 900 Lux, einem Niveau, in dem auch die empfundene „Anstrengung“ positiv bewertet wurde) [VÖL]. Die Differenz zwischen akzeptiertem und gewünschtem Beleuchtungsniveau lag dabei um 300 Lux und das Maximum der akzeptablen Beleuchtungsstärken bei 2600 Lux, das heißt, etwa das Doppelte der gewünschten Beleuchtungsstärken würde als zu hell bewertet. Der Einfluss der Außenlichtbedingungen konnte bestätigt werden, ebenso der Einfluss der Tageszeit (am Morgen 20% weniger Bedarf an Licht als am Nachmittag); ähnliche Zusammenhänge fand [VIN] mit 1000 Lux am Morgen und 1500 Lux am Nachmittag, wenn manuelle Einstellung möglich war, und auch Fleischer [FLE a und b]. Newsham untersuchte den Einfluss des über den Tag erlebten Beleuchtungsniveaus auf die individuellen Bedürfnisse im Anschluss in einem Mock- up- Raum unter Kunstlichtbedingungen [NEW]. Dabei wurde ebenfalls ein klarer Einfluss deutlich.

Diejenigen, die tagsüber weniger Licht ausgesetzt waren wünschten am Abend mehr und umgekehrt (Schwellwert bei 392 Lux). Mit den am Tag eingestellten Beleuchtungsstärken konnten 40% der Varianzen in der Beurteilung erklärt werden. Die Abweichung der tatsächlichen von der gewünschten Beleuchtungsstärke wurde dabei zum Indikator für Zufriedenheit. Diejenigen, die aufgrund von Reflexblendung auf dem Bildschirm das Lichtniveau reduzieren mussten, gaben die schlechtesten Bewertungen ab.

Die Helligkeitsbewertung korrelierte bei Versuchen von Moosmann in realen Büroräumen [MOO b] im Gegensatz zu anderen Studien [FLY] nicht mit der Leuchtdichte, der beste Zusammenhang konnte mit der zylindrischen Beleuchtungsstärke gefunden werden, ein tendenzieller Zusammenhang mit der horizontalen Beleuchtungsstärke. Die Bewertung „hell“ trat bei 100 – 3000 Lux auf. Insgesamt wurde von älteren Versuchspersonen im Gegensatz zu anderen Untersuchungen ein höheres Lichtniveau gefordert [VAN, VÖL, MOO b], das Geschlecht spielte, übereinstimmend mit anderen Versuchen, keine Rolle. Einzig [JUS] fand keine Unterschiede nach Alter.

Zusammenfassend spielt die Verteilung des Lichtes im Raum für die Beurteilung des Lichtniveaus eine Rolle. Grundsätzlich werden höhere Beleuchtungsstärken in Abhängigkeit von Wetter und Tageszeit gewünscht, als in den Regelwerken als Minimum vorgegeben. Die besten Korrelationen zur Bewertung der Helligkeit gaben die zylindrische und die vertikale Beleuchtungsstärke in Augenhöhe.

2.2.5 Blendung durch Tageslicht

Die Blendungsbegrenzung durch Tages- und Kunstlicht hat in den letzten Jahrzehnten aufgrund des Einsatzes von Bildschirmen am Arbeitsplatz immer mehr an Bedeutung gewonnen. Auch wenn die Bildschirmqualität stetig steigt und mit modernen Flachbildschirmen Reflexe und Spiegelungen nicht mehr ganz so relevant sind, so spielt Blendung im Gesichtsfeld eines Nutzers dennoch eine große Rolle (Kapitel 1.3.6).

Die Heschongg Mahone Group aus den USA berichtete bei Untersuchungen zu Büroarbeitsplätzen von einer Verschlechterung der Arbeitsleistung von zwischen 15-21%, ausgelöst durch Blendung durch Fenster [HMG b]. Verschiedene Untersuchungen [u.a. CHA, NEV] zeigten in der Vergangenheit, dass die Toleranz der Blendung sehr unterschiedlich ist, immer aber bei Tageslicht höher liegt als bei Blendung durch Kunstlicht. Dies wird begründet damit, dass Tageslicht immer auch mit einem Ausblick verbunden ist, dessen Informationsgehalt dem Nutzer sinnvoll erscheint [LAM]. Grundsätzlich scheint es jedoch nur sinnvoll, dem Nutzer eine größtmögliche individuelle Eingriffsmöglichkeit zu lassen, sein visuelles Umfeld selbst zu gestalten.

Untersuchungen aus dem Jahr 1992 zeigten, dass die Fenstergröße einen gewissen Einfluss (etwa 30%) auf die Bewertung der Blendung haben kann, wenn Arbeitsplätze direkt auf die Fenster ausgerichtet sind [BOU]. Dabei lag der kritische Wert bei etwa 40% Fensterfläche der außenliegenden Wand. Ein Vergleich der subjektiven Urteile mit dem Daylight Glare Index (DGI) zeigte, dass die subjektiven Urteile weit unter den berechneten Werten lagen, also subjektiv weniger Blendung empfunden wurde. Der Autor begründete dies mit der Tatsache, dass zum einen die Probanden an ihrem normalen Arbeitsplatz häufig keine Fenster hatten, und zum anderen der Ausblick aus dem siebten Stock des Gebäudes außergewöhnlich angenehm war. Beides könnte dazu geführt haben, dass die Bewertung weit weniger kritisch ausgefallen ist als es an anderen realen Arbeitsplätzen der Fall gewesen wäre.

In einer japanischen Studie zur Blendungsbewertung in realen Räumen unterschiedlicher Orientierung konnten zwar gute Übereinstimmungen zu simulierten Fenstern gefunden werden, die existierenden Blendformeln (Kapitel 1.5.4.7) gaben jedoch keine signifikanten Ergebnisse [IWA], ebenso wenig bei anderen Arbeiten [MOO a und b, WIE c]. Bei Untersuchungen von Nevoigt zum Thema Blendung, erstmals unter Einsatz von CCD-Kameras in Test- und realen Arbeitsräumen, wurde die in den Formeln verwendete Hintergrundleuchtdichte durch die Umfeldleuchtdichte ersetzt

und lieferte bessere Ergebnisse [NEV a und b]. Die Gesamttraumhelligkeit wurde auch bei Boubekri als wichtiges Kriterium identifiziert [BOU].

Iwata fand keine Unterschiede bei der Blendungsbewertung bezogen auf die Orientierung, der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz oder der Position im Raum. Nevoigt dagegen fand, dass meist helle Oberflächen (Wände oder Fenster) oder aber Reflexionen der Grund für Blendung waren. Der Vergleich der Fensterleuchtdichten mit den subjektiven Urteilen ließ den Schluss zu, dass 4000 cd/m^2 von fast allen Probanden als Fensterleuchtdichte akzeptabel sind. Fontoynt dagegen fand bei verschiedenen Befragungen heraus, dass die Leuchtdichte des Fensters nach Beobachtungen und Messungen bis zu $1500 - 2000 \text{ cd/m}^2$ akzeptiert wird, ebenfalls Beleuchtungsstärkeverhältnisse bis 1:30 [FON]. Moosmann untersuchte in einem Feldversuch Büroarbeitsplätze mit Tageslicht und konnte keine signifikanten Zusammenhänge zwischen subjektiv empfundener Blendung und gemessener Fensterleuchtdichte (Mittelwerte) finden [MOO a und b]. Die Gruppe „blendet“ unterschied sich dabei kaum von der Gruppe „blendet nicht“.

Die Blendung im Bezug auf die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge wurde anhand von großen uniformen Lichtquellen eines künstlichen Fensters von Osterhaus untersucht [OST]. Als Schwellwerte galten 1000 Lux zwischen bemerkbarer und störender Blendung und 3300 Lux zwischen störender und inakzeptabler Blendung. Insgesamt zeigte sich, dass die Helligkeit im visuellen Umfeld (direkte lineare Korrelation) oder aber die vertikal gemessene Beleuchtungsstärke am Auge den deutlichsten Zusammenhang mit den subjektiven Befragungen aufwies, hiermit konnten bis zu 95% der subjektiven Urteile erklärt werden. Die Frage, ob dies auch bei Tageslicht der Fall wäre, blieb bei diesen Untersuchungen offen. Eine sehr große Varianz in der individuellen Beurteilung von Blendung und dem Grad der Akzeptanz fand Velds bei Untersuchungen in Testräumen der Technischen Universität Berlin [VEL], ebenso Moosmann [MOO a und b]. Gut korrelierende Messgrößen waren ebenfalls die vertikalen Beleuchtungsstärken am Auge (Grenzwert 3750 Lux), aber auch die sichtbare Himmelsleuchtdichte (Grenzwert 3200 cd/m^2), bei denen maximal 20% die Blendung als störend empfanden. Die Trennung eines Fensters in „Lichtlenkzone“ und „Sichtzone“ ist aufgrund der geringeren Wahrscheinlichkeit von Blendung vorteilhaft bewertet worden. Die Akzeptanz von Störungen durch Blendung war abhängig von der Sehaufgabe, Computerarbeitsplätze zeigten sich gegenüber Schreibarbeitsplätzen als kritischer.

Einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Bewertung des Ausblicks und der Bewertung der Blendung konnte [MOO a und b] finden. Die Qualität des Ausblicks (natürliche Umgebung) war entscheidend für den Grad der empfundenen Blendung. Eine gute Übereinstimmung mit der Bewertung der Blendung konnte auch durch noch laufende Untersuchungen am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme gefunden werden [WIE c]. Das neu entwickelte Verfahren zur Blendungsbewertung „Daylight Glare Probability“ (DGP) bezieht die Wahrscheinlichkeit einer Störung mit ein und liefert daher bessere Korrelationen sowohl für die vertikale Augenbeleuchtungsstärke als auch für von einer neu entwickelten Software herausgefilterte Blendquellen.

Insgesamt zeigt sich bei der Bewertung der Blendung nach wie vor eine große Unsicherheit. Die geltenden Formeln sind, insbesondere bei komplexeren Systemen, nicht anwendbar. In den Untersuchungen wurden Grenzwerte von 1500 bis 4000 cd/m^2 Fensterleuchtdichte ca. 3500 Lux vertikaler Beleuchtungsstärke auf dem Auge gefunden, die von Probanden als akzeptabel bewertet wurden Grundsätzlich gibt es gegenüber einer Blendung durch Tageslicht eine größere Toleranz als bei Kunstlicht in Abhängigkeit der Qualität der Aussicht..

2.2.6 Ausblick und Tageslicht

Der Ausblick ist insbesondere für die Psyche des Menschen von großer Bedeutung (Kapitel 1.3.4), da er Information über Wetter und Tageszeit liefert [LAM]. Nachdem insbesondere in den USA in den siebziger Jahren fensterlose

Gebäude propagiert wurden, hat es eine Vielzahl von Studien zur Aussicht gegeben, die Collins innerhalb einer Literaturstudie 1976 veröffentlicht hat [COL]. Einige Schlüsselergebnisse sollten hier genannt sein.

In Schulen gaben Kurzzeitstudien keinen Aufschluss über Leistungsunterschiede in fensterlosen oder aber Klassen mit Fenstern. Erst nach einem Jahr gab es vermehrt Differenzen gegenüber den Klassen mit Fenstern; Schüler nahmen die Außenwelt weniger wahr und beschwerten sich insgesamt häufiger. Deutlich war der Wunsch der Schüler nach Ausblick im Gegensatz zu den Lehrern. Kommentare zu fehlenden Fenstern in Büroräumen waren unter anderem das fehlende Tageslicht, eine schlechte Belüftung, der fehlende Kontakt zur Außenwelt bezogen auf Wetter und Aussicht, Gefühle von Beklemmungen sowie Spannungen und Depressionen. Collins resümiert, dass diejenigen Befragten, deren Bewegungsfreiheit und soziale Kontakte eingeschränkt waren, z.B. auf Intensivstationen in Krankenhäusern oder in sehr kleinen Büros, stärker nach der Präsenz von Fenstern und Stimulation verlangten [COL].

Dass der Ausblick positive Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit haben kann, fand auch die Heschongg Mahone Group in den USA bei Untersuchungen an Büro- und Call-Center Arbeitsplätzen heraus, bei denen eine Leistungssteigerung von zwischen 6 und 25% auftrat. Zusätzlich war die Müdigkeit abhängig vom fehlenden Ausblick [HMG c]. Die Mindestfensterfläche und das Fensterformat im Hinblick auf die Zufriedenheit wurden von anderen Forschergruppen untersucht. Die größte Zufriedenheit lag dabei bei 50-80% Fensterfläche [LUD] bzw. mindestens 35% [NE'E].

Ein weiteres Kriterium bildet die Qualität des Ausblicks. In Untersuchungen von Markus [MARK a und b] bevorzugten 88% der Probanden den Ausblick auf eine Landschaft oder ferne Stadt im Gegensatz zu einem Ausblick auf gegenüberliegende Gebäude oder aber nur den Himmel. Ähnliche Ergebnisse berichten auch Ludlow [LUD] und Inui [INU] sowie Moosmann [MOO], in deren Studie sich 95% der Probanden durch gegenüberliegende Gebäude gestört fühlten. Dabei spielte die Komplexität des Ausblicks ebenfalls eine Rolle [LUD, LIT]. Die Zufriedenheit mit der Größe des Fensters hängt von der Qualität des Ausblicks ab [INU]; so würden Probanden die Wirkung von Offenheit oder Geräumigkeit zugunsten eines weniger monotonen Ausblicks einschränken. Der Grad der empfundenen Blendung [MOO] und die Akzeptanz von zu einem Atrium hin gerichteten Arbeitsplätzen [SCHMI], die nur dann als gut gewertet wurden, wenn ein ausreichender Kontakt zu den Außenbedingungen vorhanden war, bilden weitere Kriterien für einen guten Ausblick. Die wichtigsten Faktoren jedoch bildeten die Information über das Wetter und die zeitliche Information, was auch Lam bereits dokumentiert hat [LAM]. Die Privatheit müsste jedoch gewährleistet sein, das zeigten Ergebnisse von Ludlow [LUD].

Für 95% wäre ein Arbeitsplatz ohne Fenster nicht denkbar antworteten Probanden bei Untersuchungen von Moosmann [MOO], Cakir berichtet über den Mangel an Tageslicht, der bei 40% der Büronutzer in einer deutschlandweiten Studie empfunden wird. Je weiter entfernt die Probanden dabei vom Fenster saßen desto eher gab es Unzufriedenheit und gesundheitliche Beeinträchtigungen, dies berichtet auch Christoffersen, hier wünschten sich sogar viele Nutzer direkte Sonne am Arbeitsplatz in mindestens einer Jahreszeit [CHR]. Nevoigt befragte Büronutzer nach den Bevorzugten Lichtquellen, dabei gaben 69% der Probanden Tageslicht an [NEV]. Selbst bei Störungen durch Blendung bevorzugten Büronutzer Fensterarbeitsplätze, dies wurde in einer dänischen Studie mit über 1800 Probanden festgestellt [CHR]. Eine amerikanische Studie hatte Untersuchungen an Arbeitsplätzen mit und ohne Fenster zum Inhalt [FIG]. Im Ergebnis suchten die Angestellten an Fensterarbeitsplätzen weniger Ablenkung durch Kontakt zu Kollegen oder Telefonate, arbeiteten also konzentrierter. Die genauen Ursachen hierfür mögen unter anderem im Sichtbezug nach außen zu suchen sein.

Littlefair beschreibt den Ausblick als fundamentales Bedürfnis von Menschen in Arbeitsräumen [LIT]. Auch wenn Tageslicht durch lichtlenkende Systeme bereitgestellt wird, sollte dennoch genügend transparente Fläche vorhan-

den sein, um einen zufrieden stellenden Ausblick zu gewährleisten. Lichtlenkende undurchsichtige Elemente werden daher für das obere, nicht in Augenhöhe eines Nutzers befindliche Drittel vorgesehen. Bei Elementen, die den Ausblick einschränken (Jalousien oder holografische Elemente) wird der Grad an Störung durch die Nutzung, die Größe und Aufenthaltszeit mit beeinflusst.

2.2.7 Produktivität

Die Produktivität bildet nicht nur an Industriearbeitsplätzen ein wichtiges Kriterium, sondern auch an Büroarbeitsplätzen, denn den größten Anteil an Ausgaben für Bürogebäude bildet das Personal (Kapitel 1.4.5). Eine nur geringe Effizienzsteigerung kann also deutliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit haben.

In einem Report von Philips Lighting aus dem Jahr 2003 [BOM a und b, BEL] wird ein Beispiel aus der Industrie genannt, in dem das Lichtniveau in der Metallverarbeitenden Industrie verändert wurde. Ein Anheben des Niveaus von 300 Lux auf 500 Lux steigerte die Produktivität (das heißt, eine geringere Fehlerquote und schnellere Arbeit) um 8 bis 11%, ein Anheben auf 2000 Lux gar um 20 %. Ähnliche Ergebnisse zeigen Juslén [JUS], Reitmaier [REI] und Guth [GUT], die von höheren Montagegeschwindigkeiten bzw. einen positiven Effekt auf Schlaf und Leistungsbereitschaft während Nachtschichten an Industriearbeitsplätzen berichteten.

In Laborversuchen ohne Tageslicht wurde die Leistungssteigerung einer besseren Beleuchtung an Büroarbeitsplätzen untersucht, dabei hatte selbst eine Steigerung von 300 Lux auf 500 Lux am Arbeitsplatz schon positive Auswirkungen auf Leistungsfähigkeit und subjektives Empfinden [MAR]. Bei steigender Qualität des Bildschirms wurde auch die Beleuchtung höher eingestellt.

Figueiro untersuchte mit ihrem Forschungsteam die Auswirkungen von Licht auf das Verhalten der Angestellten in realen Büros mit Fensterarbeitsplätzen [FIG]. Es zeigte sich, dass Angestellte mit Fensterarbeitsplätzen mehr am Computer arbeiteten, weniger mit Kollegen sprachen und weniger telefonierten als die Kollegen im Inneren der Gebäude, was auf eine insgesamt höhere Produktivität schließen ließ. Dabei wiesen Fensterarbeitsplätze im Gegensatz zum Gebäudeinneren mit bis 400 Lux am Arbeitsplatz Beleuchtungsstärken von über 2500 Lux auf.

Boyce führte eine ausführliche Literaturstudie u.a. zu den Themen Produktivität und dessen Zusammenhang mit der Beleuchtung durch [BOY b]. Die Produktivität bzw. Leistungsfähigkeit eines Angestellten ist demnach abhängig vom subjektiven Wohlbefinden, es konnte kein Nachweis zwischen Tageslichtverfügbarkeit und der momentanen Stimmung gefunden werden, auch wenn angenommen wird, dass Tageslichtverfügbarkeit weniger schlechte Laune produziert. Die Verbindung zwischen Zufriedenheit und Leistungsfähigkeit scheint unklar, wenn auch das Arbeitsumfeld tatsächlich einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat, wenn es direkt abgefragt wird. Die Zufriedenheit mit der Arbeitsumgebung ist abhängig von der Zufriedenheit mit der Lüftung, dem Licht und der Privatheit, wie es in Kapitel 2.2.1 schon beschrieben wurde. Die Zufriedenheit mit dem Gebäude und die Produktivität hängen von der Gebäudetiefe ab, wobei ein Wert von 15 m als die kritische Grenze galt.

Insgesamt zeigt sich, dass die Produktivität und Leistungsfähigkeit bei Tageslichteinfall und Aussicht, aber auch bei höheren Lichtniveaus gesteigert werden kann. Eine gute Tageslichtbeleuchtung am Arbeitsplatz trägt demnach, neben einem gemindertem Energieverbrauch, zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch höhere Produktivität bei.

2.2.8 Raum- und Lichtwirkung

Das Wohlbefinden am Arbeitsplatz hängt unter anderem von der Lichtverteilung, der Raumwirkung und der Art und Farbe der Lichtquelle ab (Kapitel 1.3.4 und 1.3.5), ebenso wird Tageslicht dem Kunstlicht grundsätzlich vorgezogen (Kapitel 1.3.7). Die Raumwirkung hat also Auswirkungen auf die Akzeptanz.

Bodmann führte 1995 eine Studie zur Akzeptanz unterschiedlicher Kunstlichtquellen am Arbeitsplatz durch [BOD]. Acht verschiedene Beleuchtungsanlagen wurden von etwa 40 Probanden als eher künstlich (als natürlich), eher eintönig (als farbig), eher ermüdend (als belebend) und eher belastend (als entspannend) bewertet. Sehr stark wurde der Mangel an Tageslicht bemängelt. Über die klare Präferenz von Tageslicht gegenüber dem Kunstlicht wurde auch in Untersuchungen von Cakir berichtet [CAK].

Fleischer fand heraus, dass die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene von untergeordneter Bedeutung ist, sondern vielmehr die Verteilung im Raum den Ausschlag für die Bewertung gab [FLE a und b]. Das Helligkeitsniveau und die Verteilung im Raum wurden bei Untersuchungen von Bodmann [BOD] tendenziell bei den Anlagen mit Indirektanteil oder reinen Indirektanlagen besser bewertet als bei direkt abstrahlenden Beleuchtungsvarianten. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Beurteilungen der Helligkeitsverteilung und den lichttechnischen Kenngrößen (Mittelwert in der Nutzebene, Gleichmäßigkeit der Leuchtdichten an den Raumumschließungsflächen) konnte bei dieser Untersuchung nicht festgestellt werden. Starke Arbeitsbeeinträchtigungen traten bei der reinen Direktanlage auf, asthenopische Beschwerden, also Augenbeschwerden, die nach Erbringung hoher Sehleistung auftreten, gab es nur bei den Indirektbeleuchtungsanlagen nicht. Eine Präferenz der mindestens teilweise indirekten Anlagen wurde auch von Polle berichtet [POL]. Seine Ergebnisse zeigten, dass bezogen auf die Bewertung der Helligkeit grundsätzlich helle Oberflächen besser bewertet werden als eine reine direkte Beleuchtung, am besten wurde die Kombination indirekte Beleuchtung der Wand mit einer Akzentuierung der Arbeitsfläche bewertet. Als Fazit dieser Studie kann genannt werden, dass die Leuchtdichten an der Wand mehr zur Helligkeitsbewertung beitragen als die der Decke. Werden die flächigen Leuchtdichten durch Akzentuierung ergänzt hebt dies den Helligkeitseindruck.

Eine Studie in den USA beinhaltete verschiedene Direkt- und Indirektanteile einer künstlichen Beleuchtung mit 181 Probanden und Räumen mit Ausblick, aber einer eingeschränkten Tageslichtversorgung [BOY c]. Vier unterschiedliche Formationen wurden untersucht, direkte-/ indirekte Beleuchtung, indirekte Wandbeleuchtung, Ein- und Ausschalten und individuell gedimmte Beleuchtung. Die Ergebnisse zeigten ebenfalls eine klare Präferenz der Direkt-/ Indirektbeleuchtung mit zusätzlicher individueller Dimmung. Das stärkt die Aussage über eine Akzentbeleuchtung von Polle, der über den Einfluss der Akzentuierung von Arbeits- und/ oder Wandfläche auf das persönliche Wohlbefinden berichtet hat [POL]. Die Attraktivität einer Beleuchtungsanlage wurde dabei mit zusätzlicher Akzentbeleuchtung am besten eingeschätzt, am stärksten an der Wand und in Kombination von Akzentbeleuchtung Wand und Arbeitsfläche, egal bei welcher Grundbeleuchtungsart; allerdings spielt die Information der akzentuierten Flächen dabei eine Rolle (z.B. Bilder). Eine Aktivierung wurde am besten erreicht mit einer mindestens anteilig indirekten Grundbeleuchtung in Verbindung mit einer Akzentbeleuchtung von Wand und Arbeitsebene. Schlecht wurden die Situationen ohne Akzentuierung bewertet, die Auswirkungen auf das Wohlbefinden gestalteten sich ähnlich. Die schon zitierte Studie von Cakir lieferte ähnliche Ergebnisse bei einer Untersuchung von Allgemein- und Einzelplatzbeleuchtung [CAK]. Eine reine Einzelplatzbeleuchtung wurde dabei zwar als angenehm empfunden aber auf die Wirkung des Gesamtraumes als eher ungünstig bewertet, so zeigte sich die Kombination aus Einzelplatzleuchte und Deckenbeleuchtung als die beste Kunstlichtlösung.

Innerhalb des „Lighting Harmony Projektes“ [FLE a und b] wurde die Wirkung von Direkt- und Indirektanteilen der Beleuchtung ebenfalls untersucht. Ziel war, herauszufinden, ob die Änderung von Lichtszenarien bei gleich bleibender Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene (500 Lux) das Wohlfühlen beeinflussen kann. Laboruntersuchungen zeigten, dass Lichtszenarien am besten gefielen, wenn Beleuchtungsstärken höher und mehr Direktanteil gefahren wurde. Die Wachheit stieg bei mehr Licht und höherem Direktanteil; dieser wirkte sich auch bei gleich bleibenden Beleuchtungsstärken aus. Als „dominant“ wurden hohe Beleuchtungsstärken mit 50% Indirektanteil empfunden, geringere Beleuchtungsstärken galten als „untergeordnet“ und „nicht einladend“.

Die Wichtigkeit der Veränderung von Licht über den Tag für das Wohlfühlen und die Leistungsfähigkeit wurde unter anderem von Philips Lighting erforscht [TEN, BEG]. Boyce stellte fest, dass es nicht gleichgültig ist ob Kunstlicht oder Tageslicht verändert wird, da die Veränderung des Kunstlichtes vorhersehbar ist [BOY d]. Über die Dynamik des Tageslichtes und die daraus resultierenden individuellen Beleuchtungsniveaus wurde bereits in Kapitel 2.2.4 berichtet.

Zusammenfassend zeigt sich wieder die klare Präferenz des Tageslichtes gegenüber dem Kunstlicht. Die Verteilung des Lichtes im Raum spielt für die Raumwirkung eine größere Rolle als die absolute Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz. Hier ist eine indirekte Beleuchtung, das heißt, die Erhellung von Oberflächen wie Wand und Decke, der direkten vorzuziehen. Zusätzlich sorgt eine Akzentbeleuchtung an Wänden und Arbeitsplatz abhängig vom Informationsgehalt für ein interessanteres visuelles Umfeld und kann für mehr Wachheit sorgen.

2.2.9 Auswirkungen auf die Gesundheit

Die Auswirkungen von Licht auf die Gesundheit des Menschen wurden in Kapitel 1.3.9 im Überblick dargestellt. Viele Studien wurden im Labor und mit kranken Personen oder im Bezug auf Wachheit und Wohlbefinden während der Nachtschicht oder bei langen Flügen durchgeführt. Nur wenige Untersuchungen befassen sich mit realen Arbeitsplätzen und gesunden Probanden und dem Einfluss von Licht bzw. Tageslicht. Einige Beispiele, die einen Hinweis auf den Einfluss des Lichtes auf den gesunden Menschen liefern können, werden hier aufgeführt.

Winterdepressionen und die positive Wirkung von Licht sind in der Medizin lange bekannt. Grünberger führte 1993 in Österreich eine Untersuchung an gesunden Personen durch, dessen Ziel es war, herauszufinden, ob auch gesunde Personen durch sehr helles Licht über einen gewissen Zeitraum einen positiven Einfluss erfahren [GRÜ]. Dabei wurden 15 Personen über 4 Stunden zwischen 9 und 15 Uhr 2500 Lux bzw. 500 Lux ausgesetzt und verschiedene Tests ausgeführt. Das Ergebnis zeigte unter Beeinflussung von biologisch relevanten Beleuchtungsstärken insgesamt eine Verbesserung der Aufmerksamkeit und Konzentration auf der einen Seite und des Antriebs und Wohlbefindens auf der anderen Seite.

In zwei schwedischen Studien [KÜL a und b] wurden zum einen Arbeitsplätze mit tageslichtweißen (5500K) und neutralweißen Lampen (4100K), und zum anderen unterschiedliche Beleuchtungsfarben in Schulklassen untersucht. Erstere Studie beinhaltete die Untersuchungen über ein halbes Jahr (Winterhalbjahr) mit 50 Probanden in zwei identischen Zeichenbüros. Grundsätzlich hatten die Personen mit der tageslichtweißen Beleuchtung weniger Probleme mit Ermüdungserscheinung oder Sehstörungen als diejenigen in Räumen mit konventionellen Leuchtstoffröhren. Interessant ist hier, dass die dem Tageslichtspektrum ähnlichen Lampen zwar im Winter bei den Probanden Melatonin (Schlafhormon) unterdrücken konnten und somit für mehr Wachheit und Aktivität führten, der Effekt im Sommer jedoch durch Müdigkeit und in der Stimmung geminderte Phasen wieder reduziert wurde, während die Personen unter normalem Licht im Sommer deutlich mehr Cortisol (Stresshormon) produziert haben als im Winter, deren Stimmung jedoch zwischen den natürlichen Jahreszeiten wenig schwankte. Das heißt in der Folge, dass durch die künstliche Beeinflussung des jährlichen Rhythmus eine Phasenverschiebung eingetreten ist, die den natürlichen Rhythmus durcheinander gebracht hat, dass es im Sommer mehr Licht gibt; ob diese zu begrüßen ist bleibt fraglich.

Die zweite Studie [KÜL b] wurde in vier Klassenräumen mit über 100 Schülern im Alter von acht bis neun Jahren durchgeführt. Dabei kamen Fenster, Oberlichter und Räume ohne Tageslicht, aber mit verschiedenen Kunstlichtfarben (Tageslichtweiß mit 5500 K und konventionelle Leuchtstoffröhren mit 3000 K) zur Beobachtung. Es zeigte sich, dass die Konzentration von Cortisol in der Klasse ohne Tageslicht und mit warmweißem Kunstlicht am niedrigsten war und eine Verschiebung der jahreszyklischen Konzentration nach dem Winter nach sich zog. Die Konzentration und Aufmerksamkeit war insgesamt besser in den Klassen mit Fenstern. Die tageslichtweiße Beleuchtung hatte

einen günstigeren Einfluss auf den Zustand der Kinder. Insgesamt zeigt die Studie den günstigen Einfluss von Tageslicht bzw. tageslichtähnlicher Beleuchtung auf den circadianen Rhythmus, aber auch auf den annualen Rhythmus auf, der bei ausschließlich durch konventionelles Kunstlicht beleuchteten Räumen ungünstig beeinflusst wurde. Boyce kritisierte die Studie aufgrund ihrer nicht zur Gänze nachvollziehbaren Schlussfolgerungen jedoch methodisch [BOY b]. Ähnliche Ergebnisse wie bei den schwedischen Studien lieferte auch eine in den USA durchgeführte Studie [HMG b], die jedoch ebenfalls methodisch kritisch bewertet wurde und einem Re-Analyseprozess unterzogen wurde, der die Ergebnisse des ersten Umlaufs relativierte. Das Tageslicht schien dabei eine positive Auswirkung auf Leistung und Gesundheit der Schüler zu haben, unabhängig davon, ob es über Oberlichter oder Fenster in dem Raum gelangte.

Brainard untersuchte die Auswirkungen von biologisch aktivierendem Licht hinsichtlich seiner Einsetzbarkeit im Büro und der finanziellen Auswirkungen [BRA a]. Untersucht wurden 2 Büros ohne Fenster, in denen nachts gearbeitet wurde. Dabei wurde festgestellt, dass der aktivierende Effekt bei 800-1500 Lux auf dem Auge erst beginnt, was einer Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene von zwischen 1600 und 3000 Lux entspricht. Demzufolge gäbe es einen deutlich höheren Energieverbrauch zu verzeichnen. Brainard kommentierte hierzu, dass die biologische Aktivierung auch vom Spektrum abhängt und somit die Beleuchtung entsprechend optimiert werden könnte, um Kosten wiederum zu senken.

Die Befragungen von Cakir zeigten auch im Hinblick auf gesundheitliche Beeinträchtigungen und Störungen des Wohlbefindens eine klare Tendenz zur Tageslichtnutzung [CAK]. Dabei wurde die Entfernung eines Arbeitsplatzes vom Fenster als das wichtigste Kriterium herauskristallisiert. Je weiter entfernt vom Fenster desto höher war der Grad an gesundheitlichen und befindlichen Beeinträchtigungen wie Sehbeschwerden, Augenbrennen, Konzentrationschwäche, rasche Ermüdung, Reizbarkeit, Kopfschmerzen und Benommenheit. Gesundheit und Wohlbefinden hängen demnach stark von der Lichtquelle (natürlich oder künstlich) und der Art der Kunstlichtbeleuchtung (Einzelplatz, Deckenbeleuchtung oder beides) ab. Tageslicht weist dabei grundsätzlich unabhängig vom verwendeten Arbeitsmittel positive Einflüsse auf.

Eine Studie über den Einfluss von hellem Licht auf gesunde Menschen wurde im Jahr 2000 veröffentlicht [PAR]. Dabei ging es um den möglichen Einfluss auf Stimmung und Wohlbefinden von etwa 2500 Lux (vertikal auf Augenhöhe) im Winter für jeweils eine Stunde an 5 Tagen die Woche (Uhrzeit unabhängig, 6500 K). Etwa 160 Probanden dreier Firmen wurden zu diesem Zweck herangezogen; sie dokumentierten zu Beginn der Befragungen ihr Interesse an hellem Licht, weshalb die Ergebnisse nicht so ohne weiteres auf die Allgemeinbevölkerung zu übertragen sein mögen. Fast die Hälfte der Probanden wies die Kriterien einer Winterdepression auf. In fast allen Fällen wurden die depressiven Faktoren durch das Licht gemindert, wovon die meisten nach Beendigung des Versuchs wieder auftauchten. Die Belichtung hatte ebenso einen Einfluss auf die Stimmung der Personen in den Büros, unabhängig davon, ob sie Symptome des Lichtmangels aufwiesen oder nicht. Kritisch ist, dass es keinerlei Messungen oder aber Untersuchungen zum Placeboeffekt innerhalb dieser Studie gegeben hat. Der Einfluss einer möglichen Phasenverschiebung wurde in diesem Rahmen nicht untersucht.

Laboruntersuchungen unter verschiedenen Kunstlichtquellen (bei gleichzeitigen Farbmessungen von Tageslicht und Kunstlicht) wurden von Witting veröffentlicht [WIT b und c]. Dabei wurde die Lichtverteilung bei Tageslicht und Kunstlicht durch eine Lichtdecke weitgehend gleich gehalten und nur die spektrale Verteilung des Kunstlichtes bei gleich bleibender Beleuchtungsstärke variiert. Ergebnisse zeigten eine deutlich schlechtere Leistung und höhere Bearbeitungszeit bei warmweißem Licht im Vergleich zu hellweißem, aber auch zu tageslichtweißem Licht. Begründet wird dies unter anderem mit den Farbwiedergabeeigenschaften der Lichtquellen, die, wenn zu sehr ins Rot oder Blau tendierend, zu höherer Belastung führen. Zur Optimierung der Sehleistung an Bildschirmarbeitsplätzen wurden daher Farbtemperaturen von 3500 bis 4500 K vorgeschlagen.

Insgesamt zeigt sich das Tageslicht gegenüber dem Kunstlicht gesundheitszuträglich. Die Auswirkung der Farbtemperatur auf die Leistungsfähigkeit bzw. Ermüdung wurde dokumentiert. Helleres Licht hat positive Auswirkungen auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit sowie auf die Stimmung. Die jahreszeitliche Phasenverschiebung ist in nur einer Studie untersucht worden und bietet einen Hinweis darauf, dass der natürliche Rhythmus nicht ohne Folgen verändert werden kann.

2.2.10 Lichtfarbe / Lichtspektrum

Licht in Innenräumen soll die realen Farben möglichst genau wiedergeben können (Kapitel 1.5.4.8). Licht, welches den Menschen blass erscheinen lässt wird im Allgemeinen zu Beschwerden führen. Außer diesem sehr praktischen Effekt haben Lichtfarbe und Lichtrichtung auch einen Einfluss auf die Raumatmosphäre und sogar eine emotionalen Auswirkung (Kapitel 1.3.5). Eine eher kühle Farbe wird eher einen geschäftlichen Eindruck erwecken während eine warme rötliche Farbe eher beruhigend und entspannend wirken kann [BOM].

Eine Überprüfung der bekannten und häufig verwendeten Kruithofkurve [LAN] anhand von Befragungen an 40 Testpersonen in einem normalen Konferenzraum ohne Tageslicht führte Davis mit seinem Team durch [DAV]. Dabei wurden Leuchtstoffröhren mit 2750 K und 5000 K genutzt, die beide einen Farbwiedergabeindex von zwischen 89 und 90 aufwiesen und in eine Lichtdecke integriert waren. Dabei zeigte sich, dass einzig das Lichtniveau einen Einfluss auf die Präferenzen der Probanden hatte, nicht jedoch die Lichtfarbe. Das Lichtniveau hatte ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf das Helligkeitsempfinden. Die Lichtfarben in ihrer Wirkung wurden klar unterschieden, hierbei wurden warme Farben bei höheren Beleuchtungsstärken präferiert, dies im Gegensatz zu Kruithof (Kapitel 1.3.5). Ebenso hatte die wärmere Lichtfarbe eine positive Auswirkung auf die Bewertung von „farbig - nicht farbig“, ebenso wie die Lichtniveaus, deren höhere Niveaus ebenfalls bessere Bewertungen nach sich zogen, dass gleiche passierte bei der Bewertung der Hautfarbe, die bei warmen Lichtfarben als natürlicher bewertet wurden.

Ähnliche Ergebnisse lieferte eine Schwedische Studie [KÜL c], bei dem ebenfalls zwei Lichtfarben (warmweiß und tageslichtweiß) auf zwei Beleuchtungsniveaus untersucht wurden. Tageslichtweiß in Kombination mit hohem Lichtniveau wurde durchweg schlechter bewertet, sowohl auf den visuellen Komfort als auch auf die soziale Bewertung des Raumes bezogen. Dagegen hatte das höhere Beleuchtungsniveau (1700 Lux im Gegensatz zu 450 Lux) eine positive Wirkung auf die Wachheit, was zu der Annahme führte, dass Nutzer hohen Beleuchtungsstärken mit tageslichtweißen Leuchten aufgrund des höheren Stressniveaus nicht andauernd ausgesetzt sein sollten. Da die Experimente ohne Tageslicht durchgeführt wurden, mag auch hier ein Einfluss auf das Stressniveau zu suchen sein.

Die bereits im Kapitel 2.2.4 bezogen auf das Beleuchtungsniveau beschriebene Studie [BEG] beinhaltete neben dem Beleuchtungsniveau auch die Untersuchung der Farbtemperaturen des Kunstlichtes. Hierbei war die Farbe des Lichtes in einem Farbtemperaturbereich von 2800 – 5000 Kelvin frei einstellbar. Das Kunstlicht wurde im Ergebnis in seiner Farbe nicht dem Tageslicht angepasst. Allerdings konnte eine Verbindung zwischen Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe hergestellt werden. Diese wurde bis zu 4300 K erhöht, wenn die Beleuchtungsstärken in der Arbeitsebene 1500 Lux überschritten, bei nur 500 Lux Beleuchtungsstärke wurden Farbtemperaturen von um 3300 Kelvin gewählt. Diese Untersuchung korrespondiert mit der bekannten Kruithofschen Behaglichkeitskurve [LAN] im Gegensatz zu anderen Untersuchungen. Keinen erkennbaren Trend gab es zur bevorzugten Lichtfarbe unabhängig von der Beleuchtungsstärke, weder auf das Alter noch auf das Geschlecht von Probanden bezogen.

Fleischer untersuchte ebenfalls die Auswirkungen unterschiedlicher Lichtfarben [FLE b]. Das Wohlbefinden wurde bei denjenigen Einstellungen am besten bewertet, die abhängig von den Außenlichtbedingungen gefahren wurden; am meisten Einfluss des Lichtes gab es am Nachmittag im Gegensatz zum Morgen (Kapitel 2.2.4). Bei Untersuchungen zur Wachsamkeit wurde klar, dass, je kürzer der Tag, umso mehr Licht aktivierend wirkt. Hierbei wurde das an die Außenlichtbedingungen gekoppelte Lichtszenario ebenfalls am besten bewertet. Die deutlichsten Diffe-

renzen für die Aktivierung gab es, wenn es außen bewölkt und im Innenraum ein hoher Direktanteil gefahren wurde. Darüber hinaus wurden rein subjektive Kriterien untersucht. Ein großer Indirektanteil wurde in Kombination mit warmweißem Licht dabei positiv gewertet (Pleasure). Bezogen auf die Wachheit wurde Tageslichtweiß unabhängig von der Lichtverteilung besser bewertet. Die Lichtfarbe gab sich dominant gegenüber der Lichtverteilung.

Insgesamt zeigt sich die Auswirkung der Lichtfarbe auf die subjektive Beurteilung der befragten Probanden unklar, mal wurden kältere, mal wärmere Lichtfarben bevorzugt. Auch die Abhängigkeit mit der Kruithof Kurve sind nicht einheitlich. Der Grund mag möglicherweise in den unterschiedlichen Raumboflächen liegen (Anmerkung der Autorin). Das Lichtniveau scheint größere Auswirkungen auf die Beurteilungen zu haben als die Lichtfarbe.

3 Aufgabe und Ziel dieser Arbeit

3.1 Problemstellung

Für das „Funktionieren“ eines Gebäudes sind unterschiedliche Maßnahmen erforderlich. Aus energetischer Sicht zählen hierzu die Lüftung, Heizung, Kühlung und die optimierte Kombination von Kunstlicht und Tageslicht sowie eine auf alle Gebäudekomponenten abgestimmte Steuerung und Regelung der Gebäudetechnik (Kapitel 1.4.3.4). Eine Vielzahl von technischen Lösungen ist zu diesen Themen auf dem Markt. Häufig scheitert die Umsetzung jedoch an der fehlenden integralen Planung, also der Einbeziehung aller am Bau beteiligten Disziplinen von Beginn an, oder an kurzfristig gedachten Investitionen (Kapitel 1.4.6). Das Wohlbefinden im Raum jedoch hängt von vielfältigeren Faktoren ab. Hierzu zählen: Die Raumgestaltung insgesamt, die Gestaltung des Arbeitsplatzes, thermische Bedingungen, so z.B. die Wärmeabstrahlung von Glasfassaden, aber vor allen Dingen auch die (Tages-) Lichtqualität sowie der Bezug zum Außenraum (Kapitel 1.3.4). Darüber hinaus zählen auch so genannte weiche Faktoren wie zum Beispiel die Freude an der Tätigkeit sowie der individuelle Seelenzustand und der jeweilige Erfahrungshorizont zu den wichtigen Faktoren, diese jedoch sind weitgehend unabhängig von der architektonischen Qualität eines Gebäudes (Kapitel 1.3.3).

Viele dieser Bedingungen haben oft widersprüchliche Auswirkungen, so zum Beispiel die Ziele des Sonnenschutzes zur Vermeidung von Überhitzung und der Ausblick, der eine möglichst ungehinderte Sicht nach außen verlangt (Kapitel 1.4.3). Die thermische Behaglichkeit ebenso wie die Reaktion des Menschen auf Lüftung bzw. Zugerscheinungen wurde eingehend untersucht. Hier konnte man bereits sehr genaue Grenzwerte aufstellen. Für die Beurteilung von Licht bzw. Tageslicht ist dies aufgrund der komplexen psychologischen und physiologischen Wirkung und der Dynamik des Tageslichtes schwieriger und wurde daher meist auf Kunstlicht basierend untersucht (Kapitel 2.2).

Die gesetzlichen Regelungen besagen im Bezug auf die Tageslichtnutzung nur, dass bestimmte Tageslichtquotienten je nach Nutzungsart einzuhalten sind. Diese basieren hauptsächlich auf dem Verglasungsanteil und der Lage im Raum. Dieser Wert jedoch trifft nur eine Aussage bei bedecktem Himmel und lässt die aktiven Systeme für den Sonnenschutz außen vor. In den gängigen Richtlinien (Kapitel 1.5.3) finden sich Aussagen über die Forderungen nach dem Ausblick ins Freie und über geeigneten Sonnen- und Blendschutz. Ungeklärt bleibt die Frage des aktivierten bzw. geschlossenen Sonnenschutzes.

Im Einführungsteil wurde die Bedeutung des Tageslichtes für den Menschen bereits beschrieben (Kapitel 1.3). Heutzutage verbringt der Berufstätige seinen Arbeitstag meist vollständig in geschlossenen Räumen. Daher stellt das Licht am Arbeitsplatz eines der wichtigsten Kriterien für Arbeitsplatzqualität dar. Insbesondere die in den letzten Jahren vermehrt auf den Markt gekommenen komplexen Tageslicht- und Sonnenschutzsysteme zeichnen sich verantwortlich für eine geringere Überhitzung im Raum, die Tageslichtqualität bei geschlossenen oder aktiven Systemen und deren Auswirkungen auf den Nutzer jedoch wurde bisher nur unzureichend geprüft (Kapitel 2.2). Nur wenige Untersuchungen hatten die komplexeren Fragestellungen zum Thema Tageslichtqualität zum Inhalt, keine untersuchte die Akzeptanz unterschiedlicher Systeme im Vergleich. Deutlich zeigen sie jedoch die Diskrepanz zwischen den in den Regelwerken genannten Mindestwerten und den Wünschen der Nutzer, insbesondere bezogen auf das Beleuchtungsniveau, auf.

Aufgrund der genannten physiologischen, gesundheitlichen und psychologischen Bedürfnisse des Nutzers an Arbeitsplätzen sowie des Energieeinsparpotenzials (Kapitel 1.4.4) haben Tageslichtsysteme ihre Berechtigung. Eine exakte Untersuchung der resultierenden Tageslichtqualität und der Abhängigkeiten, die sie beeinflussen, steht noch

aus. Dabei sind die Beleuchtungsqualität, der visuelle Komfort genauso wie das Bedürfnis nach Kontakt zur Außenwelt und nach Privatheit zu untersuchen, um bessere Planungskriterien zu erhalten und eine höhere Qualität und Akzeptanz am Arbeitsplatz zu schaffen.

3.2 Definition der Aufgabe

3.2.1 Kriterien und Defizite

Die im Rahmen dieser Dissertation durchzuführende Studie hat zum Ziel, zum einen Aussagen über die Qualität von Tageslicht im Büroraumraum zu erhalten und zum anderen, Einflussgrößen für eben diese Qualität herauszufiltern. Dabei liegt der Fokus auf der Untersuchung der Raumbelichtung in Büroräumen bei besonderer Fassade. Geschlossene Sonnenschutzsysteme oder aktive Tageslicht- bzw. Lichtlenksysteme wurden in bisherigen Studien kaum untersucht.

Die Akzeptanz des Nutzers gründet sich auf die Art und Weise, wie er den Raum und das Licht wahrnimmt. Sie wird in diesem Rahmen definiert als die subjektive Beurteilung von Licht und Raum, beschreibt also die positiven oder zumindest nicht negativen Bewertungen. Die Akzeptanz ist beeinflusst von lichttechnischen Parametern, nicht lichttechnischen Parametern, die jedoch mit der Beleuchtung in Relation stehen, und von der Beleuchtung unabhängigen Kriterien (Kapitel 2.1). Wichtige Einflussfaktoren, hervorgehend aus der Auswertung der vorhandenen Literatur in Verbindung mit der Beleuchtung am Arbeitsplatz, sind:

- Positionierung der Beleuchtung im Bezug zu anderen raumklimatischen Kriterien (Kapitel 2.2.1)
- Steuerung und Eingriffsmöglichkeit (Kapitel 2.2.2)
- Bewertung unterschiedlicher Fassadensysteme (Kapitel 2.2.3)
- Beleuchtungsniveau (Kapitel 2.2.4)
- Blendung durch Tageslicht und Akzeptanz des Grades an Blendung (Kapitel 2.2.5)
- Ausblick und Qualität des Ausblicks (Kapitel 2.2.6)
- Auswirkung von Licht auf die Produktivität bzw. Leistungsfähigkeit (Kapitel 2.2.7)
- Lichtwirkung und Raumwirkung (Kapitel 2.2.8)
- Auswirkungen der Raumbelichtung auf die Gesundheit des Menschen (Kapitel 2.2.9)
- Akzeptanz unterschiedlicher Lichtfarben (Kapitel 2.2.10)
- Subjektive Wahrnehmung eines Raumes durch den Menschen (Kapitel 1.3.3)

Aus dieser Auswertung zum Thema (Tages-) Licht am Arbeitsplatz konnten einige Defizite in den Fragestellungen und Methoden herausgefiltert werden, die im Folgenden genannt werden:

- Häufig fehlende Messwerte zu den subjektiven Befragungen
- Keine Untersuchungen zur Akzeptanz von komplexen Tageslichtsystemen
- Keine Untersuchungen zu Tageslicht- und Lichtlenksystemen bei direkter Sonneneinstrahlung
- Kaum vergleichende Untersuchungen zu verschiedenen Systemen und der Präferenz der Nutzer
- Wenige Untersuchungen zur Komplexität der Tageslichtqualität (Wahrnehmung)
- Keine vorhandenen Bewertungsverfahren zur vergleichenden Bewertung komplexer Tageslichtsysteme

Auf Basis dieser Kriterien wird im Folgenden die Aufgabenstellung für diese Studie definiert.

3.2.2 Thesen und Fragestellungen

Auf Basis der in Kapitel 3.2.1 genannten Kriterien und Defizite werden Thesen formuliert, die im Rahmen dieser Dissertation überprüft werden. Dabei wird grundsätzlich von der Beurteilung bei besonnener Fassade und geschlossenen und aktiven, also die direkte Strahlung ausblendenden oder nutzenden, Sonnenschutz- und Lichtlenksystemen ausgegangen.

These 1: Das Fassadensystem hat einen Einfluss auf die Akzeptanz der Raumbelichtung und das Wohlbefinden des Nutzers.

Begründung: Die ausgewerteten Studien aus der Literatur (Kapitel 2.2.3 und 2.2.6) erfassten meist unterschiedliche Kunstlichtsituationen in ihrer Akzeptanz. Klar dokumentiert wurde auch das Wohlbefinden, welches meist mit einer ausreichenden Tageslichtversorgung einherging. Wie jedoch beeinflussen die in den letzten Jahren vermehrt auf den Markt gekommenen Tageslichtsysteme in aktivem, also geschlossenem Zustand, die Akzeptanz und das Wohlbefinden des Nutzers am Arbeitsplatz?

These 2: Größere Helligkeit schafft mehr Zufriedenheit; 500 Lux in der Arbeitsebene sind für einen „hellen Raumeindruck“ nicht ausreichend.

Begründung: In der Literatursauswertung wurden einige Studien zum Thema „Lichtniveau“ zitiert, die meist jedoch auf Kunstlichtuntersuchungen basierend durchgeführt wurden (Kapitel 2.2.4). Fast alle Ergebnisse zeigten deutlich höhere gewünschte Beleuchtungsstärken als die in den Regelwerken genannten. Dabei spielte die Gesamtraumhelligkeit, also neben der Beleuchtungsstärke auch die Verteilung des Lichtes eine wichtige Rolle. Wo liegt also bei Tageslichtsystemen das „richtige“ Niveau und wie wirken sich unterschiedliche Funktionsweisen verschiedener Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme auf die Bewertung des Raumeindrucks aus?

These 3: Die Beurteilung der Qualität des Tageslichtes im Büroraum korreliert nicht zwingend mit lichttechnischen Messwerten, z.B. den horizontalen Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz.

Begründung: Die horizontale Beleuchtungsstärke bildet nach den zitierten Studien meist nicht das Maß für Zufriedenheit mit der Beleuchtungssituation (Kapitel 2.2.4 und 2.2.8). Vielmehr spielt die Lichtverteilung auf den raumbegrenzenden Oberflächen in Verbindung mit einzelnen Akzenten eine Rolle. Da die Studien jedoch meist bei Kunstlichtsituationen durchgeführt werden, stellt sich die Frage, wie die Bewertung bei Tageslicht ausfällt und welche objektiven Messwerte für die Beurteilung am besten herangezogen werden können?

These 4: Der geschlossene Sonnenschutz und damit der fehlende Ausblick wird akzeptiert, wenn die Helligkeit im Raum ausreichend ist bzw. die Raumdecke durch ein Lichtlenksystem aufgehellt wird.

Begründung: Der Ausblick wurde als ein wichtigstes Kriterium für die Akzeptanz des Büroarbeitsplatzes definiert (Kapitel 2.2.6). Zugunsten eines verbesserten Ausblicks wurde häufig der Sonnenschutz geöffnet und zum Teil bis zu einem gewissen Grad sogar Blendung in Kauf genommen. In wie weit kann eine optimierte Tageslichtnutzung den eingeschränkten Ausblick bei geschlossenen Tageslichtsystemen kompensieren und wie wird die Qualität eines eingeschränkten Ausblicks beurteilt? Spielt die „Nachvollziehbarkeit“ möglicherweise eine Rolle?

These 5: Blendung durch Tageslicht wird über die in den Regularien genannten Grenzwerten hinaus akzeptiert.

Begründung: In der Auswertung der Literatur findet man sehr unterschiedliche Bewertungen der Blendung (Kapitel 2.2.5). Meist ließen sich keine signifikanten Zusammenhänge mit geltenden Grenzwerten finden. Bis zu einem Wert von 4000 cd/m² scheint die Leuchtdichte selbst für Bildschirmarbeitsplätze bei Tageslichtbeleuchtung akzeptabel zu

sein. Wann und wodurch tritt Blendung bei geschlossenen Tageslichtsystemen auf und in welchen Situationen werden diese tatsächlich von den meisten Probanden als störend empfunden?

These 6: Die Veränderung der Lichtfarbe durch Fassadensysteme hat einen entscheidenden Einfluss auf die Akzeptanz bzw. die Bewertung der Raumwirkung.

Begründung: Die Farbwirkung bei Kunstlicht und die entsprechenden Präferenzen wurden in einigen der zitierten Studien (Kapitel 2.2.8 und 2.2.10) untersucht, wenngleich sich keine eindeutigen Ergebnisse hinsichtlich der Abhängigkeiten von Lichtfarbe und subjektiver Bewertung erkennen ließen. Die Präferenzen lagen eher bei einer dem Tageslicht angepassten Beleuchtung. In wie weit wird die Veränderung der Lichtfarbe durch die Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme wahrgenommen und welche Auswirkungen hat dies auf die subjektive Bewertung der Probanden? Gibt es eine eindeutige Präferenz von Lichtfarben?

These 7: Die Akzeptanz von Lichtsituationen kann mit einer Akzeptanzwahrscheinlichkeit am besten beschrieben werden.

Begründung: Die subjektiven Urteile über die Raumhelligkeit oder auch die Blendung ergaben in bisherigen Studien meist eine sehr große Bandbreite an objektiven Werten. Daher scheint eine statistische Wahrscheinlichkeit eines zufriedenen Prozentsatzes der Nutzer ein Mittel zu sein, um Lichtqualität zu beschreiben als ein gemittelter Wert. Können auf der Wahrscheinlichkeit basierende Schwellwerte bessere Ergebnisse zur Akzeptanz liefern?

These 8: Das Temperaturempfinden ist weitgehend unabhängig von der Helligkeit im Raum und wird vom System selbst nicht beeinflusst.

Begründung: Grundsätzlich geht man davon aus, dass die Beleuchtung im Hinblick auf die raumklimatischen Bedingungen eine Sonderrolle hat und wenig abhängig von anderen Kriterien wie der Raumluftqualität oder der Temperatur gewertet wird (Kapitel 2.2.1). In wie weit ist dies, auf Basis gleicher Raumtemperaturen, tatsächlich der Fall und welche Kriterien beeinflussen möglicherweise noch das Temperaturempfinden in Innenräumen?

These 9: Die Bewertung der Innenraumbelichtung ist abhängig von der Außenbeleuchtung.

Begründung: Einige der zitierten Studien zeigten präferierte Lichtlösungen, die den Außenbedingungen in ihren Lichtniveaus angepasst waren (Kapitel 2.2.4 und 2.2.8). Diese Studien wurden jedoch auf Kunstlicht basierend mit keinem oder nur geringem Außenkontakt, in keinem Fall mit aktiven Tageslichtsystemen, durchgeführt. Wie verhält sich die Bewertung der Innenraumbelichtung bei aktiven oder geschlossenen Tageslichtsystemen?

These 10: Studien zur Akzeptanz geben neue Hinweise auf mögliche Schwachpunkte und zu Grenzwerten bezogen auf Tageslicht und (neue) Sonnenschutzsysteme.

Begründung: Mit rein objektiven Kriterien sind die subjektiven Urteile über die Beleuchtungssituation am Arbeitsplatz oft nicht zu erklären (Kapitel 2.2), z.B. bezogen auf das Raumwirkung oder die Lichtfarbe, daher sind Befragungen, möglichst in realen Räumen, ein gutes Mittel, um mehr Aufschluss auch über nicht-lichttechnische Kriterien zu bekommen [BÜN]. Darüber hinaus spielt das Zusammenwirken verschiedener Aspekte eine Rolle bei der Wahrnehmung, die in nur in realen Räumen mit Tageslicht untersucht werden können. Welche Hinweise können solche Untersuchungen für die Praxis liefern und welche objektiven Messwerte bzw. Messgrößen sind möglicherweise im Hinblick auf subjektive Bewertungen zu überprüfen?

3.2.3 Lösungsansätze und Methode

Um die Lichtqualität in ihrer Komplexität zu erfassen und daraus möglichst allgemeingültige Kriterien für die Praxis formulieren zu können wurde zunächst eine Auswertung vorhandener Literatur durchgeführt (Kapitel 2.2). Aus den

in Kapitel 3.2.1 zusammengefassten Kriterien wurde dann ein Fragebogen entwickelt und Befragungen mit naiven, also lichttechnisch nicht vorbelasteten Probanden durchgeführt. Parallel hierzu wurden zeitgleich lichttechnische Messungen vorgenommen. Hieraus können in Verbindung mit den Ergebnissen der subjektiven Bewertungen statistische Analysen erfolgen, die signifikante Zusammenhänge zwischen objektiven und subjektiven Werten, aber auch innerhalb der subjektiven Bewertungen erlauben. Aus diesen Analysen wird auf Basis der in Kapitel 1.5.4.10 beschriebenen Tageslichtsignaturen ein Bewertungssystem für den Vergleich komplexer Tageslichtsysteme erarbeitet. Die Befragungen und Messungen wurden in Testräumen aus dem Forschungsprojekt „Licht in Büroräumen“ an der Universität Dortmund durchgeführt [SCHU a, b, MÜL b], in dem sechs gleiche Räume mit unterschiedlichen Fassadensystemen sowie die entsprechende Messtechnik zur Verfügung standen.

Der Fokus dieser Studie liegt weniger in der Erfassung von Leistungsdaten oder biologischen Auswirkungen, sondern vielmehr im zeitgleichen Erfassen lichttechnischer und subjektiver Daten über eine Bandbreite unterschiedlicher Systeme und bei aktiven, also geschlossenen Sonnenschutz und sonnigen Wetterbedingungen. Untersucht werden dabei:

- Die individuell gewünschte Einstellung der Systeme, sowohl des Sonnen- als auch des Blendschutzes und des Kunstlichtes
- Die vergleichende Bewertung unterschiedlicher Systeme bei fixen Einstellungen
- Das Beleuchtungsniveau auf Basis horizontaler und vertikaler Beleuchtungsstärken sowie der Leuchtdichteverteilung
- Die Bewertung der Blendung durch Tageslichtsysteme sowie die Akzeptanz von möglicherweise auftretenden „Sonnenflecken“
- Die Licht- und Raumwirkung, damit verbunden der Eindruck, den unterschiedlichen Systeme in identischen Räume bewirken
- Die Beurteilung der Lichtfarbe
- Die Bewertung der Innenraumtemperatur
- Die Bewertung einer Lichtlenkung
- Die Bewertung der Privatheit sowie der Ästhetik der Systeme

Die Eingrenzung der Arbeit besteht in der Limitation auf sechs installierte Systeme einer nach Südwesten ausgerichteten Fassade und der Durchführung von Kurzzeitbefragungen, da es sich um reale Büroräume an der Universität Dortmund handelt. Nicht untersucht wurden daher:

- Die Positionierung der Bewertung der Beleuchtung im Bezug zu anderen raumklimatischen Kriterien
- Regelungs- und Steuerungsalgorithmen
- Qualität des Außenbezugs im Hinblick auf unterschiedliche Fensterformate oder Ausblicke
- Auswirkung der Beleuchtungsqualität auf Produktivität und Gesundheit
- Auswirkungen auf den Biorhythmus

Zu diesen Themen wurden Referenzen und Bezugsquellen anderer Forschungsarbeiten herangezogen.

Das nun folgende Kapitel 4 umfasst die Beschreibung der Versuchsanlage, die Entwicklung und Durchführung der Befragungen sowie die Auswertungsmethoden der statistischen Analyse. In Kapitel 5 folgt die einfache Auswertung der erfassten Daten. Dagegen werden in Kapitel 6 übergreifende Analysen durchgeführt, die Abhängigkeiten zwischen subjektiven und objektiven Daten darstellen. Die Entwicklung eines Bewertungsschemas für den Einsatz in der Praxis wird in Kapitel 7 beschrieben. Am Ende stehen die Ergebnisdiskussion (Kapitel 8) und die Zusammenfassung der Arbeit (Kapitel 9).

4 Versuchsplanung

4.1 Testanlage

4.1.1 Standort und Räumlichkeiten

In Räumlichkeiten des Lehrstuhls Klimagerechte Architektur der Universität Dortmund wurden beginnend bereits im Jahr 2000 die notwendigen Bedingungen geschaffen, um vergleichende Feldversuche an insgesamt sechs unterschiedlichen Fassadensystemen durchzuführen [SCHU a, b, MÜL b]. Diese wurden auch für die Nutzerakzeptanzuntersuchungen innerhalb dieser Arbeit genutzt. Hierzu konnte eine nach Südwest orientierte (Abweichung aus Süd -63°) unverschattete Fassade eingesetzt werden, die sich auf dem Dachgeschoss eines typischen dreigeschossigen Universitätsgebäudes aus den 1970er Jahren befindet. Abbildung 4.1-1 zeigt die Lage des Gebäudes auf dem Universitätscampus in Dortmund sowie eine Außenansicht der fertig gestellten Fassade.



Abbildung 4.1-1: Links: Teststandort Dortmund (51°3 N/ 7°25 E); rechts: Außenansicht der Fassade im Jahr 2002

Die bestehenden Fensterelemente auf beiden Längsseiten des Gebäudes wurden erhalten. Die Scheiben der Testanlage wurden durch Wärmeschutzglas oder ein entsprechendes Sonderelement ersetzt. Auf der nach Nordosten orientierten rückwärtigen Fassadenseite wurden Verdunkelungsvorrichtungen angebracht, die die Messung einseitig beleuchteter Räume möglich machten. Die Räume wurden identisch möbliert und durch Vorhänge lichttechnisch getrennt. Außerdem wurden vorhandene Regale durch gleichfarbige, hellgraue Stoffe abgehängt, um gleichwertige Bedingungen in den Räumen für die Tests zu erhalten (Abbildung 4.1-2).

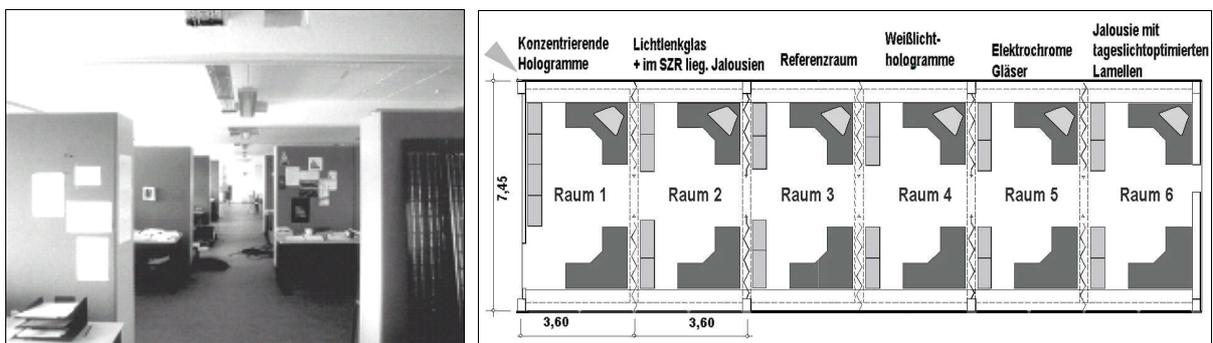


Abbildung 4.1-2: Links: Innenansicht der Testanlage; rechts: Schematischer Grundriss der Messräume mit Möblierung

Eine thermische Trennung der einzelnen Versuchsräume war aufgrund der baulichen Gegebenheiten nicht möglich. Die Position der Bildschirme im 45° Winkel zur Fassade stellt nicht das Optimum nach ergonomischen Anforderungen dar, konnte jedoch aufgrund der Bildschirmtiefen an diesem Standort nicht anders gelöst werden. Die Reflexionsgrade betragen für den Boden 20% und für Wände und Decken etwa 74%. Eine detaillierte Beschreibung mit Angaben der Abmessungen findet sich im Anhang (Kapitel 12.4.2).

4.1.2 Beschreibung der Systeme

Sechs unterschiedliche Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme wurden für die Versuche in die Testfassade integriert. Dabei kamen Fassadensysteme zum Einsatz, die sich in ihrer Funktion deutlich unterscheiden. Ziel war es, nicht nur gleiche Funktionsweisen von Tageslichtsystemen auf ihre Akzeptanz hin zu testen, sondern, unterschiedliche Funktionen in ihrer Gesamtbeurteilung durch Testpersonen zu erfassen. Zum einen kam die Kategorie der Lichtlenkung zur verbesserten Tageslichtnutzung, repräsentiert durch vier der Systeme (System 2, 3, 4 und 6), zum Einsatz. Diese lenken auftreffendes Licht an die Decke um und bringen damit in Verbindung mit einer weißen Decke das Licht tief in den Raum. Diese Systeme sind besonders für den Einsatz in tiefen Büroräumen mit ständigem Aufenthalt und Bildschirmarbeitsplätzen geeignet. Die zweite Kategorie (repräsentiert durch die Systeme 1 und 5) besteht aus Sonnenschutzsystemen, die die Sonneneinstrahlung reduzieren sowie eine besondere Transparenz und Durchsichtigkeit aufweisen. Sie sind gut geeignet für großflächige Verglasungen in Dächern und Fassaden.

Ein Überblick über die untersuchten Systeme ist in Abbildung 4.1-3 gegeben.

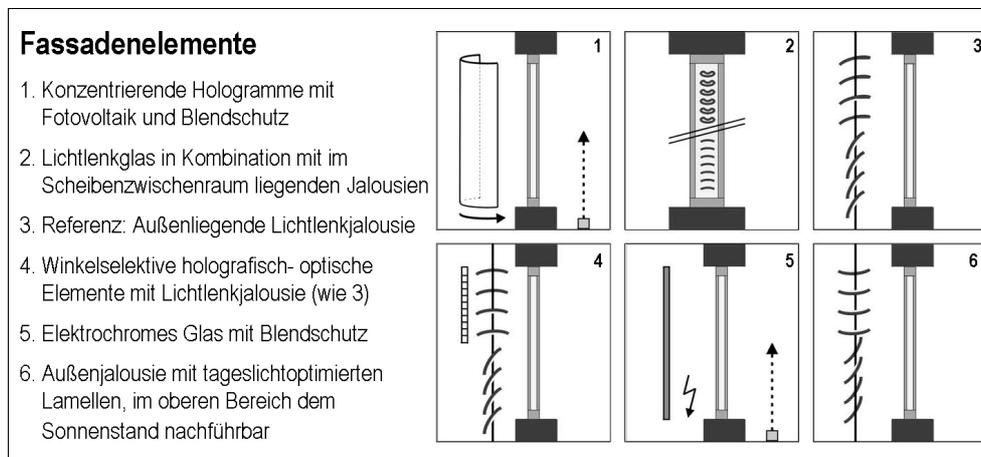


Abbildung 4.1-3: Die Fassadensysteme des Projektes im Überblick

Im Folgenden werden die Systeme in ihren Wirkungsweisen beschrieben. Eine detaillierte Systembeschreibung mit allen Kennwerten und Abmessungen der Systeme findet sich im Anhang (Kapitel 12.4.1).

4.1.2.1 Konzentrierende Hologramme

Das Fassadensystem am Messraum 1 besteht aus sechs vor der bestehenden Fassade des Gebäudes angebrachten Elementen. Es ist als außen liegender Sonnenschutz konzipiert und besteht aus gebogenen Verbundglasscheiben, in die Streifen von holografisch-optischen Elementen (HOE) eingebettet sind (Abbildung 4.1-4).

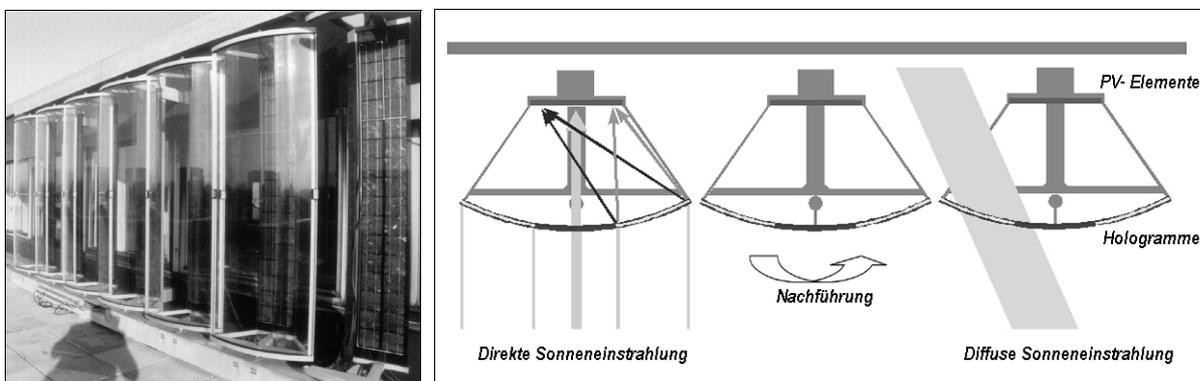


Abbildung 4.1-4: Außenaufnahme und Funktionsprinzip der konzentrierenden Hologramme mit Fotovoltaik (System 1)

Die Hologramme lenken senkrecht auftreffendes direktes Sonnenlicht auf Fotovoltaikmodule um und verhindern so die Erwärmung des Innenraumes durch direkte Sonneneinstrahlung. Diffuses Licht kann ungebeugt in den Raum eintreten. Im Inneren wurde ein zusätzlicher Blendschutz für Bildschirmarbeitsplätze angebracht. Die Elemente werden automatisch dem Sonnenstand nachgeführt. Eine gesteigerte Solarstromerzeugung um den Faktor 1,5 durch die Konzentration auf die PV-Elemente wurde berechnet. Der Abminderungsfaktor für Sonnenschutz beträgt für dieses System $z = 0,2$.

4.1.2.2 Lichtlenkglas und Jalousie im Scheibenzwischenraum

Im Messraum 2 wurde eine Kombination aus Lichtlenkglas im oberen Drittel und Jalousien im Scheibenzwischenraum im Sichtbereich installiert (Abbildung 4.1-5). Fest im Scheibenzwischenraum eingebaute Acrylprofile lenken einfallendes Sonnenlicht und Zenitlicht in flachem Winkel an die Raumdecke. Raumseitiges Gussglas richtet das Licht für alle Azimutwinkel überwiegend senkrecht zur Glasebene (Horizontalumlenkung). Die Jalousie im unteren Bereich kann als Sonnen- und Blendschutz eingesetzt werden und ist stufenlos regelbar.

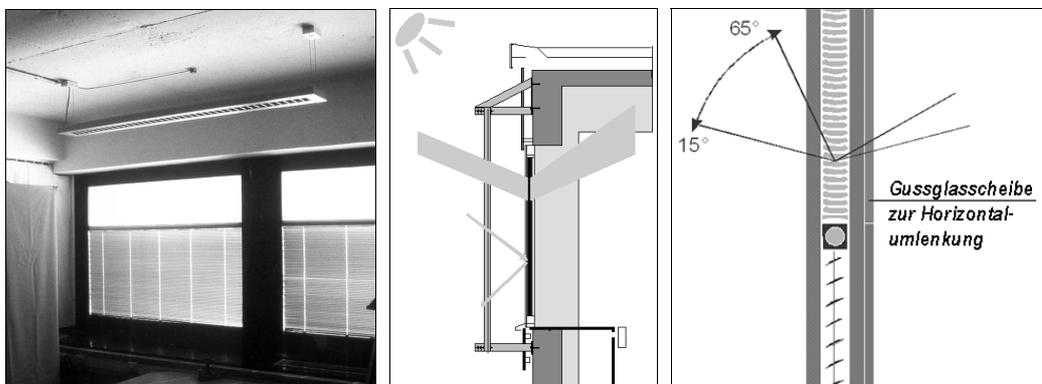


Abbildung 4.1-5: Innenaufnahme, Wirkungsprinzip des Gesamtelementes und des Lichtlenkglases (System 2)

Der Gesamtenergiedurchlassgrad beträgt $g = 0,3$ für das Lichtlenkglas und $g = 0,12$ für die im Scheibenzwischenraum liegenden Jalousien in geschlossenem Zustand. Der Abminderungsfaktor beträgt $z = 0,16$ für die Jalousien. Die Lichttransmission für das Lichtlenkglas liegt bei 55%.

4.1.2.3 Außenjalousie mit Lichtlenkfunktion

Das Fassadensystem im Referenzraum besteht aus einer konventionellen außen liegenden Jalousie mit unterschiedlich ausgerichteten Lamellen zur Lichtlenkung im Oberlichtbereich (Abbildung 4.1-6).

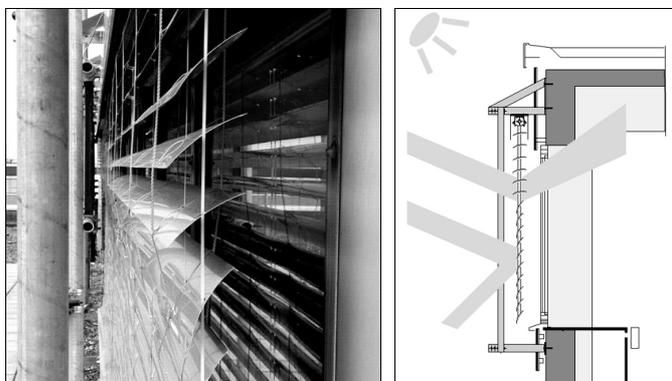


Abbildung 4.1-6: Außenansicht und Funktionsprinzip des Systems 3

Das System kann oben und unten nicht getrennt geregelt werden. Es weist einen Abminderungsfaktor von $z = 0,18$ und einen Gesamtenergiedurchlassgrad von $g = 0,1$ auf.

4.1.2.4 Weißlichthologramme in Kombination mit Außenjalousie

Im Messraum 4 wurden Weißlichthologramme im oberen Bereich einer Isolierglasscheibe eingebettet und vor der Fassade montiert. Durch verschiedene Streifen holografisch - optischer Elemente wird einfallendes Sonnenlicht in flachem Winkel an die Raumdecke umgelenkt (Abbildung 4.1-7).

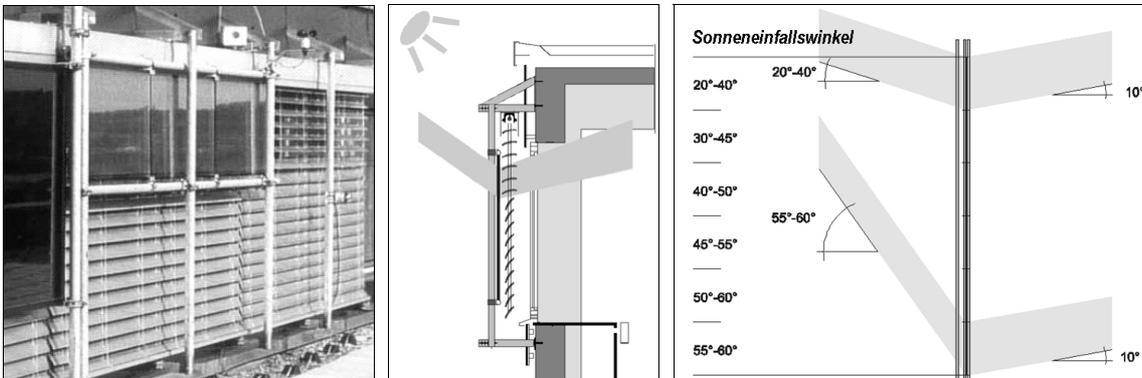


Abbildung 4.1-7: Außenansicht und Funktionsprinzip der Gesamtfassade sowie der Weißlichthologramme

Für alle anderen Winkel als den Sonneneinfallswinkel bleibt das Glas weitgehend transparent. Durch eine Horizontalaufweitung des Lichts werden Schlagschatten vermieden und eine gleichmäßige Raumbelichtung gewährleistet. Für den Sonnenschutz wurde ein konventionelles Jalousiesystem (Kapitel 4.1.2.3) installiert.

4.1.2.5 Elektrochromes Glas

Elektrochromes Glas verfärbt sich beim Anlegen einer geringen elektrischen Spannung dunkel und bleibt dabei transparent (Abbildung 4.1-8).

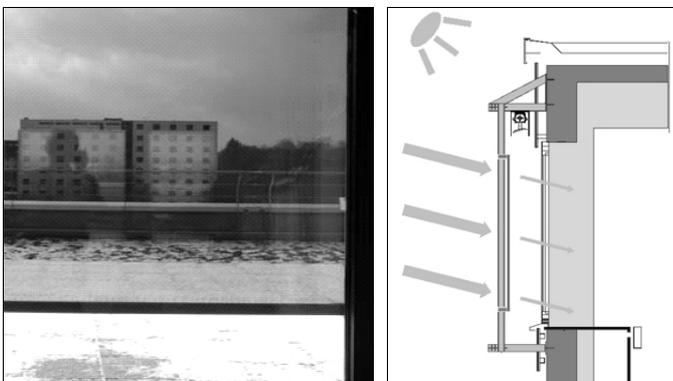


Abbildung 4.1-8: Ansicht und Funktionsprinzip des elektrochromen Glases (System 5)

Die Verfärbung der Scheiben verringert den Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases (36 – 12%) wodurch eine Überhitzung des Raumes vermieden wird. Außerdem wird gleichzeitig die Lichttransmission verringert (50 - 15%). Dieses System wurde in Verbindung mit einem innenliegenden Blendschutz getestet. Die Montage erfolgte aufgrund der nicht lieferbaren Abmessungen vor der Fassade.

4.1.2.6 Tageslichtoptimierte Außenjalousie

Das System in Messraum 6 besteht aus einer für die Tageslichtnutzung optimierten Umlenkjalousie vor der Fassade (Abbildung 4.1-9). Die zweiteilig geregelte Aluminiumjalousie mit konkav gebogenen Lamellen reflektiert direktes Sonnenlicht in die Tiefe des Raumes. Eine unabhängige Justierung im oberen und unteren Bereich lässt eine individuelle Optimierung von Sonnenschutz und Lichtlenkung zu.

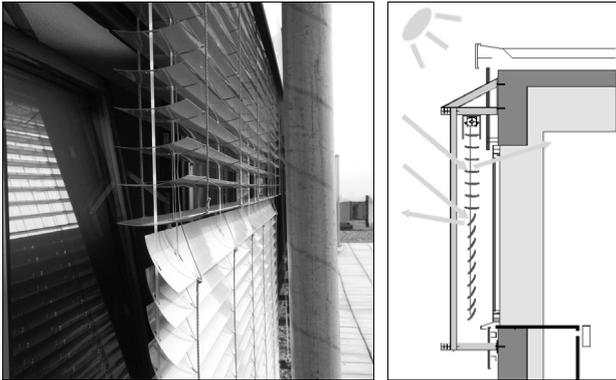


Abbildung 4.1-9: Außenansicht und Vertikalschnitt des Systems 6

Die die oberen Lamellen können dabei dem Sonnenstand automatisch nachgeführt werden. Der Abminderungsfaktor beträgt $z = 0,18$. Detaillierte Kenndaten finden sich für alle Systeme im Anhang (Kapitel 12.4.1).

4.2 Messprogramm

4.2.1 Messpositionen und Rahmenbedingungen

Ziel dieser Untersuchung ist, die Nutzerakzeptanz im Bezug auf die unterschiedlichen Fassadensysteme herauszufiltern. Zu diesem Zweck wurden der Versuchsaufbau, das Messprogramm und die Nutzerbefragungen von Beginn an aufeinander abgestimmt. Basis für das Messprogramm und die Befragungen bildeten die von der International Energy Agency (IEA) im Jahr 2001 herausgegebenen Richtlinien „Monitoring Procedures for the Assessment of Daylighting Performance of Buildings“ [IEA c]. Hierin sind grundlegende Methoden zum Aufbau der Messtechnik, des zu erfassenden Datensatzes und den Befragungen beschrieben.

Die Anordnung der Sensorik richtet sich nach den Vorgaben der IEA Task 21 [IEA b, c] und wurde in allen Räumen gleich installiert. Abbildung 4.2-1 zeigt die Anordnung der Beleuchtungsstärkesensoren (links, D= Deckenmesspunkte A= Arbeitsebene, Aug= vertikal in Augenhöhe) und die Messpositionen der Leuchtdichtekameras (rechts) respektive der Farbmessungen exemplarisch für einen Raum. Eine detaillierte Beschreibung des Messaufbaus findet sich im Anhang (Kapitel 12.4.2).

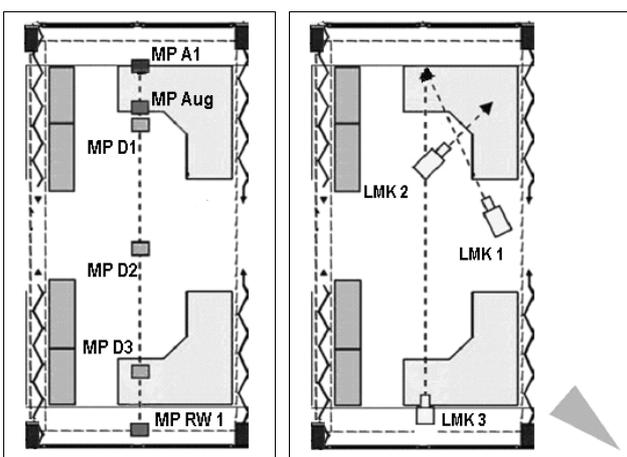


Abbildung 4.2-1: Messaufbau während der Befragungen, links: Beleuchtungsstärkesensoren; rechts: Leuchtdichtepositionen

Die gegenüber den Vorgaben der IEA reduzierte Messtechnik in der Arbeitsebene, die fünf Sensoren vorsieht, war notwendig, um den Probanden ein ungehindertes Arbeiten während der Befragungen zu ermöglichen. Für die Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke in der Raumtiefe kann auf die Ergebnisse des Projektes „Licht in Büroräumen“ [MÜL b] zurückgegriffen werden.

Bestandteile der Untersuchung waren zusätzlich die Erfassung aller meteorologischen Daten. Insgesamt wurden folgende Einzelparameter über ein Jahr erfasst:

- Wetterbedingungen (globale und vertikale Außenbeleuchtungsstärke vor der Fassade, Sonnenstand, Temperatur, Wind, Global- und Diffusstrahlung)
- Beleuchtungsstärken horizontal (Arbeitsebene 1 Sensor fensternah, Decke 3 Sensoren) und vertikal an der rückwärtigen Wand sowie in Augenhöhe auf das Fenster gerichtet (2 Sensoren)
- Leuchtdichten aus zwei Nutzerblickwinkeln den kompletten Halbraum erfassend und von der Raumrückwand mit CCD- Kameras
- Spektrum der resultierenden Tageslichtbeleuchtung im Innenraum an allen Messpunkten sowie zeitgleiche Außenmessungen (Durchführung durch TU Ilmenau)

Aus Gründen der Reproduzierbarkeit wurden die Systemeinstellungen während der Nutzerakzeptanzstudien klar definiert und auf in der Praxis notwendige Varianten beschränkt. Die beiden reinen Sonnenschutzsysteme wurden mit einem zusätzlichen Blendschutz versehen, während die Jalousien bzw. Lichtlenksysteme ohne zusätzlichen innen liegenden Blendschutz getestet wurden. Die Einstellungen der Systeme sind in Tabelle 4.2-1 in der Übersicht dargestellt. Die Raumnummern entsprechen den Systemnummern.

Tabelle 4.2-1: Voreinstellungen bei klarem Himmel und der Sonne auf der Fassade

Raum	System	Voreinstellung
1	Konzentrierende Hologramme	Automatisch nachgeführt, mit Blendschutz
2	Lichtlenkglas	Jalousien geschlossen, ohne Blendschutz
3	Referenz	Jalousien geschlossen, ohne Blendschutz
4	Weißlichthologramme	Jalousien geschlossen, ohne Blendschutz
5	Elektrochromes Glas	Voll geschaltet, mit Blendschutz
6	Tageslichtoptimierte Jalousie	Unten geschlossen, oben nach Sonnenstand, ohne Blendschutz

4.2.2 Leuchtdichtemessungen

Leuchtdichten wurden mit zwei CCD- Kameras flächenhaft aus verschiedenen Positionen und mit verschiedenen Objektiven (8mm und Fischauge) zeitgleich erfasst. Abbildung 4.2-2 zeigt exemplarisch die drei Messpositionen am Beispiel des Messraumes 1 auf. Dabei wurden jeweils die Nutzerpositionen in Richtung Fenster und in Richtung Bildschirm sowie der gesamte Halbraum von der rückwärtigen Wand erfasst.



Abbildung 4.2-2: Aufnahmepositionen der Leuchtdichtekameras: Position 1: Blickachse zum Fenster, Position 2: Blickrichtung des Nutzers, Position 3: Aufnahme von der rückwärtigen Wand

Die Objektive weisen einen $V(\lambda)$ Filter auf, der der spektralen Sensibilität des Auges angepasst ist (Kapitel 1.3.1). Vorteil dieses Messverfahrens ist, dass Blendquellen genau in ihrer Stärke und Lage erfasst und ausgewertet werden können sowie die Raumhelligkeit, also auch die Verteilung, auf einmal erfasst werden kann (zum Einsatz der Leuchtdichteanalytik siehe [GAL a]). Bei ständig wechselnden Außenlichtbedingungen besteht hiermit gezielt die Möglichkeit, Systeme in ihrer Wirkung vergleichen zu können und anhand von Tagesläufen kritische Bereiche her-

auszufiltern. Das besondere Augenmerk im Themenfeld Leuchtdichten lag auf der Bewertung der Leuchtdichteverteilung im Raum und auf den unterschiedlichen Systemen selbst sowie auf der Ermittlung von Blendquellen.

Im Gegensatz zu anderen Einsätzen der CCD-Kameras [VEL] wurden in dieser Testreihe die Leuchtdichteaufnahmen nicht durch die Probanden gemacht, sondern jeweils im Vorfeld alle Räume von drei Positionen aus manuell aufgenommen und je zwei Räume bei laufenden Befragungen noch einmal über die gesamte Fragezeit über eine automatische Steuerung. Diese Vorgehensweise sollte zum einen Bedienungsfehler durch die Nutzer ausschließen als auch die Präzision der Messpositionen und der Kameraausrichtung gewährleisten. Zum anderen erlaubte dies sowohl die Aufzeichnung aller Räume im Vergleich als auch die nähere Betrachtung von je zwei simultan gemessenen Räumen. Möglicherweise auftretende wechselnde Wetterbedingungen zwischen Beginn und Ende der Befragungen konnten auf diese Weise ebenfalls dokumentiert werden.

4.2.3 Spektrale Messungen

Spektrale Messungen wurden in Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt, um Aufschluss über die Güteigenschaften Lichtfarbe, Farbtemperatur und Farbwiedergabe unter dem Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme und deren Einstellungen zu erhalten. Das Farbempfinden in Abhängigkeit von der Helligkeit sowie der Einfluss der Lichtfarbe auf die circadiane Rhythmik [LAN, BRA a, c, REA b] sind zukunftsweisende Fragestellungen. Unterschiedliche Jahreszeiten, Tageszeiten und Wetterbedingungen verursachen wechselnde Lichtfarben des Tageslichtes. Die Himmelsleuchtdichten und die Farbtemperaturen des Tageslichtes ändern sich von den Winter- zu den Sommermonaten, von morgens bis abends, sowie mit aufziehender Bewölkung (Kapitel 1.2.2). Die innerhalb der Studie untersuchten Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme sind dafür ausgelegt, den Raum unter unterschiedlichsten Tageslichtverhältnissen optimal zu beleuchten und gleichzeitig Sonnenschutz zu bieten. Die resultierenden Lichtlenkeigenschaften, der Lichtreflexions- oder Transmissionsgrad eines Systems kann je nach Einfallrichtung der (Direkt-) Strahlung variieren somit unterschiedliche Lichtfarben im Innenraum erzeugen.

Spektrale Daten wurden für alle Testräume an den bekannten Messpunkten in der Arbeitsebene sowie den Nutzerpositionen zu verschiedenen Jahreszeiten ermittelt (Abbildung 4.2-1). Somit ergaben sich verschiedene Messreihen bei klarem Himmel ohne direkte Sonneneinstrahlung (klar), bei direkter Sonneneinstrahlung (sonnig) und bei bedecktem Himmel (bedeckt). Durch die Südwestorientierung der Fassade fällt erst am frühen Nachmittag direktes Sonnenlicht auf die Fassaden. Die unterschiedlichen Lichteinfallswinkel über den Tag konnten daher für die verschiedenen Messreihen genutzt werden. Jeweils im Sommer und im Winter wurden zwei Tage lang Messungen zur spektralen Verteilung des Lichtes durchgeführt. Eine Zusammenstellung der Messtage und Wetterverhältnisse findet sich in Tabelle 4.2-2.

Tabelle 4.2-2: Zusammenstellung der Messtage für spektrale Messungen

Messtag	Himmelszustand vormittags	Himmelszustand nachmittags
12. Juli 2003, Sommer	Klar, ohne Sonne	bedeckt
13. Juli 2003, Sommer	Klar, ohne Sonne	sonnig
1. Dezember 2002, Winter	wechselhaft	wechselhaft
2. Dezember 2002, Winter	wechselhaft	wechselhaft

Analysen der Spektraldaten wurden für sich (Kapitel 5.2.4) und durch die Korrelation der Daten mit den Ergebnissen der Nutzerbefragung (Kapitel 6.2) durchgeführt.

4.3 Nutzerakzeptanzuntersuchungen

4.3.1 Statistische Versuchsplanung

Aufgrund der gegebenen Rahmenbedingungen mit sechs Testräumen, drei zu untersuchenden Jahreszeiten und zwei Himmelszuständen wurde eine Gesamtanzahl von 336 durchzuführenden Befragungen errechnet, die statistisch repräsentative Ergebnisse widerspiegeln. Um die Störung des üblichen Büroalltages in den Testräumen in Grenzen zu halten und die Datenmenge zu begrenzen, mussten einige Rahmenbedingungen eingehalten werden. Darunter fielen zeitliche Einschränkungen. Befragungen wurden aus diesem Grund zu den kritischen Zeiten eines jeden Quartals durchgeführt, also am Nachmittag bei niedrigen Sonnenständen innerhalb der üblichen Büroarbeitszeiten (2002 bis 2003). Außerdem wurden Befragungen weitgehend auf sonnige Verhältnisse reduziert, also mit geschlossenem Sonnenschutz (Kapitel 3) und nur vereinzelt bei bedecktem Himmel als Referenz durchgeführt. Ziel dieser Befragungen war es nicht, Aufschluss über Blendung durch, sondern über die Akzeptanz der geschlossenen bzw. aktiven Systeme und der resultierenden Tageslichtqualität im Vergleich zu erhalten.

Die statistische Versuchsplanung wurde in Zusammenarbeit mit dem Hochschulrechenzentrum der Universität Dortmund aufgestellt (Lehrstuhl für Mathematische Statistik), ebenso wie die Kodierung der Fragebögen für die Eingabe in das statistische Rechenprogramm SPSS [SPS] und die anschließende Auswertung (Statistisches Beratungszentrum der Universität Dortmund). Die Probanden durchliefen alle Räume und nahmen auf diese Weise mehrmals an den Versuchen teil. Um statistische Varianzen gering zu halten, wurde die Reihenfolge der zu durchlaufenden Räume für die Testpersonen mittels eines statistischen Versuchsplanes über den Befragungszeitraum von einem dreiviertel Jahr festgelegt. Ziel war es, eine möglichst gleichmäßige Verteilung von Raumfolgen zu erhalten und so eine eventuelle Beeinflussung von Probanden bei bestimmten Raumfolgen zu vermeiden.

4.3.2 Auswahl der Probanden

Zum Zweck der Akzeptanzermittlung wurden insgesamt ca. 30 Testpersonen akquiriert. Die Gruppe der Befragten bestand aus Männern und Frauen im Alter von 20 – 36 Jahren. Untersuchungen von Wolfgramm [WOL] und Boyce [BOY d] haben ergeben, dass es Unterschiede in der Bewertung von Lichtverhältnissen gibt, je nachdem, ob die Testpersonen im Themenfeld Beleuchtung arbeiten oder nicht. Bei anderen Untersuchungen [VEL] hingegen wurden keine Unterschiede festgestellt. Darauf wurde in dieser Studie in sofern Rücksicht genommen, als dass der Großteil der Probanden aus so genannten „naiven“ Personen besteht (Personen, die sich nicht näher mit dem Thema Licht beschäftigen). Die Testpersonen wurden durch eine etwa halbstündige Einführungsveranstaltung auf ihre Aufgaben vorbereitet, d.h. Begriffe wie Sonnenschutz, Blendschutz, Lichtlenkung etc. wurden erklärt, um Missverständnisse und fehlerhafte Angaben auf ein Minimum reduzieren zu können. Fragen bezüglich der Funktion der Systeme oder auftretende Störungen, z.B. der Blendung konnten auf diese Weise wesentlich präziser abgefragt werden als dies bei nicht eingewiesenen Personen der Fall gewesen wäre. Die Fehlerquote aufgrund unverständlicher Angaben konnte somit auf ein Minimum reduziert werden.

4.3.3 Entwicklung der Fragebögen

Die Fragebögen wurden in Anlehnung an die von der IEA vorgegebenen Prozeduren für genutzte Gebäude [IEA a, c] in Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau geplant. Diese basieren auf der Annahme, dass Fragebögen an Nutzer in fertig gestellten Gebäuden gegeben werden, die in die Thematik und Begrifflichkeiten im Lichtbereich nicht eingewiesen werden. Im Gegensatz dazu hatte die hier vorliegende Studie andere Rahmenbedingungen. Viele von den bei der IEA angesprochenen Fragen waren hier nicht als Variable vorhanden sondern fest vorgegeben und wurden aus diesem Grund nicht oder nur nebenbei abgefragt, so z.B. ob eine Schreibtischlampe

vorhanden ist und sie genutzt wird. Fragen zu anderen Themen, z.B. Kunstlicht wurden in den Fragebogen mit eingearbeitet, aber aufgrund der abweichenden Rahmenbedingung in veränderter Form.

Die zu untersuchenden Fragestellungen der Akzeptanzuntersuchungen wurden auf Basis der in Kapitel 2.2 durchgeführten Literaturlauswertung und den in Kapitel 3.2.1 erarbeiteten Kriterien formuliert. Dabei kamen folgende Themen zum Einsatz:

- Individuell gewünschte Einstellung der Systeme, sowohl des Sonnen- als auch des Blendschutzes und des Kunstlichtes
- Bewertung der Funktionsweisen der Systeme sowie der Eingriffsmöglichkeiten
- Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Systeme
- Bewertung des Beleuchtungsniveaus
- Bewertung der Blendung sowie Akzeptanz von möglicherweise auftretenden „Sonnenflecken“
- Licht- und Raumwirkung
- Bewertung der Innenraumtemperatur
- Bewertung einer Lichtlenkung, wenn vorhanden
- Privatheit sowie der Ästhetik der Systeme und Einsatz als Statussymbol
- Gesamtbeurteilungen

Zusätzlich wurden persönliche Daten (Alter, Wohnort, Beruf etc.), das allgemeine Wohlbefinden und die Beurteilung des Arbeitsplatzes durch die Probanden dokumentiert. Die Versuchsrandbedingungen (Systemeinstellungen, Wetter, etc.) wurden ebenfalls aufgezeichnet.

Die Komplexität der Wahrnehmung durch die Nutzer spielte bei der Auswahl der Fragen eine große Rolle (Kapitel 1.3.3). Dabei wurde darauf geachtet, dass sowohl mit allgemeinen Daten, die nichts mit der Beleuchtung zu tun haben, als auch lichttechnischen und nicht lichttechnischen Daten, die jedoch mit der Beleuchtung zusammenhängen, gleichermaßen aufgezeichnet wurden (Kapitel 2.1). Dabei kamen insbesondere unterschiedliche Fragetechniken zum Einsatz, die eine Überprüfung der Konsistenz innerhalb der Antworten der Nutzer leicht zulässt und in Kapitel 4.4.1 näher beschrieben werden. Ein vollständiger Fragebogen findet sich im Anhang (12.4.4).

4.3.4 Ablauf der Befragungen

Vor jeder Fragerunde wurden die einzelnen Räume und Systemeinstellung durch Momentaufnahmen mit einer Digitalkamera dokumentiert (Statusaufnahmen, Abbildung 4.3-1 links). Während der Befragungen wurde das Systemverhalten dokumentiert und konnte so mit den Befragungen referenziert werden (Abbildung 4.3-1 rechts).

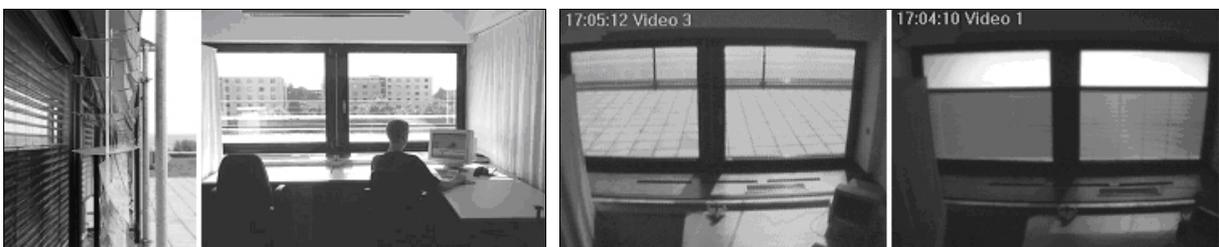


Abbildung 4.3-1: Links: Dokumentation der Systemeinstellungen und des Arbeitsplatzes vor den Befragungen; rechts: Dokumentation der Systeme während der Befragungen durch Digitalkameras

Die Befragungen wurden unter den ungünstigsten Bedingungen durchgeführt, also am (späten) Nachmittag, wenn die Sonne ihren steilsten Höhenwinkel überwunden hat und senkrecht auf die Fassade scheint. Alle Jahreszeiten einbeziehend wurde vorwiegend bei klarem Himmel und geschlossenen oder aktiven Systemen getestet. Abbildung

4.3-2 zeigt ein Ablaufdiagramm, welches eine Einarbeitungsphase zur Adaptation der Augen an die vorherrschenden Lichtbedingungen, eine etwa halbstündigen Bearbeitungsphase des Fragebogens und eine Phase der freien Systemeinstellung durch den Nutzer darstellt.

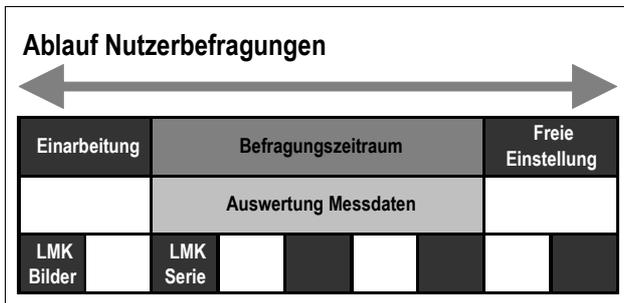


Abbildung 4.3-2: Ablaufschema der Nutzerbefragungen

Am Ende jeder Fragerunde hatten die Probanden die Möglichkeit, die Tageslichtsysteme nach freien Wünschen zu verändern. Auf diese Weise können die lichttechnisch oder wärmetechnisch optimierten Einstellungen mit den vom Nutzer gewünschten verglichen werden. Befragungen wurden von 2002 bis 2003 in vier Quartalen durchgeführt.

4.4 Auswertungsmethode

4.4.1 Struktur der Auswertung

Nach der Durchführung aller Befragungen über ein Jahr wurden die Ergebnisse zunächst in das Statistikprogramm SPSS [SPS] eingetragen und mit den Messdaten zu einem Gesamtdatensatz zusammengefügt. Um allgemeine Parameter, Messdaten und Befragungsergebnisse in ihrer Vielzahl zu fassen, wurden zunächst inhaltliche Kategorien als Grundlage für die Auswertung des Datensatzes gebildet. Tabelle 4.4-1: zeigt die auf Basis der in Kapitel 3.2.2 und Kapitel 4.3.3 beschriebenen Fragestellungen entwickelten Kategorien als Übersicht.

Tabelle 4.4-1: Übersicht über die Kategorien zur Auswertung der Daten

Allgemeine Daten	Messdaten	Spezielle Themen
Versuchsdokumentation (z.B. Wetter, Systemeinstellungen)	Temperatur innen/außen (°C)	Innenraumtemperatur
	Beleuchtungsstärken (lux) innen/außen vertikal und horizontal	Aussicht
		Blendung + Pattern
Persönliche Daten (z.B. Herkunft, Alter, Beruf)	Leuchtdichteaufnahmen aus Nutzerpositionen (Fischaugenobjektiv)	Bedienbarkeit und Funktion
		Raumhelligkeit
		Lichtlenkung
Wohlbefinden	Spektrale Messungen	Farben + Raumwirkung
Arbeitsplatz	Wetterdaten	Privatheit + Ästhetik
		Gesamtbeurteilungen

Anhand dieser Kategorien wurden vier Auswertungsphasen aufgestellt, die im Folgenden erläutert werden:

Auswertung I: Einfache Auszählung und Systemabhängigkeit

Anhand der definierten Kategorien wurden zunächst einfache Auszählungen ausgewertet. Die Daten wurden jeweils in ihrer Gesamtheit und getrennt nach Räumen (Systemen) analysiert, um Aufschluss über systemspezifische Parameter bzw. Abhängigkeiten zu bekommen. Hierzu wurde auch die statistische Signifikanz möglicher Unterschiede

in den Einzelräumen überprüft. Signifikanz bedeutet, dass eine Irrtumswahrscheinlichkeit ohne Annahme von Grenzwerten oder Mindestniveaus unter 5% vorliegt.

Auswertung II: Konsistenz des Datensatzes innerhalb der Kategorie

Eine zweite Auswertungsrunde prüfte die Signifikanz der Aussagen, die von den Probanden getroffen wurde, das heißt, Fragen ähnlichen Inhaltes wurden auf gleiche Antworten hin untersucht, um sicherzustellen, dass Fragen inhaltlich richtig eingeordnet und gewissenhaft bearbeitet worden sind. Darüber hinaus wurden mögliche Abhängigkeiten zwischen den Kategorien auf ihre signifikante Korrelation, also auf ihren Zusammenhang hin getestet.

Auswertung III: Faktorenanalyse

Die dritte Runde der Auswertungen setzt Befragungsergebnisse in Korrelation zu den zeitgleich gemessenen Daten. Diese abhängige Bewertung dient der Signifikanzprüfung der Messdaten im Bezug auf die Nutzerakzeptanz, überprüft also, ob und in welcher Weise die Antworten der Nutzer mit den objektiv gemessenen Werten übereinstimmen. Dabei wurden zunächst Messdaten anhand ihrer ähnlichen Verhaltensweisen zu Faktoren zusammengefasst und diese mit den Befragungsergebnissen auf signifikante Korrelationen hin geprüft.

Auswertung IV: Schwellwertanalyse

In der letzten Auswertungsreihe wurden die in der Faktorenanalyse relevanten, also signifikant abhängigen, Fragen und Messdaten erfasst und diese einer Schwellwertanalyse unterzogen. Das heißt, es wurde geprüft, bei welchen gemessenen Werten man bestimmte Antworten mit einer Wahrscheinlichkeit zu etwa 80% voraussagen kann. Dieses Verfahren verspricht bessere Indikatoren für die Voraussage subjektiver Bewertungen als es etwa Mittelwerte vermögen, da diese die Bandbreite der Antworten nicht erfassen können.

4.4.2 Statistische Methoden

Die statistische Auswertung wurde in Kooperation mit dem statistischen Beratungszentrum durchgeführt. Hier konnten Zusammenhänge von Befragungsergebnissen mit Messdaten programmiert und später von der Autorin analysiert werden. Die aus den Befragungen resultierenden Mess- und Befragungsdaten wurden in die Statistiksoftware SPSS [SPSS] eingearbeitet und entsprechend ihrer Art kodiert oder numerisch bearbeitet. Dabei kamen unterschiedliche Fragetypen zum Einsatz. Zum einen gab es „Ja-Nein“ Fragen, oftmals mit einer zweiten Frage kombiniert, „Wenn ja, dann...“. Des Weiteren wurden bei einigen Fragen Benotungen eingesetzt, die sich auf die aus dem Schulnotensystem bekannte Skala 1-6 beziehen. Außerdem wurden freie bipolare Skalen mit sieben Punkten genutzt, bei dem die Probanden zwischen zwei Begriffen „nach dem Gefühl“ urteilen konnten. Fragen, bei denen gegebene Ausdrücke angekreuzt werden konnten bilden den Abschluss. Abbildung 4.4-1 zeigt einen Ausschnitt des Fragebogens. Der vollständige Fragebogen findet sich im Anhang (Kapitel 12.4.4).

2.a Schauen Sie sich das Sonnenschutzsystem in Ihrem Testraum an. Wann funktioniert das System Ihrer Beurteilung nach nicht bzw. ist das Tageslicht im Raum durch den Sonnenschutz gerade im Moment in irgendeiner Weise:								
Eingeschränkt	1	2	3	4	5	6	7	Nicht eingeschränkt
	<input type="checkbox"/>							
2.b Empfinden Sie die möglicherweise vorhandene Tageslichteinschränkung als störend?								
Störend	1	2	3	4	5	6	7	Nicht störend
	<input type="checkbox"/>							
3.a Schauen Sie sich bitte für einige Sekunden im Raum um. Ist eine Änderung der Farben im Raum durch das System festzustellen (zum Beispiel die Farbe der Wand/ Decke)?								
Ja	1						0	Nein
	<input type="checkbox"/>						<input type="checkbox"/>	

Abbildung 4.4-1: Screenshot des Fragebogens

Die Mess- und Befragungsdaten wurden zunächst unabhängig voneinander ausgewertet (deskriptive Statistik, Chi² Test, Mittelwertanalyse). Auf diese Weise konnten Fehler im Datensatz aufgedeckt, die Konsistenz der Daten geprüft und somit die Geltungsbereiche ermittelt werden. Außerdem konnten mögliche Unterschiede in den Räumen auf ihre Signifikanz hin geprüft werden (Auswertung I bis II, Kapitel 4.4.1). Eine Signifikanz besteht, wenn der p Wert kleiner oder gleich 0,05 ist.

In einem zweiten Schritt wurden die Daten in abhängigen und unabhängigen Variablen verglichen und analysiert um so möglicherweise signifikante Zusammenhänge zwischen Befragungsergebnissen, Messdaten und anderen baulichen Zusammenhängen herauszufiltern. Hierzu wurden je nach Art der Daten der Korrelationskoeffizient nach Pearson, der Kontingenzkoeffizient (auch Chi²) und die Korrelation nach Spearman genutzt. Die Faktorenanalyse untersuchte Messdaten zudem auf ihr ähnliches Verhalten und fasste sie zur Datenreduktion zu wenigen Faktoren zusammen. Anhand dieser, den größten Teil der Variablen abdeckenden, Faktoren konnte dann der Einfluss bestimmter Messdaten auf die Antworten der Probanden analysiert (Auswertung III, Kapitel 4.4.1).

Die Diskriminanzanalyse teilt Fälle aufgrund diverser Merkmale in eine von mehreren bekannten Gruppen ein. Ziel ist, ein Vorhersagemodell der Gruppenzugehörigkeit zu ermitteln. Hierzu werden noch einmal die zuvor ermittelten Faktoren herangezogen, um ihre Gültigkeit im Bezug auf die einzelnen Systeme zu ermitteln. In einem letzten Schritt werden Grenzbereiche auf Basis der Faktoren und Diskriminanz ermittelt. Das Ziel hierbei ist, Aussagen darüber zu erhalten, bei welchen Situationen, also objektiven Messwerten, ein Großteil (um 80%) der Probanden mit der jeweiligen Fragestellung zufrieden oder unzufrieden ist, um auf diese Weise Voraussagen für die weitere Planung zu ermöglichen (Auswertung IV, Kapitel 4.4.1).

4.4.3 Ergebnisanalyse

Für die Auswertung wurden grundsätzlich zwei unterschiedliche Arten des Datensatzes genutzt. Zum einen wurden die Daten in ihrer Gesamtheit, das heißt über alle 336 Befragungen hinweg ausgewertet. Dies geschah, um unabhängig vom Systemzustand oder den Wetterbedingungen resultierende Werte und Befragungsergebnisse zu erhalten. Zum zweiten wurde der Filter „System“ eingesetzt, der nur weitgehend sonnige Außenbedingungen mit geschlossenen Systemen betrachtet. Wenn nicht anders angegeben wurde der Filter „System“ verwendet, das heißt, die Daten bei geschlossenem Sonnenschutz zu Grunde gelegt. Dies bildet den Fokus der Studie. Fragen, die auf einer Skala von 1 – 7 zu beantworten waren, wurden in der Auswertung meist zur besseren Übersicht zusammengefasst, das heißt, die Skalenpunkte 1-3 bezeichnen dann zum Beispiel „eher gut“, der Skalenpunkt 4 „neutral“ und die Skalenpunkte 5-7 „eher schlecht“.

Folgende Grafiken bzw. Darstellungen werden verwendet:

- Balkendiagramm (Beispiel Abbildung 5.3-1): Einfache Auszählung über alle Räume und Befragungen hinweg, in diesem Fall sind Prozentangaben auf den Gesamtdatensatz bei geschlossenem Sonnenschutz bezogen, oder aber nach Räumen getrennt aufgeschlüsselt, dann werden jeweils die Prozent pro Raum unabhängig von Ergebnissen in anderen Räumen angegeben.
- Boxplotdiagramm (Beispiel Abbildung 5.2-2): Hier werden Messwerte in der Zusammenfassung oder nach Räumen getrennt aufgezeigt. Angegeben werden der Median (Wert, bei dem jeweils 50% der Antworten oder Werte oberhalb und unterhalb liegen) sowie ein Bereich von 95%, in dem die häufigsten Messwerte oder Antworten liegen.
- Liniendiagramme mit Mittelwertbildung (Beispiel Abbildung 6.2-4): Für die Darstellung der Ergebnisse der interkategorialen Analyse sowie für die Faktorenanalyse werden meist Mittelwerte als zusammenfassende Grafik gewählt, die sich jeweils auf den Gesamtdatensatz oder aber die Einzelräume beziehen. Die Faktorenanalyse selbst wird nicht über Mittelwerte durchgeführt, sondern anhand der Zusammenhänge der jeweiligen Einzelmesswerte mit den Befragungsergebnissen.

- Textvariablen (Beispiel Abbildung 5.3-18): Zum Teil wurde innerhalb des Fragebogens die Möglichkeit gegeben, freie Texteingaben und Kommentare zu schreiben. Diese wurden für die Auswertung zusammengefasst und jeweils Prozentual dargestellt. Dabei konnten bei manchen Fragen mehr als eine freie Textangabe gemacht werden, so ergeben sich in der Summe häufig mehr als 100%.
- Tabellarische Übersicht über die Ergebnisse der Faktorenanalyse: Dabei werden signifikant positive Abhängigkeiten, also je höher der Messwerte desto mehr Punkte bei den Befragungen, mit „+“ bezeichnet und negative mit „-“. Teilweise wurden zusätzliche Auswertungen durchgeführt, die in der Faktorenanalyse nicht signifikant waren, aber trotzdem wichtige Zusammenhänge zeigen. Diese werden in Klammern angegeben. Beschrieben werden nur jeweils die wichtigsten Zusammenhänge.

5 Feldversuche – Messungen und Befragungen

5.1 Ergebnisse - Allgemeine Parameter

Zu den allgemeinen Parametern zählen persönliche Daten der Probanden wie z.B. die Altersverteilung oder das Geschlecht. Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf den Gesamtdatensatz von 336 Befragungsrunden.

5.1.1 Personendaten

Insgesamt haben 28 zuvor eingewiesene, aber „naive“ Probanden an den Befragungen teilgenommen. 88% der Fragebögen wurden von Personen deutscher Nationalität ausgefüllt, die restlichen 12% von Probanden unterschiedlicher ausländischer Herkunft.

Die Geschlechterverteilung zeigte sich mit 45% weiblicher und 55% männlicher Testpersonen relativ ausgewogen. 51% der Fragebögen wurden von Personen mit Sehhilfe und 49% von Personen ohne Sehhilfen ausgefüllt.

Ein relativ großer Prozentsatz, nämlich 91% der Fragebögen wurden durch Rechtshänder bearbeitet. Die Probanden kamen zu 83% aus einem großstädtischen Gebiet. 86% der Fragebögen wurden von Studenten unterschiedlicher Fachbereiche bearbeitet, die restlichen 14% waren Angestellte unterschiedlicher Berufe.

Die Altersverteilung der Probanden ist in Abbildung 5.1-1 grafisch dargestellt.

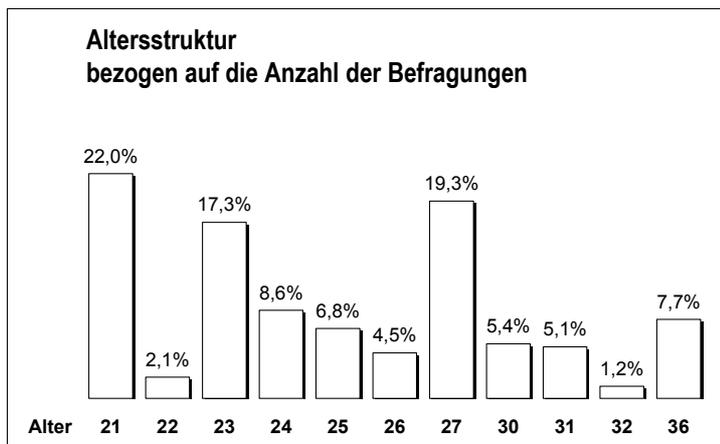


Abbildung 5.1-1: Verteilung des Alters der Probanden über der Anzahl der Befragungen

5.1.2 Zeitliche Verteilung der Befragungen

Über das Jahr gesehen wurde die meteorologische Definition der Jahreszeiten (beginnend am 1.12., 1.3., 1.6., 1.9.) genutzt, um die Sonnenhöhen deutlich unterscheiden zu können. Insgesamt neun Termine konnten im Sommer durchgeführt werden, 14 Termine im Frühjahr und Herbst und ebenfalls neun Termine im Winterquartal. Die Befragungen wurden zur Erfassung der für eine Südwestfassade kritischen Sonnenstände zwischen 13:00 und 17:00 Uhr durchgeführt.

Eine Übersicht der Befragungszeiträume ist in Abbildung 5.1-2 dargestellt.

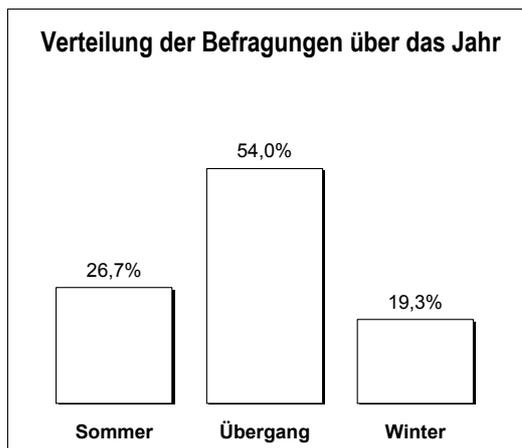


Abbildung 5.1-2: Verteilung der Befragungen über das Jahr bei geschlossenem Sonnenschutz

5.1.3 Wetterbedingungen und Systemzustand

Etwa 75% der Befragungen wurden bei klarem Himmel und geschlossenen Systemen (Systemeinstellung 2) durchgeführt, 18% der Befragungszeiträume hatten leicht bewölkten Himmel und 7% wurden als Referenz bei bedeckten Verhältnissen und der Systemeinstellung 1 (nicht aktive bzw. geöffnete Systeme) durchgeführt. Demnach wurden 93% der Befragungen bei geschlossenen bzw. aktiven Systemen durchgeführt. Dieser Datensatz bildet die Grundlage für einen Großteil der Auswertungen (Filter „System“). Er wird verwendet, wenn nicht anders angegeben.

5.2 Ergebnisse Messwerte

5.2.1 Beleuchtungsstärken außen

Bei geschlossenen Systemen (sonnig und teilweise sonnig) traten während der Befragungen die folgenden Spannweiten von Messwerten im Außenbereich auf (Tabelle 5.2-1):

Tabelle 5.2-1: Zusammenfassung der Außenbeleuchtungsstärken bei geschlossenen Systemzuständen

Außenbeleuchtungsstärken bei geschlossenen Systemen				
Angaben in (Lux)	Min	Max	Spannweite	Mittelwert
Außen vor der Fassade vertikal gemessen	7.182	114.870	107.688	65.257
Gesamtstrahlung global	5.581	79.895	74.314	43.216

5.2.2 Beleuchtungsstärken im Innenraum

Ein wesentliches Gütemerkmal für die Beleuchtung nach geltenden Regelwerken stellt die Beleuchtungsstärke im Innenraum dar. Das Lichtniveau und der Verlauf in der Raumtiefe bilden relevante Kriterien für die Beurteilung eines Arbeitsplatzes. Exemplarisch zeigt Abbildung 5.2-1 vergleichende Messungen dreier Räume bei geschlossenen Systemen und sonnigen Bedingungen aus den Messreihen des Forschungsprojektes „Licht in Büroräumen“ [MÜL b]. Deutlich wird, dass unterschiedliche Systeme sehr unterschiedliche Beleuchtungsstärken und Verläufe im Raum erzeugen können. Messungen in der Raumtiefe, also an fünf Messpunkten in der Arbeitsebene konnten für die Nutzerakzeptanzuntersuchungen nicht durchgeführt werden, sondern nur für den fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene (Kapitel 4.2.1).

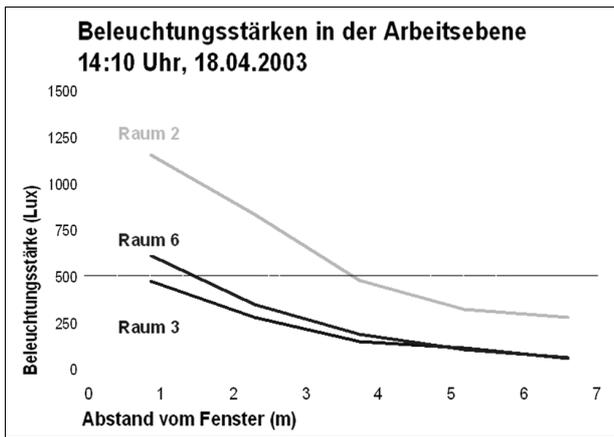


Abbildung 5.2-1: Beleuchtungsstärken in der Raumtiefe im Vergleich dreier Systeme bei geschlossenem Sonnenschutz (Außenbeleuchtungsstärke 66 klx)[MÜL b]

Die Bandbreite der Messwerte im Innenraum bei geschlossenem Sonnenschutz und sonnigem Wetter während der Befragungen wird in Tabelle 5.2-2 unabhängig von eingesetzten Systemen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5.2-2: Zusammenfassung der Innenbeleuchtungsstärken ohne Raumbezug (Messpositionen siehe Kapitel 4.2.1)

Innenbeleuchtungsstärken bei geschlossenen Systemen				
Angaben in (Lux)	Min	Max	Spannweite	Mittelwert
Messpunkt D1 (Decke)	35	4866	4831	954
Messpunkt D2 (Decke)	16	1355	1339	256
Messpunkt D3 (Decke)	9	295	286	105
Messpunkt A1 (Arbeitsebene)	58	4442	4384	916
Messpunkt RW1 (Rückwand vertikal)	8	936	928	205
Messpunkt vertikal in Augenhöhe AUG	91	6834	6743	1021

Insbesondere der Blick auf die Arbeitsebene in direkter Fensternähe (Messpunkt A1) mit Werten von 58 – 4442 Lux zeigen, dass die Funktion der Systeme eine große Rolle spielt; der höchste und der niedrigste Wert tritt hier bei den beiden reinen Sonnenschutzsystemen mit Sichtbezug nach außen auf; beide wurden in Kombination mit einem innen liegenden Blendschutz gemessen. Der sehr hohe Wert von über 4000 Lux trat nur vereinzelt auf und kann seine Ursache u.a. in einem Anteil direkter Strahlung auf den Messfühler haben. Abbildung 5.2-2 zeigt die Deckenmesspunkte im Raumvergleich. Deutlich bilden sich die Unterschiede in den Systemfunktionen zwischen reinen Sonnenschutzsystemen (Raum 1 und 5) und Lichtlenksystemen (Raum 2, 3, 4 und 6) ab.

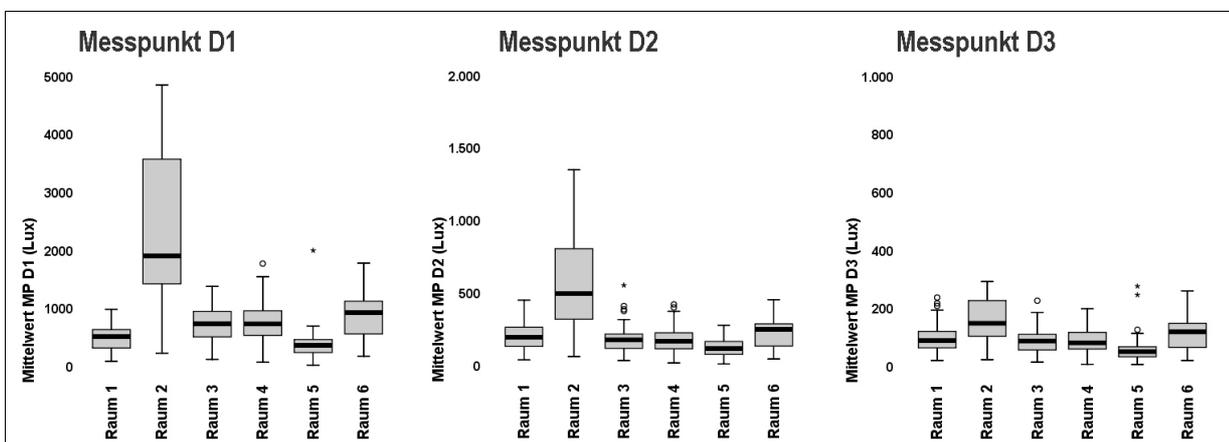


Abbildung 5.2-2: Auswertungen der Deckenmesspunkte bei geschlossenen Systemen im Raumvergleich

Der Vergleich der Beleuchtungsstärken in der Arbeitsebene (horizontal gemessen) mit den vertikal gemessenen Beleuchtungsstärken in Augenhöhe und an der rückwärtigen Wand (Abbildung 5.2-3) zeigt interessante Zusammenhänge.

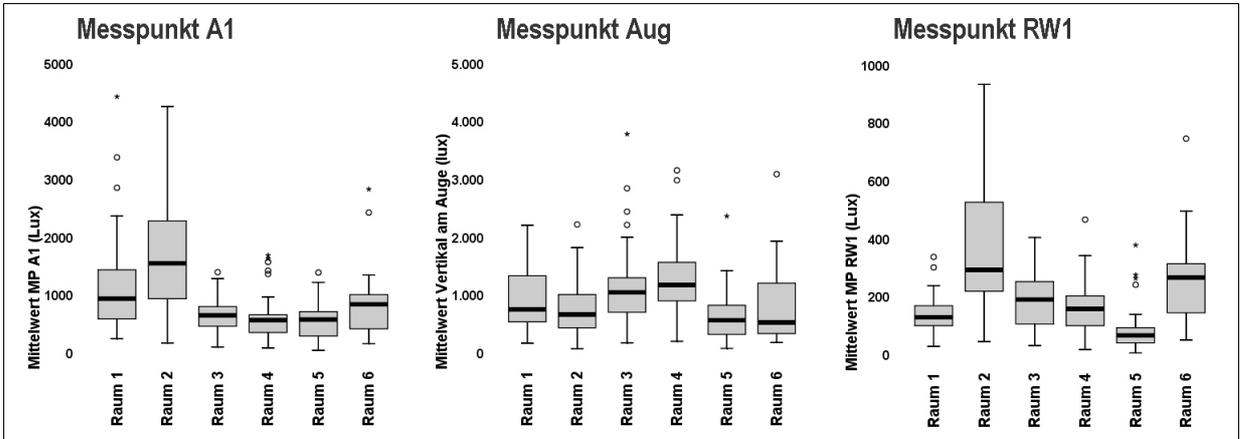


Abbildung 5.2-3: Auswertungen der Messpunkte horizontal in der Arbeitsebene (links), vertikal in Augenhöhe (Mitte) und vertikal an der rückwärtigen Wand (rechts) bei geschlossenen Systemen im Raumvergleich

Raum 2 weist horizontal in der Arbeitsebene (Messpunkt A1) und an der rückwärtigen Wand (Messpunkt RW 1) die höchsten Werte auf. Anders ist dies bei den Beleuchtungsstärken in Augenhöhe in Richtung Fenster gemessen (Messpunkt Aug), also demjenigen Messpunkt, der der tatsächlich auftretenden Beleuchtungsstärke am Auge am nächsten kommt (nicht zu verwechseln mit der resultierenden vertikalen Beleuchtungsstärke, die nach Abzug von Verschattung durch Gesichtsformen und nach Eintritt in das Auge tatsächlich auf der Retina ankommt, Kapitel 1.3.9). Hier weisen andere Systeme höhere Werte auf; die Lichtlenkfunktion des Systems 2 sorgt also durch die starke Lichtlenkung in die Raumtiefe für einen sehr hellen Raum, reflektiert dies aber gezielt auf die Arbeitsebene. Die Reflektion an die Decke, damit auch die Gesamthelligkeit ist demnach nicht verantwortlich für eine hohe Vertikalbeleuchtungsstärke auf dem Auge.

Für den bedeckten Himmel schreibt [DIN5034] Mindestwerte für Tageslichtquotienten vor. Für die Beleuchtung des Innenraumes bei geschlossenem Sonnenschutz gibt es solche Forderungen nicht. Hier kann der Sonnenlichtquotient [MÜL b, GÖT] Aufschluss über die Quantität des Tageslichtes im Raum geben (1.5.4.2). Abbildung 5.2-4 zeigt die Sonnenlichtquotienten nach Räumen für den fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene und an der Decke sowie für den Messpunkt in Augenhöhe bezogen auf die globale Außenbeleuchtungsstärke im Raumvergleich auf. Deutlich erkennbar wird auch hier wieder die unterschiedliche Funktionsweise der Systeme.

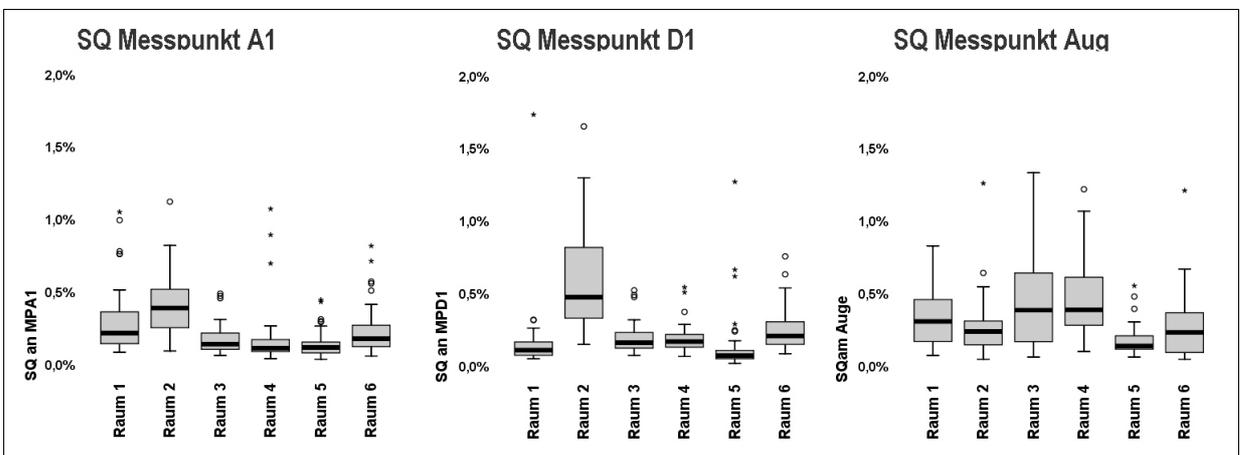


Abbildung 5.2-4: Sonnenlichtquotienten in der Arbeitsebene (links), am fensternahen Deckenmesspunkt (Mitte) und am vertikalen Messpunkt in Augenhöhe (rechts) bezogen auf die globale Außenbeleuchtungsstärke

Zusammenfassend hat die Position und Ausrichtung der gemessenen Beleuchtungsstärken im Innenraum einen großen Einfluss auf die Charakterisierung der unterschiedlichen Systeme. Im Bezug auf die Aktivierung des biologischen Rhythmus (Kapitel 1.3.9) wäre also eher die vertikale Beleuchtungsstärke relevant, während für die Sehaufgabe die bekannte horizontale Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene eine sinnvolle Größe darstellt.

5.2.3 Leuchtdichten im Innenraum

Bei Beginn jeder Befragungsrunde wurden jeweils die Leuchtdichten des Innenraumes mit einem Fischaugenobjektiv aus drei Positionen heraus aufgezeichnet (Kapitel 4.2.1 und 4.2.2). Zusätzlich konnten in je zwei Räumen zeitgleich während der Befragungen Leuchtdichtemessungen vorgenommen werden, die der Referenzierung der bei Beginn aufgezeichneten dienen. Auch hier werden die Messwerte bei geschlossenen Systemen und sonnigen Verhältnissen betrachtet.

Die maximalen und mittleren Leuchtdichten im Raum und auf verschiedenen Flächen (Arbeitsfläche, Fensterflächen, Lichtlenkflächen, Deckenflächen) geben Aufschluss über Verhältnisse von Leuchtdichten bzw. Kontrasten und über mögliche Blendquellen. Die minimalen Leuchtdichten gehen im Median jeweils gegen Null, der Mittelwert der Minimalwerte kann jedoch aufgrund einzelner höherer Werte durchaus ansteigen. Da dieser Wert für die Praxis eher irrelevant bleibt, wird auf eine Darstellung verzichtet. Für die Praxis relevant sind die mittleren und maximalen Leuchtdichten, die je nach System sehr unterschiedlich ausfallen können. Abbildung 5.2-5 zeigt die Mittelwerte (über den Zeitraum der Befragungen) aus den drei Messpositionen in der Zusammenfassung.

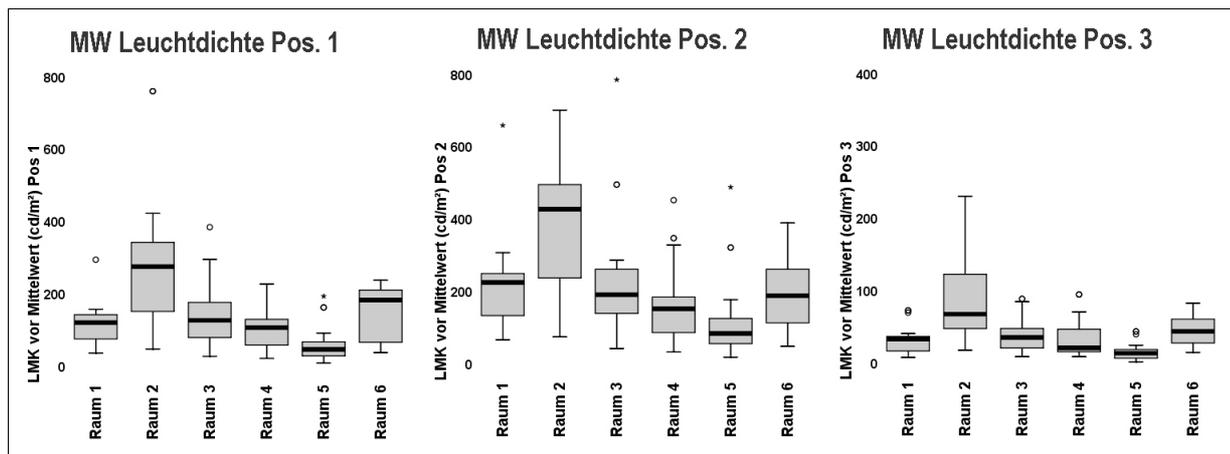


Abbildung 5.2-5: Mittlere Leuchtdichten zu Beginn der Befragungen aus den drei Messpositionen

Messraum 2 (Lichtlenkglas und Jalousie im Scheibenzwischenraum) weist aus allen Positionen heraus die höchsten mittleren Leuchtdichten auf, Raum 5 (elektrochromes Glas) verzeichnet aufgrund der Gesamtreduktion der Lichttransmission die niedrigsten Werte. Insgesamt wird die Lichtlenkfunktion der Systeme, so vorhanden, durch die mittlere Leuchtdichte deutlich abgebildet.

Bei der Betrachtung der maximalen Leuchtdichten während der Befragungen werden die unterschiedlichen Blickwinkel der Messpositionen deutlich (Abbildung 5.2-6). Position 1 und 2 zeigen die an den Arbeitsplätzen realistischen Positionen mit Blickrichtung zum Computerbildschirm und zum Fenster. Hier treten im Raum 1 die höchsten Bandbreiten an Leuchtdichten mit einem Median um 5000 cd/qm (Position 2) auf. Niedrigere maximale Leuchtdichten hat Raum 5 aufzuweisen. In diesem Raum, ausgestattet mit elektrochromem Glas und Blendschutz, treten in allen drei Positionen die geringsten Spannweiten der Leuchtdichten auf. Raum 2 tritt bei den Nutzerpositionen mit den niedrigsten Werten unter den Lamellensystemen deutlich heraus. Insgesamt sind die maximalen Leuchtdichten häufig deutlich höher als nach den Regelwerken empfohlen [ArbStVO, BildschVO, VDI 6011]. Zu überprüfen bleibt, in wie weit diese hohen Werte Blendung hervorrufen können.

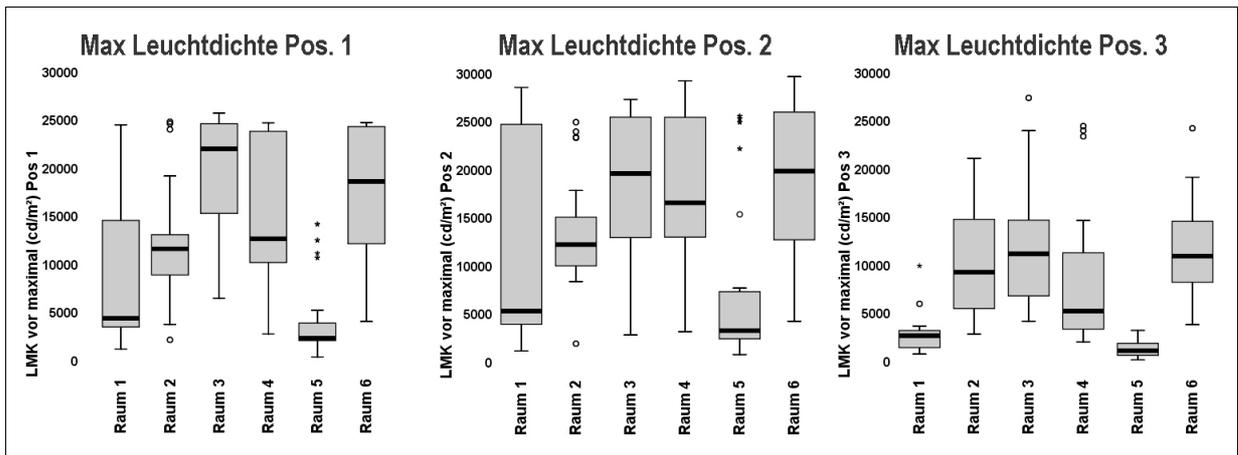


Abbildung 5.2-6: Maximale Leuchtdichten zu Beginn der Befragungen aus den drei Messpositionen heraus

Die beiden Messpositionen 1 und 2 sind von den Werten her leicht unterschiedlich, zeigen jedoch ein ähnliches Verhalten der Messwerte in den Räumen zueinander auf. In der weiteren Auswertung wird deshalb der Fokus auf die Position 2 mit den höchsten auftretenden maximalen Werten gelegt. Die abweichenden Werte bei der Betrachtung der Messposition 3 (die Aufnahme von der rückwärtigen Wand der Büroräume) liegen in der Auflösung der Leuchtdichtebilder begründet, die, hier den ganzen Raum erfassend, nicht mehr so detailliert dargestellt werden können. Zudem ändert sich der Blickwinkel auf die Systeme, was dazu führt, dass im Verhältnis höhere Werte in Raum 2, aber niedrigere Werte in Raum 1 auftreten.

Aufgrund der vorangegangenen Betrachtung der maximalen Leuchtdichten im Raum wird bei der Betrachtung von Einzelflächen der Fokus auf die Messposition 2 gelegt (höchste Werte). Unterschieden wird zwischen den Fensterflächen LF1 (Lichtlenkbereich) und LF2 (Sichtbereich) sowie der Betrachtung der Deckenfläche und der Arbeitsfläche (Abbildung 5.2-7). Insbesondere auf der Arbeitsfläche sind zum Teil wesentlich höhere Werte als 5000 cd/m² aufgetreten, die Reflexen auf der Arbeitsebene zuzuordnen sind.

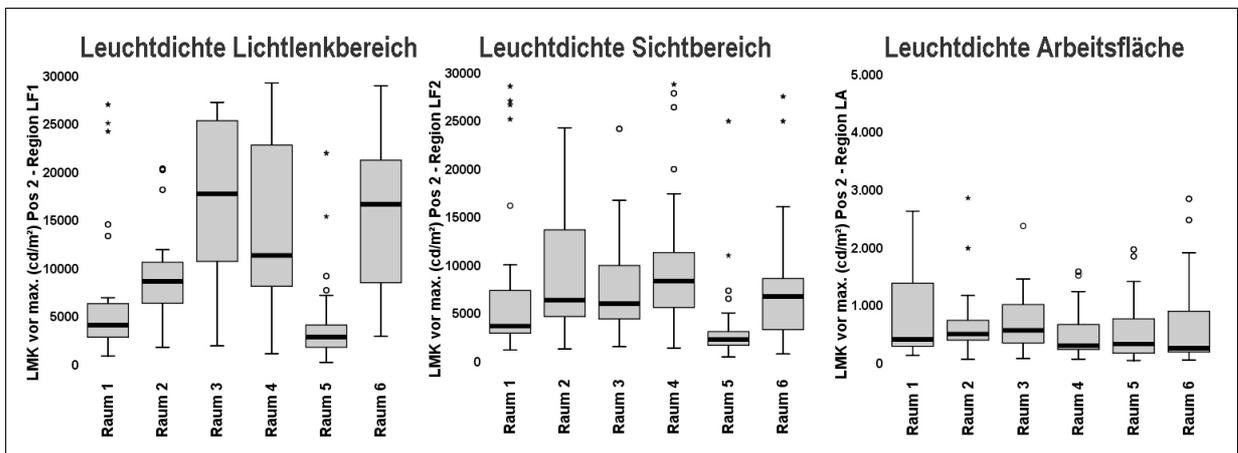


Abbildung 5.2-7: Maximale Leuchtdichten zu Beginn der Befragungen für Fensterbereiche und Arbeitsfläche

Die höchsten Leuchtdichten kommen auf der Lichtlenkfläche (Abbildung 5.2-7 links) der Systeme vor (System 2, 3, 4, und 6). Zu beachten ist hierbei, dass nicht alle Systeme mit einer Lichtlenkung ausgestattet sind, was sich deutlich in den Werten widerspiegelt. System 1 und 5 haben ähnliche Maximalwerte in den beiden Fensterflächen LF1 und LF2, da sie nur eine Funktion aufweisen. Bei den vier Lichtlenksystemen zeigt sich im oberen Bereich des Fensters ein höherer Median, im Raum 2 jedoch gerade im Lichtlenkbereich deutlich abgemindert im Gegensatz zu den Jalousiesystemen. Welche Bereiche aufgrund der hohen Werte und unter Berücksichtigung des Raumblickwinkels tatsächlich blenden, wird im weiteren Verlauf der Arbeit geprüft. Bei der Betrachtung der Arbeitsfläche sieht die

Verteilung der Werte anders aus (Abbildung 5.2-7 rechts). Die maximalen Leuchtdichten auf der Arbeitsfläche liegen mit einigen Abweichungen von Extremwerten (die zum Teil weit höher liegen als in der Grafik dargestellt) relativ niedrig, im Median bei allen Systemen um 500 cd/qm und in den Spannweiten in Einzelfällen bis ca. 2600 cd/qm. Zu prüfen bleibt hier, ob Blendung durch Leuchtdichten auf den Arbeitsflächen auftritt.

Eine Betrachtung der Bildschirmleuchtdichten war bei dieser Untersuchung aufgrund unterschiedlicher Bildschirme nicht möglich und auch nicht Ziel dieser Untersuchung. Dagegen werden die Leuchtdichtekontraste des nahen und fernen Umfeldes und die Uniformität in der Arbeitsebene in Abbildung 5.2-8 dargestellt.

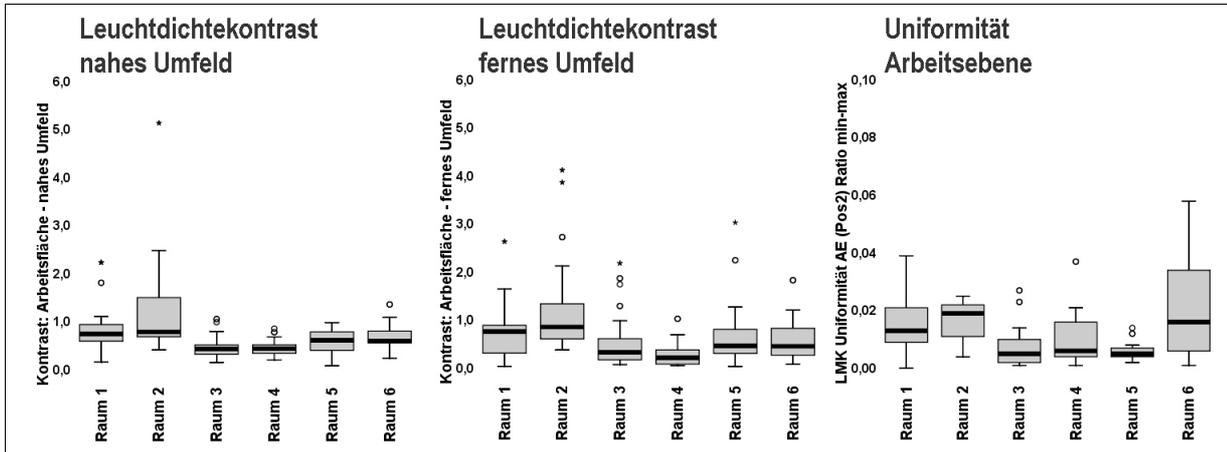


Abbildung 5.2-8: Kontraste zum nahen und fernen Umfeld und Uniformität in der Arbeitsebene

Die stärksten Kontraste des visuellen zum nahen und fernen Umfeld bei gleichzeitig höchster Raumhelligkeit liefert Raum 2. Geringe Kontraste weist Raum 4 auf, die Uniformität (E_{\min}/E_{\max}) ist bei Raum 5 am ausgeglicheneren.

5.2.4 Spektrale Messungen

Spektrale Messungen wurden innerhalb des Forschungsprojektes Licht in Büroräumen von der TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik durchgeführt. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden dazu Auswertungen zum Thema Farbmesungen erstellt, zum Teil auch unter Einbeziehung von Befragungsergebnissen [VOG, SCHU c]. Sofern sich die folgenden Analysen auf diese Arbeit beziehen, wird dies gesondert genannt.

5.2.4.1 Spektrale Verteilung

Die Verteilung des Lichtspektrums bei klarem und bedecktem Himmel im Außenbereich wird exemplarisch in (Abbildung 5.2-9) dargestellt.

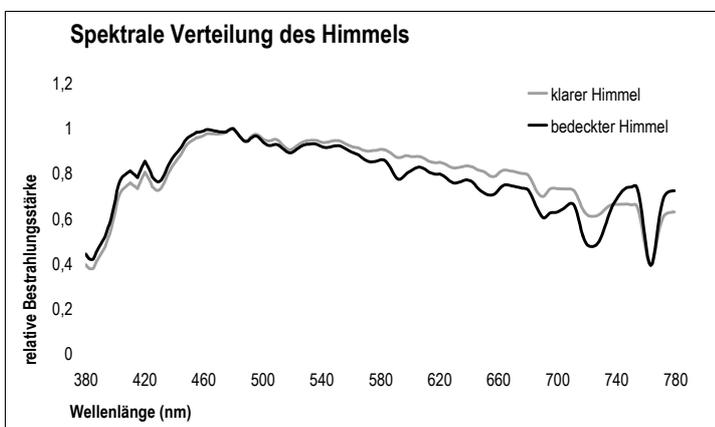


Abbildung 5.2-9: Spektrale Verteilung bei klarem (13.7.2003, 11:33 Uhr) und bedecktem Himmel (12.7.2003, 15:27 Uhr)

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 5.2-10 die Abweichungen der spektralen Verteilung bei geschlossenen Systemen sowie den Referenzraum ohne Sonnenschutz im Vergleich zum klaren Himmel. Liegt bei Außenmessungen der höchste Strahlungsanteil bei etwa 460 nm, so weichen die Werte bei System 2, 3 und 6 auf etwa 550 nm für die höchste relative Bestrahlungsstärke ab. System 5 (Elektrochromes Glas) weist niedrigere Anteile im Rot- und höhere im Blaubereich auf.

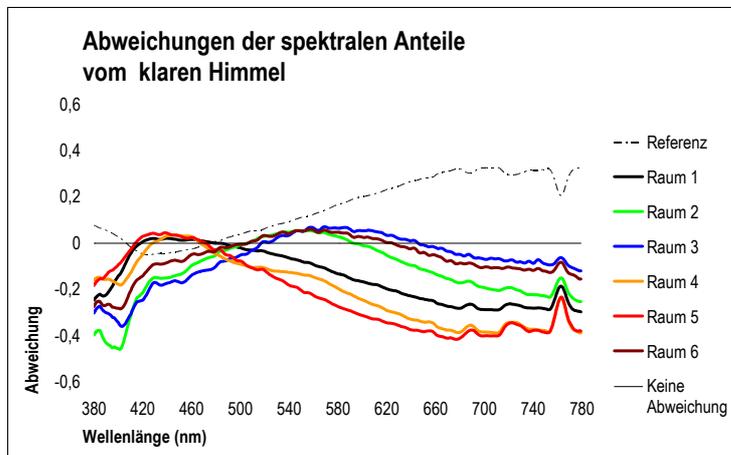


Abbildung 5.2-10: Abweichung der spektralen Anteile vom klaren Himmel (13.7.2003)

Insgesamt zeigt sich, dass die Sonnenschutzsysteme die spektrale Verteilung des Tageslichtes im Innenraum zum Teil sehr deutlich beeinflussen.

5.2.4.2 Farbtemperaturen der Himmelszustände

Messungen der Farbtemperaturen in der Raumtiefe bei unterschiedlichen Himmelszuständen, aber geöffneten Systemen (Referenz) zeigen den Einfluss der Außenbedingungen auf die Farbtemperaturen im Innenraum (Abbildung 5.2-11). Am fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene ist die Veränderung der Farbtemperatur durch ein System am deutlichsten, in der Raumtiefe gleichen sich die Farbtemperaturverläufe durch die Reflexion an den Oberflächen an. Im weiteren Verlauf der Untersuchung werden aus diesem Grund hauptsächlich die fensternahen Messpunkte betrachtet.

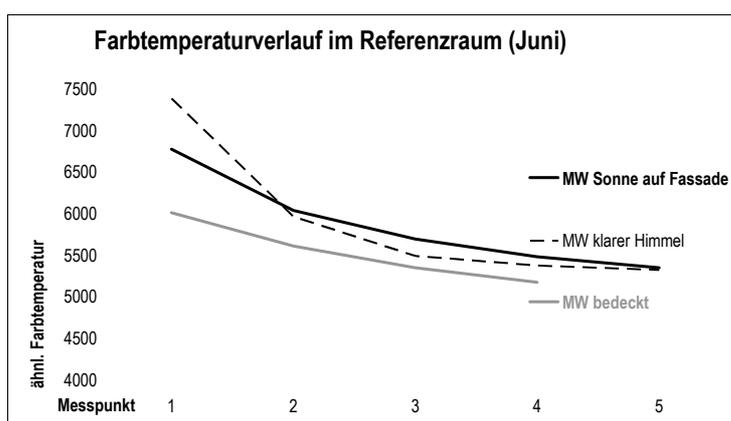


Abbildung 5.2-11: Farbtemperaturverlauf in der Raumtiefe bei unterschiedlichen Himmelszuständen ohne Sonnenschutzsystem (12. – 13.7.2003)

Die Außenmessungen dienen dazu, die verschiedenen Lichtfarben des Tageslichtes über den Tag verteilt zu ermitteln und zu protokollieren. Die Farbtemperatur ändert sich mit dem Sonnenstand, der Bedeckung und der Trübung der Atmosphäre. Jeweils eine horizontale und eine vertikale Messung wurden auf dem Dach des Gebäudes als Referenz durchgeführt. Die horizontale Messung fängt das Licht aus dem Zenitbereich des Himmels auf. Vertikal

wird das auf die Fassade auftreffende Licht gemessen. Eine Referenzmessung wurde im Testraum 3 ohne Sonnen- und Blendschutz am Messpunkt 2 in der Arbeitsebene durchgeführt, da hier die Farbänderung durch die Verglasung am besten ablesbar ist.

Abbildung 5.2-12 stellt die ähnlichsten Farbtemperaturen über einen klaren Sommertag im Referenzraum dar. Deutlich wird der Einfluss der direkten Einstrahlung auf die Fassade.

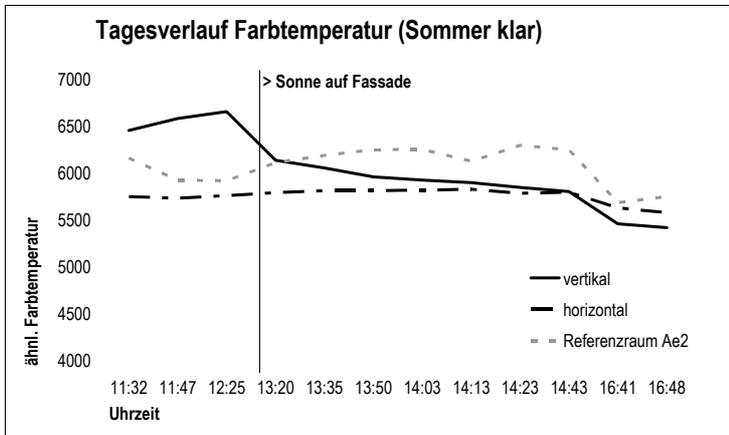


Abbildung 5.2-12: Vergleich der Farbtemperaturen Außenraum und Innenraum über einen klaren Sommertag [VOG]

Die horizontal gemessenen Werte liegen im Außenraum durchschnittlich ein wenig höher als auf der Arbeitsebene im Innenraum (Messpunkt A2), die zugleich geringeren Schwankungen unterworfen ist. Sie bleiben jedoch über den Tag relativ konstant auf Werten um 5700 Kelvin. Die vertikal gemessenen Werte steigen bis zur Mittagszeit auf bis zu 6700 Kelvin an, sie sinken ab ca. 13:00 Uhr, sobald direkte Strahlung auf die Fassade trifft bis auf 5400 Kelvin ab. Zu dieser Zeit korrespondieren sie weitgehend mit den Werten im Innenraum. Am Morgen bei lediglich klarem Himmel ohne direkte Einstrahlung auf die Fassade zeigen sich größere Abweichungen.

5.2.4.3 Einfluss des Blendschutzes auf die Farbtemperatur im Innenraum

Unterschiedliche Einflüsse wie Sonnenschutzsystem oder auch Blendschutzsysteme und die Verglasung selbst können Änderungen in der Farbtemperatur im Innenraum hervorrufen. Bei der Betrachtung des Einflusses des Blendschutzes ist nur eine geringe Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur festzustellen (Abbildung 5.2-13).

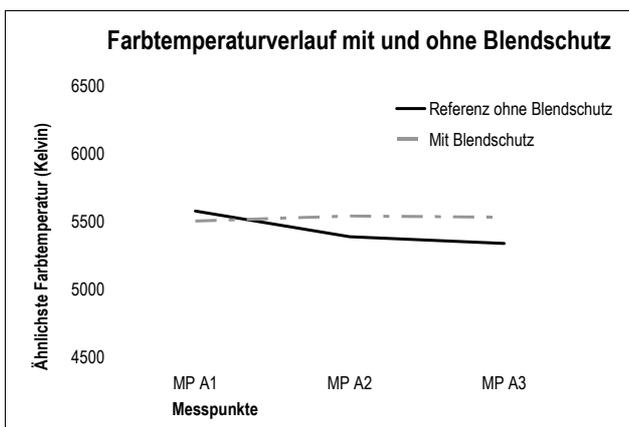


Abbildung 5.2-13: Vergleich der Farbtemperaturen in der Arbeitsebene mit und ohne Blendschutz [VOG]

Insgesamt bewegt sich die Farbtemperatur bei etwa 5500 K. Gemessen wurde bei bedecktem Himmel. Der Einfluss des Blendschutzes kann demnach für weitere Auswertungen vernachlässigt werden.

5.2.4.4 Farbtemperaturen Raumvergleich

Abbildung 5.2-14 zeigt einen Vergleich der Farbtemperaturen bei geschlossenem Sonnenschutz im Sommer mit direkter Sonneneinstrahlung sowie die Farbwiedergabeindizes aller Räume im Vergleich.

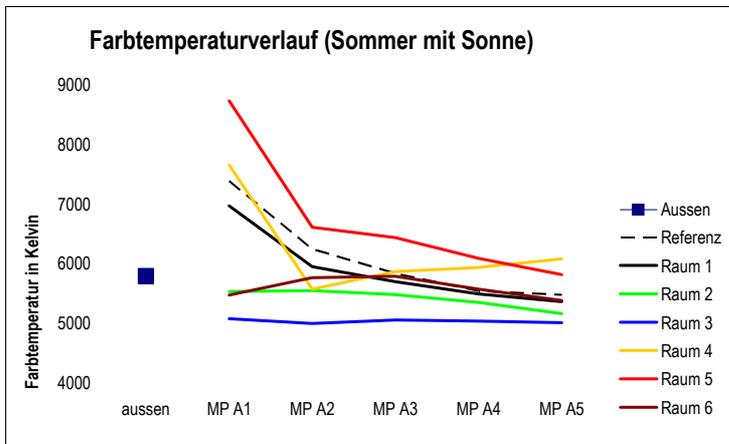


Abbildung 5.2-14: Raumvergleich ähnlichste Farbtemperaturen bei geschlossenem Sonnenschutz [VOG]

Eine Veränderung der Farbtemperatur des einfallenden Tageslichtes ist vor allem in Fensternähe zu verzeichnen (Messpunkt A1). Dies ist auch im Referenzraum ohne Tageslichtsystem der Fall. Die größte Änderung erfolgt im Raum 5 (Elektrochromes Glas). Im Raum 3 (Referenzraum mit außen liegender Jalousie) ist dagegen eine Absenkung der Farbtemperatur zu erkennen. In der Raumtiefe gleichen sich die Farbtemperaturen aufgrund der Reflexionen an raumbegrenzenden Oberflächen wieder den Außenwerten an (Messpunkte 2 bis 5).

Der Farbwiedergabeindex R_a zeigt einzig für Raum 4 (außen liegende Jalousie in Kombination mit Weißlichthologrammen) eine deutliche Abweichung mit niedrigeren Werten (Abbildung 5.2-15).

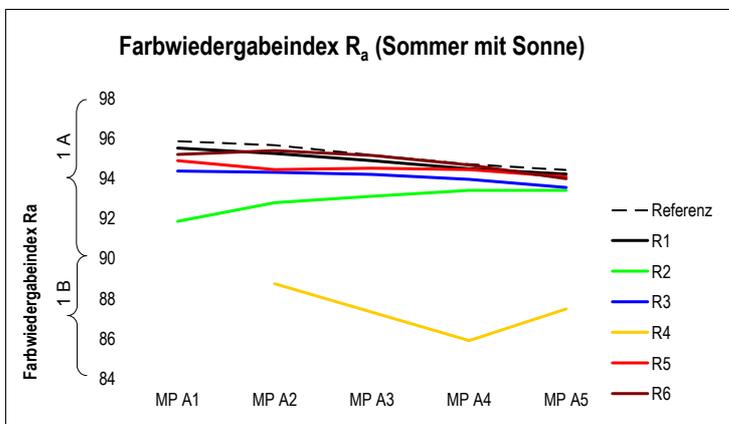


Abbildung 5.2-15: Farbwiedergabeindex R_a bei geschlossenem Sonnenschutz [VOG]

Die Farbwiedergabe ist demnach im Messraum 4 mit einem Farbwiedergabe der Kategorie 1B schlechter als in den anderen Räumen, die alle im Bereich 1A liegen.

5.2.5 Raumtemperatur

Raumtemperaturen haben einen Einfluss auf die Zufriedenheit am Arbeitsplatz (Kapitel 2.2.1). Daher wurden diese während der Befragungen aufgezeichnet. Die Versuchsräume konnten aufgrund ihrer baulichen Beschaffenheit nicht thermisch getrennt werden und so der Einfluss des jeweiligen Systems messtechnisch nicht erfasst werden. Der Einfluss der Innenraumtemperaturen auf die Nutzerzufriedenheit jedoch konnte dokumentiert werden, insbesondere der Einfluss der Systeme, d.h. das subjektive Empfinden der Raumtemperaturen (Kapitel 5.3.3). Abbildung

5.2-16 zeigt die Temperaturverteilung im Innenraum über das ganze Jahr während der Befragungen bei geschlossenen Systemen, das heißt direkter Besonnung der Fassade.

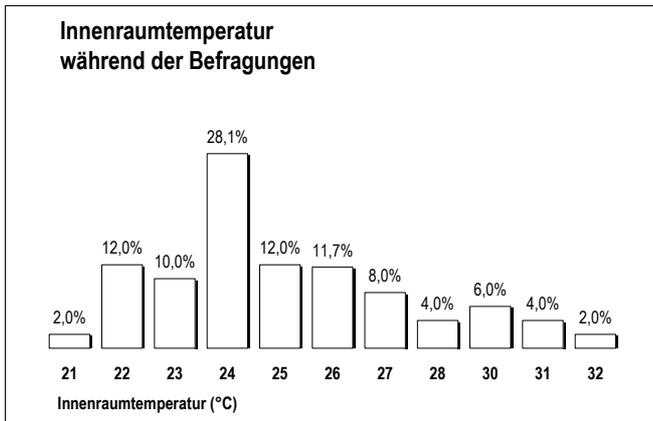


Abbildung 5.2-16: Temperaturverteilung im Innenraum (alle Befragungsrunden)

Die meisten Befragungen wurden bei Temperaturen zwischen 21 und 26°C im Innenraum durchgeführt. Die maximale Temperatur im Innenraum während der Befragungen betrug 32°C.

5.3 Beurteilungen der Probanden

5.3.1 Vorgehensweise

Zunächst wurde bei der Auswertung der Befragungsergebnisse geprüft, ob es möglicherweise unterschiedliche Aussagen bezogen auf das Geschlecht, das Alter oder sonstige individuelle Eigenschaften gibt. Keiner der Parameter zeigte sich in der vorliegenden Studie signifikant. Im weiteren Verlauf wird daher auf gesonderte Überprüfungen verzichtet. Im Folgenden werden die einzelnen Themenbereiche (Kapitel 4.4.3) jeweils in der einfachen Auszählung und der systemabhängigen Auszählung (A I) sowie ihrer Konsistenz innerhalb der Kategorie (A II) ausgewertet. Erläuterungen zu den Darstellungen und Auswertungen finden sich in Kapitel 4.4.3.

5.3.2 Arbeitsplatz

5.3.2.1 Ziel der Kategorie

Der Einfluss von Lichtverhältnissen und anderen raumspezifischen Parametern auf das Wohlbefinden wurde in Kapitel 2.2.1 dokumentiert. Die Räume in dieser Versuchsreihe waren alle identisch ausgestattet. Der Einfluss des jeweiligen Fassadensystems auf die Bewertung des Arbeitsplatzes soll in dieser Kategorie herausgefiltert werden.

Tabelle 5.3-1 zeigt die Fragen der Kategorie in der Zusammenfassung.

Tabelle 5.3-1: Fragen der Kategorie Arbeitsplatz

Kategorie Arbeitsplatz
Momentanes Wohlbefinden? (Schulnote)
Position des Bildschirms? (Optimal - Schlecht)
Nähe d. Fensters? (Gut - Zu weit)
Urteil Gesamtraum: Offen (Kein Kreuz - Kreuz)
Urteil Gesamtraum: Geschlossen (Kein Kreuz - Kreuz)
Urteil Gesamtraum: Eingeschlossen (Kein Kreuz - Kreuz)
Größe des Arbeitsbereiches? (Klein - Groß)

5.3.2.2 Einfache Auszählung (A I)

Das „momentane Wohlbefinden“ der Probanden war während der Befragungen bei fast 90% aller Befragungen deutlich im positiven Bereich (Abbildung 5.3-1 links). Die Fragen nach der „Position des Bildschirms“, der „Nähe des Fensters“ und der „Größe des Arbeitsbereiches“ werden insgesamt positiv beurteilt (Abbildung 5.3-1 rechts). Die neutralen Urteile (grauer Balken) werden am häufigsten bei der Beurteilung des Arbeitsbereiches gefällt.

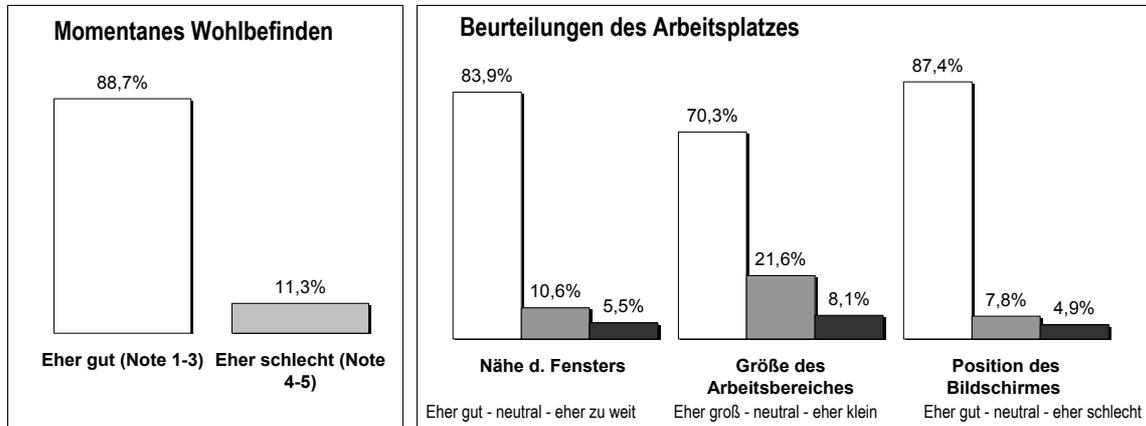


Abbildung 5.3-1: Links: Momentanes Wohlbefinden; rechts: Beurteilungen des Arbeitsplatzes

Die Beurteilung des Gesamttraumes nach den anzukreuzenden Kriterien der Beurteilung des Arbeitsplatzes „offen“, „geschlossen“ und „eingeschlossen“ wird in Abbildung 5.3-2 in der Übersicht gezeigt.

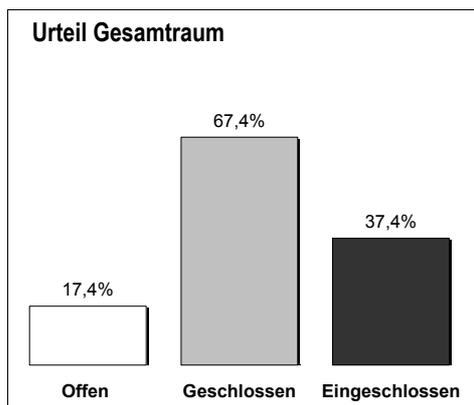


Abbildung 5.3-2: Beurteilung des Gesamttraumes nach den subjektiven Kriterien „offen“, „geschlossen“ und „eingeschlossen“

Insgesamt 17,4% beurteilen die Räume als „offen“, 67,4% als „geschlossen“ und immerhin 37,4% als „eingeschlossen“. Im weiteren Verlauf der Auswertungen werden diese Kriterien noch detaillierter beobachtet.

5.3.2.3 Systemabhängigkeit (A I)

Bei der Betrachtung des „momentanen Wohlbefindens“ gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Räumen (diese wurden alle im Median mit Note 2 bewertet), das heißt, dass davon ausgegangen werden kann, dass das jeweils eingesetzte Sonnenschutzsystem keinen Einfluss auf das Wohlbefinden der Probanden hat. Die Fragen nach der „Position des Bildschirms“ und der „Nähe des Fensters“ werden ebenfalls jeweils in allen Räumen ähnlich und mit guten Bewertungen, die Größe des Arbeitsbereiches mit „eher groß“ bewertet. Diese Fragen werden ohne signifikante Raum- bzw. Systemunterschiede bewertet. Somit kann der Arbeitsbereich im weiteren Verlauf als irrelevant für die Zufriedenheit mit den einzelnen Systemen betrachtet werden.

Anders ist dies bei den subjektiven Beurteilungen des Gesamttraumes nach „offen“, „geschlossen“ und „eingeschlossen“. Es zeigt sich, dass die Wirkung subjektiv unterschiedliche Urteile in Abhängigkeit der eingesetzten Systeme und deren Funktion ergeben. Abbildung 5.3-3 zeigt eine Zusammenfassung nach reinen Sonnenschutzsystemen (Raum 1 und 5) und den Jalousie- bzw. Lichtlenksystemen (Raum 2, 3, 4, 6), Abbildung 5.3-3 rechts zeigt die Beurteilungen der einzelnen Parameter aufgeschlüsselt nach den einzelnen Räumen.

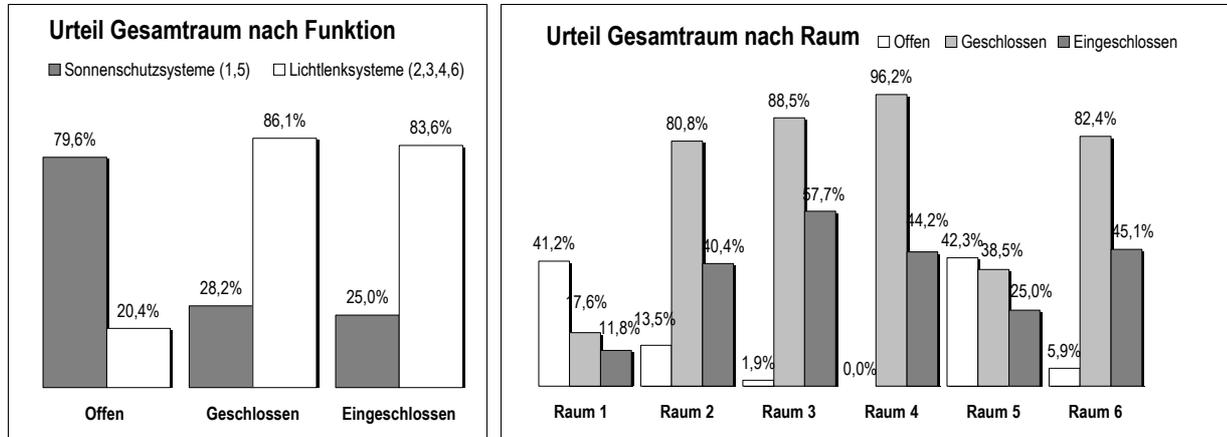


Abbildung 5.3-3: Links: Urteil des Gesamttraumes nach Systemfunktion; rechts: Urteil des Gesamttraumes nach Raum

Deutlich ist der Unterschied nach Art und Funktion des Sonnenschutzes. Diejenigen Systeme mit einer Sicht nach draußen (Raum 1 und 5) schneiden bei der Frage nach der Offenheit eines Raumes mit 79,6% positiver Antworten am besten ab. Bei einem Blick auf die Auswertung einzelner Räume werden Raum 1 und 5 mit 63,6% und 50% angegebenen Antworten als „offen“ bewertet. Alle anderen Räume liegen deutlich darunter, Raum 4 wurde in keinem Fall als „offen“ bezeichnet. Einzig Raum 2 macht bei den Jalousiesystemen eine Ausnahme mit 14,6% Beurteilungen „offen“. Die Ursache wird im weiteren Verlauf näher untersucht.

5.3.2.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Das „momentane Wohlbefinden“ korreliert nicht mit der Beurteilung „offen“, „geschlossen“ und der „Größe des Arbeitsbereiches“, es korreliert jedoch mit der „Position des Bildschirms“, der „Nähe des Fensters“ und der Gesamtbeurteilung „eingeschlossen“. Hier zeigt sich eine leichte negative Tendenz, das heißt, je weniger Wohlbefinden, desto eher lautet die Beurteilung „eingeschlossen“ oder aber auch je eingeschlossener sich die Probanden fühlen, desto eher beeinflusst dies das Wohlbefinden. Die Größe des Arbeitsbereiches zeigt ebenfalls Korrelationen zum Gesamturteil „eingeschlossen“. Das heißt, je eher die Probanden das Urteil „eingeschlossen“ abgegeben haben, desto eher wird auch die Größe des Arbeitsbereiches als weniger groß bewertet. Da bei beiden Korrelationen nur eine leichte Tendenz erkennbar ist, kann dieser Zusammenhang nur mit einer deutlich höheren Zahl an Befragungen überprüft werden, da hier vermutet wird, dass die Abhängigkeit eher auf der Aussicht beruht.

5.3.3 Innenraumtemperatur

5.3.3.1 Ziel der Kategorie

Die Kategorie Temperatur konzentriert sich auf die Beurteilung der Innenraumtemperaturen. Diese konnten aufgrund des Settings im Messlabor nicht getrennt erfasst, sondern nur für die Anlage insgesamt gemessen werden. Trotzdem werden Fragen dieser Kategorie (Tabelle 5.3-2) zum Teil subjektiv systemabhängig bewertet. Darüber hinaus soll ein möglicher Zusammenhang mit der Innenraumbeleuchtung herausgearbeitet werden.

Tabelle 5.3-2: Fragen der Kategorie Innenraumtemperatur

Kategorie Temperatur
Temperatur im Raum? (Richtig - Zu hoch)
Behinderung durch Hitze? (Nein - Ja)
Schutz gegen Wärmeeinstrahlung? (Ja - Nein)

5.3.3.2 Einfache Auszählung (A I)

Die einfache raumunabhängige Auszählung zeigt einen relativ geringen Prozentsatz an Bewertungen „zu kalt“ oder „zu warm“ (Abbildung 5.3-4), unter Berücksichtigung der gemessenen Temperaturen während des Sommers.

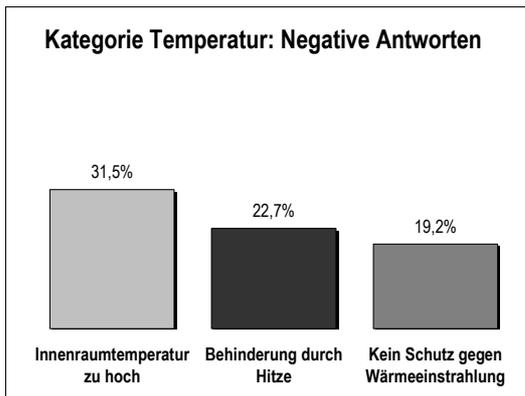


Abbildung 5.3-4: Zusammenfassung der negativen Antworten in der Kategorie Temperatur

So empfinden 31,5% der Probanden die Innenraumtemperatur als zu hoch. Dagegen fühlen sich 22,7% durch die Hitze im Raum behindert und 19,2% erklären das Sonnenschutzsystem für unzureichend gegen die Wärmeeinstrahlung. Die Innenraumtemperatur wird damit auf einem anderen Niveau bewertet als die Schutzfunktion oder eine Störung durch zu hohe Raumtemperaturen.

5.3.3.3 Systemabhängigkeit (A I)

Zwei der drei Fragen dieser Kategorie zeigen sich in ihrer Bewertung systemabhängig, die dritte Frage war bei der Prüfung der Raumunterschiede nicht signifikant. Abbildung 5.3-5 zeigt die beiden systemabhängigen Bewertungen (Beurteilung der Innenraumtemperatur und der Schutzfunktion) in der Zusammenfassung.

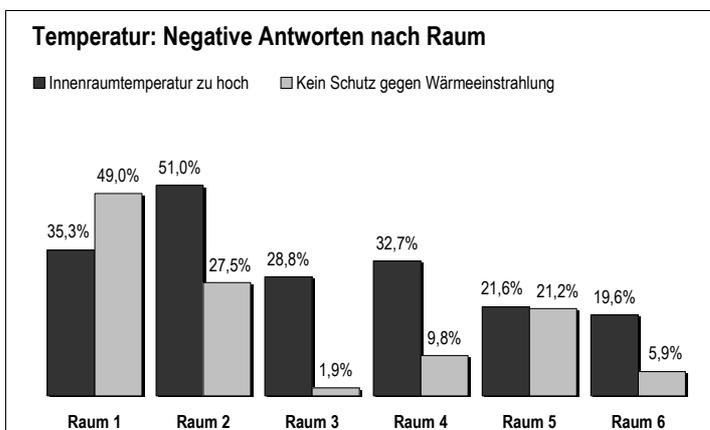


Abbildung 5.3-5: Zusammenfassung der negativen Antworten nach Räumen getrennt

Bei der Empfindung der Innenraumtemperatur wird Raum 2 mit 51% Antworten „zu hoch“ am kritischsten beurteilt. Dies mag in höheren Oberflächentemperaturen durch das im Scheibenzwischenraum liegende System begründet

liegen. Nachfolgend stehen System 1, bei dem aufgrund der Wirkungsweise mehr diffuse Strahlung in den Raum hineingelangt, und System 4, welches schlechter bewertet wird als das Referenzsystem 3. Ein möglicher Grund könnte die Farbänderung sein, die bei Raum 4 durch den Einsatz der Weißlichthologramme entsteht. Bei der Beurteilung der Systeme hinsichtlich ihrer Schutzfunktion schneidet Raum 1 am schlechtesten ab. Hier scheint die „sichtbare Funktion“ eine größere Rolle zu spielen, das heißt, die subjektive Beurteilung, dass man seinen Raum vor der eintretenden Strahlung „verschließen“ kann, wie das bei allen Jalousiesystemen der Fall ist. Raum 3, 4 und 6 liegen hier deutlich vorne, Raum 2 wird, vermutlich aufgrund der höheren Oberflächentemperaturen, eher schlechter bewertet und für Raum 5 gilt dasselbe Prinzip wie für Raum 1 in abgemindeter Form, da die Einfärbung des elektrochromen Glases eine gewisse „Dunkelheit“ erzeugt und somit die Schutzfunktion deutlich zeigt. Die Ursachen werden im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht.

5.3.3.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Bei der Überprüfung des Datensatzes Temperatur stellte sich heraus, dass das momentane Wohlbefinden (aus der Kategorie Arbeitsplatz) konsistent ist mit der Frage nach der Temperaturempfindung und der Bewertung der möglichen Behinderung durch zu große Hitze, nicht jedoch mit der Frage nach der Schutzfunktion der Systeme. Es wird hier also klar unterschieden zwischen Systemfunktion und dem eigenen Empfinden.

5.3.4 **Ausblick**

5.3.4.1 Ziel der Kategorie

Die Kategorie Ausblick verfolgt vorrangig das Ziel, auftretende negative Bewertungen eines eingeschränkten Ausblicks zu erkennen und mögliche Zusammenhänge mit anderen Parametern, zum Beispiel der Raumhelligkeit zu analysieren. Tabelle 5.3-3 zeigt die Fragen zum Thema Ausblick in der Übersicht.

Tabelle 5.3-3: Fragen der Kategorie Ausblick

Kategorie Aussicht
Verminderung des Ausblicks mit Sonnenschutz? (Nein - Ja)
Verminderung Ausblick positiv - negativ?
Tageslicht durch Sonnenschutz eher nicht eingeschränkt - eher eingeschränkt?
Einschränkung eher nicht störend - eher störend?
Ausblick ins Freie eher nicht beschränkt - beschränkt?
Ausblick ins Freie eher nicht gestört - eher gestört?
Ausblick ins Freie eher ausreichend - eher nicht ausreichend?
Positive Eigenschaft des Systems: ausreichende Sicht (Kein Kreuz - Kreuz)
Negative Eigenschaft des Systems: Sichtverbindung nicht ausreichend (Kein Kreuz - Kreuz)
Schwankungen des Tageslichtes bemerkbar? (Ja - Nein)
Schwankungen des Tageslichtes störend - nicht störend?

5.3.4.2 Einfache Auszählung (A I)

In dieser Kategorie gibt es sehr eindeutige Aussagen zur Art des Ausblicks, die ein Sonnenschutz- oder Lichtlenksystem gewährt. Fragt man nach der „Verminderung des Ausblicks“, und, wenn vorhanden, ob diese dann positiv oder negativ wahrgenommen wird so zeichnet sich ein klares Bild (Abbildung 5.3-6 links).

61,5% der Probanden empfinden (über alle Räume hinweg) eine Verminderung des Ausblicks mit geschlossenem System. Davon sehen 93,4% diese Verminderung als negativ an. Nicht ganz so extrem fällt die Bewertung aus, wenn man nach den anzukreuzenden Eigenschaften der Systeme fragt (Abbildung 5.3-6 rechts).

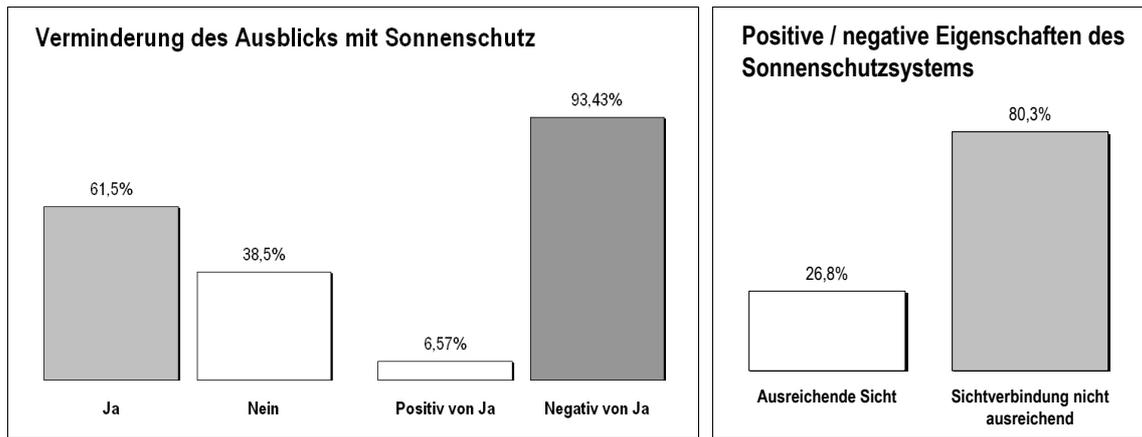


Abbildung 5.3-6: Beurteilung des Ausblicks der Gesamtbefragungen mit geschlossenem System

Hier geben noch 26,9% an, dass die Aussicht nach draußen ausreichend ist. Im weiteren Verlauf zeichnet sich deutlich ab, welche Systeme diesen höheren Anteil an positiver Beurteilung der Systemeigenschaften auslösen.

Lässt man die Probanden ähnliche Fragen auf einer Skala von 1-7 beantworten, so wird der Ausblick mit zwischen 75,2% und 82,9% als „eher gestört“, „eher nicht ausreichend“ und „eher beschränkt“ bewertet (Diese Zahlen fassen jeweils die drei Skalenpunkte der eher negativen Bewertung zusammen). Im Vergleich dazu wird das Tageslicht von nur etwas über der Hälfte der Probanden (54,3%) als „eher eingeschränkt“ bewertet (Abbildung 5.3-7 links). Deutlich wird bei dieser Art der Zusammenfassung, dass die Probanden zwischen der Quantität des Tageslichtes, welches durch das System beeinflusst wird, und der Quantität oder Qualität der Aussicht klar unterscheiden. Zuletzt wurde in dieser Kategorie abgefragt, ob Schwankungen des Wetters bei geschlossenem System noch wahrnehmbar sind oder nicht, und wenn ja, ob sich dies möglicherweise störend auswirkt. Abbildung 5.3-7 (rechts) zeigt hierzu die Zusammenfassung.

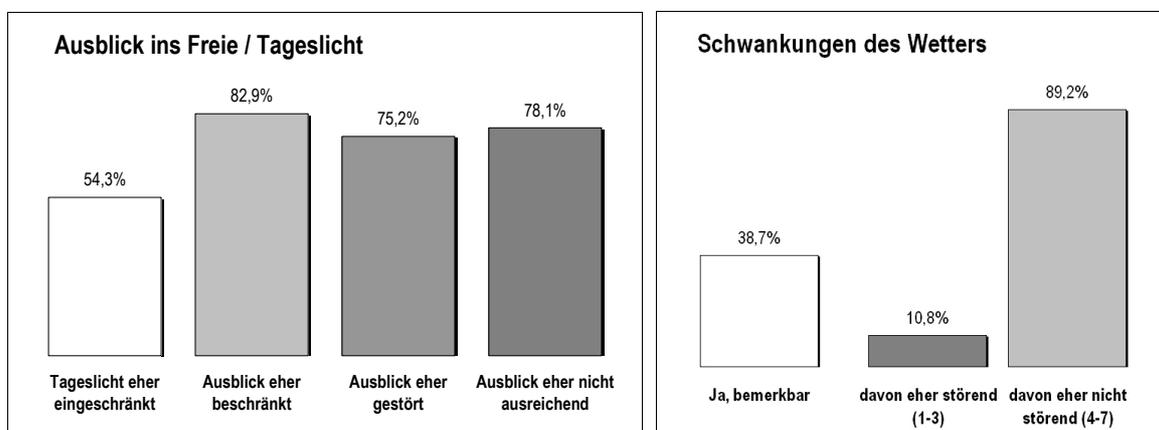


Abbildung 5.3-7: Links: Die Beurteilung des Ausblicks ins Freie dem eingeschränkten Tageslicht gegenübergestellt; rechts: Zusammenfassung der Aussagen zur Wahrnehmung von Schwankungen des Wetters und deren Bewertung

Die bemerkbaren Schwankungen des Wetters (38,7%) über alle Räume hinweg und alle Testperioden bei geschlossenen eingeschlossen werden überwiegend, nämlich in 89,2% der Fälle als „eher nicht störend“ bewertet.

5.3.4.3 Systemabhängigkeit (A I)

Innerhalb der Kategorie Aussicht sind alle hier gezeigten Fragen signifikant systemabhängig. Die einzige Ausnahme bildet die Wahrnehmung von Wetterschwankungen, die keine signifikanten Unterschiede erkennen lässt. Dies erstaunt umso mehr, als sich die Aussicht extrem unterschiedlich zeigt und entsprechend bewertet wird.

Die Frage nach der „Verminderung des Ausblicks“ durch den geschlossenen Sonnenschutz wird deutlich nach Art und Funktion des Systems unterschieden. Die beiden Sonnenschutzsysteme bieten einen Ausblick, wenn auch eingeschränkt, während die Jalousiesysteme in geschlossenem Zustand keinerlei Ausblick bieten. Abbildung 5.3-8 zeigt die Bewertung nach Funktionen zusammengefasst. Sehr einig sind sich die Probanden auch in der Bewertung des verminderten Ausblicks, sofern eine Einschränkung festgestellt wird, wird sie negativ bewertet.

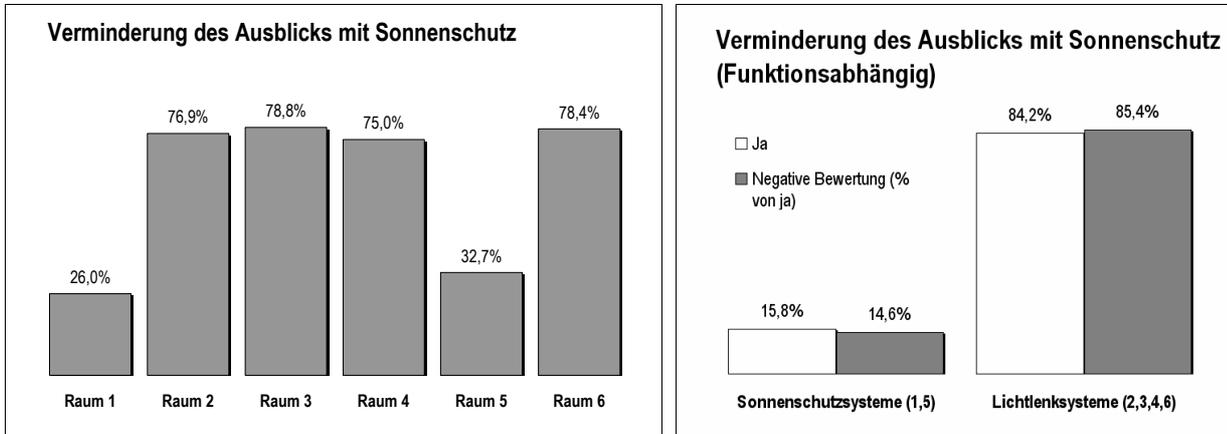


Abbildung 5.3-8: Zusammenfassung der Bewertung des Ausblicks getrennt nach Systemfunktionen

Ein ähnlich klares Bild zeigen die positiven oder negativen Eigenschaften der Systeme, die von den Probanden unabhängig voneinander angekreuzt werden konnten (deshalb über 100% pro Raum; Abbildung 5.3-9).

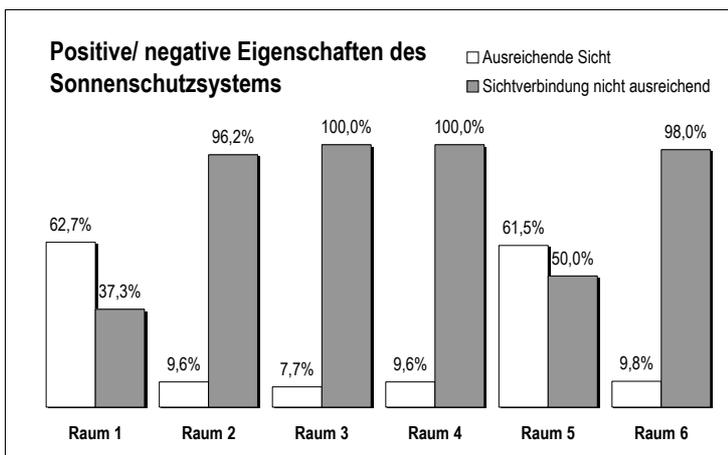


Abbildung 5.3-9: Die positiven und negativen Eigenschaften der Systeme gegenübergestellt

Die Sichtverbindung wird in den Räumen mit Jalousiesystemen bis zu 100% als nicht ausreichend beurteilt. System 2 schneidet unter den Lichtlenksystemen mit „nur“ 96,2% angekreuzten Antworten „Sichtverbindung nicht ausreichend“ etwas besser ab. Bei der positiv formulierten Frage nach „ausreichender Sichtverbindung“ schneiden die beiden reinen Sonnenschutzsysteme (Raum 1 und 5) mit 62,7% und 61,5% besser ab als alle anderen Systeme. Nicht jedoch so gut, wie man es aufgrund der negativen Frage und den entsprechenden Antworten erwarten würde. Die Qualität der Aussicht scheint hier eine deutliche Rolle zu spielen.

5.3.4.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Die Überprüfung der Konsistenz innerhalb dieser Kategorie zeigt, dass der Ausblick nicht gleich bewertet wird wie die Einschränkung des Tageslichtes im Raum. Die Einschränkung des Tageslichtes wiederum hat nichts zu tun mit der Tatsache, ob Schwankungen des Wetters bemerkbar sind. Die bemerkbaren Schwankungen des Wetters jedoch korrelieren durchaus mit der Aussicht und auch mit den positiven Eigenschaften, der ausreichenden Sicht.

5.3.5 Blendung

5.3.5.1 Ziel der Kategorie

In der Kategorie Blendung werden die Häufigkeiten und Ursachen für auftretende Blendung analysiert. Darunter fallen auch störende „Sonnenflecken“ oder Reflexe im Raum (Pattern) (Kapitel 1.3.4). Folgende Fragen wurden für die Bearbeitung dieser Rubrik integriert (Tabelle 5.3-4).

Tabelle 5.3-4: Fragen der Kategorie Blendung

Kategorie Blendung
Blendung durch helle Oberflächen? (Eher nie - Eher oft)
Wenn Blendung: Wände (Kein Kreuz - Kreuz)
Wenn Blendung: Sonnenschutz (Kein Kreuz - Kreuz)
Störende Spiegelungen? (Nein - Ja)
Störende Spiegelungen? (Eher selten - Eher oft)
Helle Flächen? (eher nicht wahrnehmbar - Eher unkomfortabel oder unakzeptabel)
Momentan geblendet? (Nein - Ja)
Neg. Eigenschaft d. Soschu: Blendung (Kein Kreuz - Kreuz)
Muster/Streifen? (Nein - Ja)
Muster/Streifen? (Eher nicht störend - Eher störend)

5.3.5.2 Einfache Auszählung (A I)

Die einfache Auszählung der Kategorie Blendung zeigt bei den positiven Bewertungen, dass Blendung im Falle der getesteten Sonnenschutz- und Lichtlenkvorrichtungen ein eher untergeordnetes Thema ist. Abbildung 5.3-10 (links) zeigt 67,7% an positiven Antworten zum Thema Systemeigenschaften (keine Blendung). Noch etwas mehr (fast 80%) empfanden zum Zeitpunkt der Befragungen keine direkte Blendung durch das System (in dieser Grafik nicht aufgeführt). Grundsätzlich sind helle Flächen im Raum eher „wahrnehmbar“, nicht aber „unkomfortabel“ oder gar „unakzeptabel“. Mögliche Muster oder Streifen, bei direkter Sonneneinstrahlung, sind in 54,2% der Fälle „nicht störend“, und 65,8% der Probanden empfinden keine störenden Spiegelungen in ihrem direkten Umfeld.

Die negativen Aussagen zur Kategorie Blendung geben eher Aufschluss über mögliche Störungen, deren Ursachen weiter erforscht werden sollen (Abbildung 5.3-10 rechts).

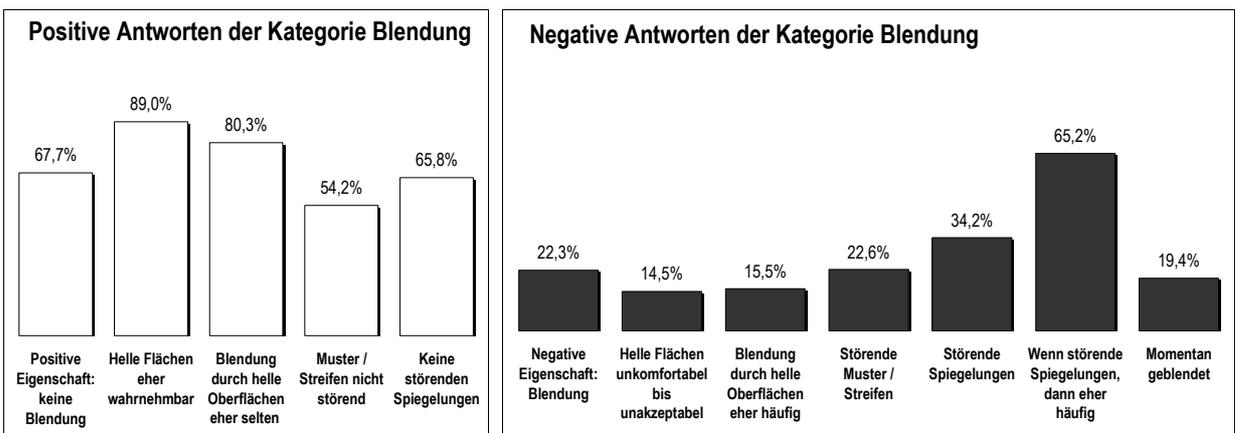


Abbildung 5.3-10: Links: Positive Aussagen der Kategorie Blendung in der Zusammenfassung; rechts: Negative Aussagen der Kategorie Blendung in der Zusammenfassung

Blendung als negative Eigenschaft eines Systems wurde in 22,3% der Fälle bei geschlossenem Sonnenschutz angekreuzt. Unkomfortable bis unakzeptable Flächen kamen in 14,5% aller Befragungen vor, ähnlich hoch liegt die Häufigkeit der Blendung durch helle Oberflächen. Störende Muster oder Streifen kommen zu 22,6% vor, störende

Spiegelungen werden in 34,2% der Fälle empfunden (diese zu 65,2% eher häufig). Während der Befragungen direkt geblendet fühlen sich 19,4%. Insgesamt wird zwischen „störenden Mustern oder Streifen“ und „störenden Spiegelungen“ deutlich unterschieden. Die Störung liegt je nach Art zwischen 14,5% und 34,2%; das ist ein Anteil an negativen Urteilen, der im weiteren Verlauf genauer untersucht wird. Die Ursachen möglicher Blendung wurden sowohl durch eine Vorauswahl auch durch zusätzliche freie und unabhängig voneinander einzutragenden Angaben erfasst. Sie sind in Abbildung 5.3-11 aufgeführt. Die Prozentangaben sind absolute Angaben.

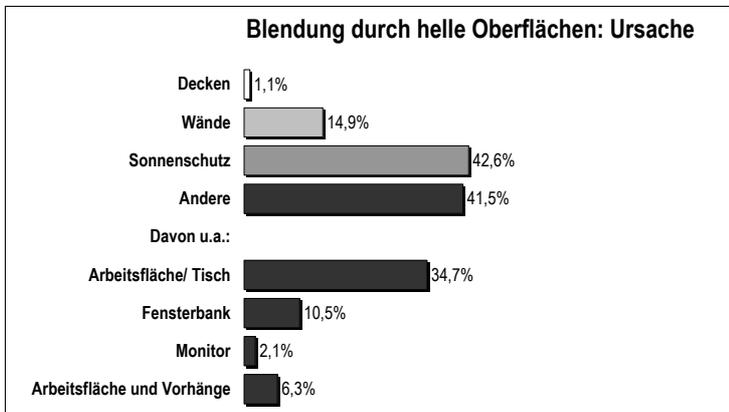


Abbildung 5.3-11: Ursachen für Blendung insgesamt und prozentual von „Andere“ (zusätzliche Angaben der Probanden)

So fühlt sich ein sehr geringer Anteil durch eine zu helle Decke geblendet. Dies ist aufgrund des Blickwinkels zu erwarten. Reflektierende Wände stören in 11% der Fälle. Die meisten jedoch, nämlich 42,6% fühlen sich durch den Sonnenschutz selbst geblendet oder aber die Probanden geben noch andere Blendquellen zusätzlich an (41,5%), so zum Beispiel die Arbeitsfläche zu einem relativ hohen Prozentsatz (34,7% von den zusätzlichen Angaben), die Fensterbank, ganz selten der Monitor selbst und zu einem geringen Prozentsatz auch die Arbeitsfläche und Vorhänge.

5.3.5.3 Systemabhängigkeit (A I)

Innerhalb der Kategorie Blendung zeigen sich ca. 50% der Fragen systemabhängig. So ist bei den Blendursachen der Sonnenschutz signifikant systemabhängig, ebenso die „Blendung durch helle Oberflächen“, „störende Spiegelungen“, nicht jedoch deren Häufigkeit, die hellen Flächen von nicht wahrnehmbar bis unakzeptabel, die Frage nach der momentanen Blendung während der Befragungen, positive und negative Eigenschaften und das Auftreten von Mustern und Streifen, nicht jedoch deren Grad an Störung.

Deutlich zeichnen sich die Raumunterschiede bei den direkten Fragen nach der Blendung zum Zeitpunkt der Befragungen bzw. der Beurteilung der Systemeigenschaften (positiv und negativ) ab (Abbildung 5.3-12).

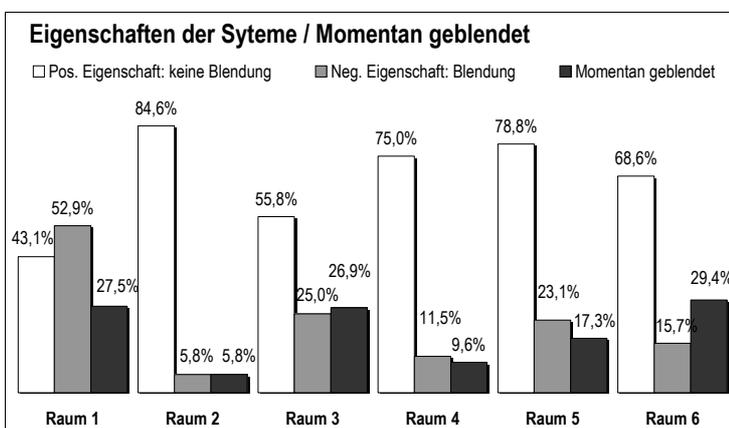


Abbildung 5.3-12: Positive/negative Eigenschaften im Vergleich zur momentanen Blendung (Auswertung raumbezogen)

Raum 2 wird am häufigsten positiv (keine Blendung) bewertet, die Räume 4, 5 und 6 liegen zwischen etwa 68% und 79% (nach Räumen getrennt ausgewertet) während Raum 1 die häufigsten Negativurteile bekommen hat. Bei den Negativurteilen ist die Anzahl der Bewertungen insgesamt geringer, sie entspricht in ihren Ausschlägen den positiven Bewertungen. Dies deutet darauf hin, dass die Probanden zum Thema Blendung fast immer eine Aussage treffen, im Gegensatz zu manch anderen Themenblöcken.

Bei der direkten Frage nach Blendung während der Befragungen werden Raum 1, 3 und 6 mit jeweils zwischen 25% und 30% am schlechtesten bewertet. Dies deckt sich (bis auf leichte Abweichungen in Raum 5) mit der Häufigkeit der Blendung durch helle Oberflächen. Insgesamt wird die direkte Blendung kritischer bewertet als die Eigenschaften der Systeme insgesamt.

Ursachen der Blendung werden in Raum 1 und 3 am häufigsten genannt (Abbildung 5.3-13). Der Sonnenschutz als Blendquelle wird am häufigsten genannt in Raum 1, 3 und 4, am wenigsten in Raum 5. Eine weitere häufig genannte Blendquelle stellt die Arbeitsfläche dar. Die Ursache für Blendung durch die Arbeitsflächen dürften weitgehend in Reflexen zu finden sein, die entweder durch zu wenig abgemilderte Direktstrahlung (Raum 1 und 5) oder aber durch sehr starke Reflexion von der Decke auf die Arbeitsebene (Raum 2) entstehen.

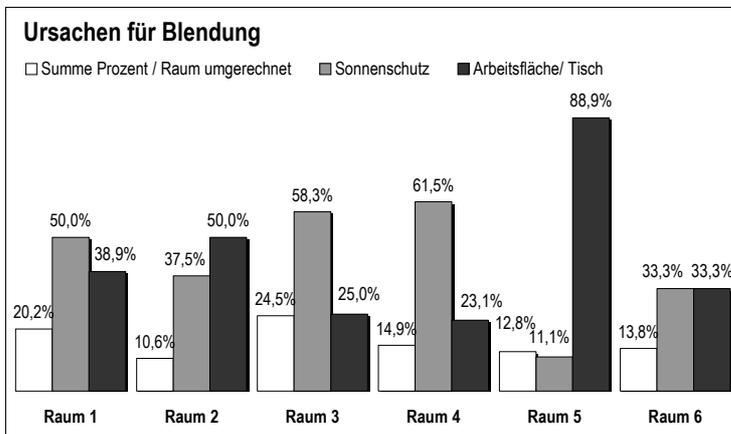


Abbildung 5.3-13: Ursachen der Blendung nach Räumen aufgeschlüsselt

Die Fragen nach störenden Mustern oder Streifen sowie Spiegelungen wird in Abbildung 5.3-14 (links) zusammengefasst. Muster oder Streifen entstehen durch direkte Sonneneinstrahlung, wovon insgesamt etwa 30% als störend empfunden werden. Grundsätzlich werden sie, je mehr Muster oder Streifen auftreten, umso störender empfunden. So werden System 1, 3 und 6 bei dieser Frage mit zwischen 43% und 52% störender Spiegelungen am schlechtesten bewertet. Abbildung 5.3-14 (rechts) zeigt die Bewertung von hellen Flächen zusammengefasst nach den nicht akzeptablen bzw. unkomfortablen Flächen.

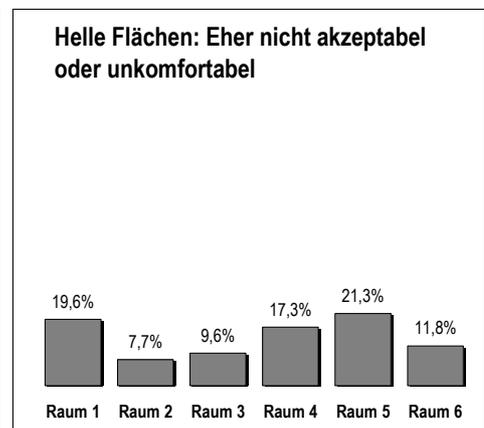
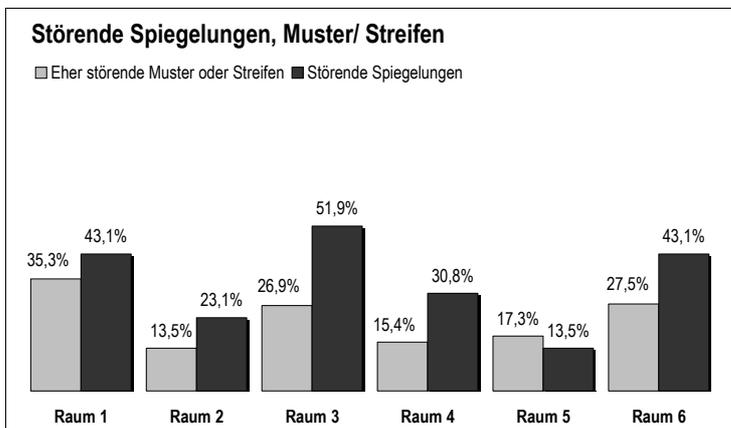


Abbildung 5.3-14: Links: Störungen durch Spiegelungen, Muster/ Streifen; rechts: Beurteilung der Raumbooberflächen

Raum 1, 4 und 5 weisen hier die höchsten Prozentsätze pro Raum auf, das heißt, hier werden die hellen Flächen eher als störend, unkomfortabel oder unakzeptabel bewertet.

5.3.5.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Die Konsistenz der Antworten auf inhaltlich gleiche Fragen wurde auch in diesem Kapitel überprüft. Es gibt keine Korrelation der „Blendung durch helle Oberflächen“ mit dem Auftreten von Mustern oder Streifen, wohl aber mit deren Störung, das heißt, hier werden deutliche Unterschiede von den Probanden gemacht. Die Blendung durch den Sonnenschutz korreliert mit der Blendung durch helle Oberflächen bzw. deren Häufigkeit, mit der Blendung durch Decken sowie den anderen Blendquellen, mit den positiven und negativen Eigenschaften der Systeme sowie dem Auftreten von Mustern und Streifen. „Momentan geblendet“ korreliert mit den „Mustern / Streifen“ und deren Störung sowie auch mit möglicherweise auftretenden „störenden Spiegelungen“. Helle raumbegrenzende Oberflächen spielen also für den Grad an Blendung eher eine untergeordnete Rolle.

5.3.6 Funktion

5.3.6.1 Ziel der Kategorie

Die Kategorie Funktion beinhaltet sowohl die Beurteilung der Systemfunktionen als der Ästhetik und der Rolle als Statussymbol. Ziel dieser Kategorie ist, mögliche Fehlfunktionen herauszufiltern und die Akzeptanz der Nutzer zu überprüfen. Die Fragen werden in Tabelle 5.3-5 zusammengefasst.

Tabelle 5.3-5: Fragen der Kategorie Funktion

Kategorie Funktion
Sonnenschutz momentan gut? (Eher gut - Eher schlecht)
Weiterer Schutz notwendig? (Nein - Ja)
System starr oder flexibel? (Flexibel - Starr)
Wenn starr, dann nicht störend - störend
Eingriffsmöglichkeit ist nicht wichtig - wichtig

5.3.6.2 Einfache Auszählung (A I)

Die einfache Auszählung zeigt, dass fast 90% der Probanden die Sonnenschutzfunktion als „eher gut“ beurteilen. Dagegen stehen immerhin 21%, die einen zusätzlichen Schutz für notwendig halten (Abbildung 5.3-15 links). Die Ästhetik der Systeme beurteilen insgesamt 69% mit „eher gut“, als Statussymbol können sich insgesamt 29% der Probanden die untersuchten Systeme vorstellen (Abbildung 5.3-15 rechts).

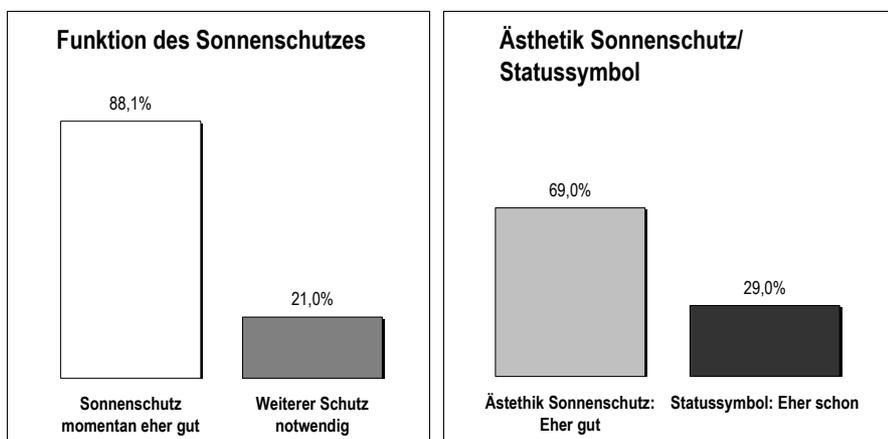


Abbildung 5.3-15: Links: Beurteilung der Funktion; rechts: Beurteilung der Ästhetik und der Funktion als Statussymbol

Hinsichtlich Flexibilität und Eingriffsmöglichkeiten sagen 27,4% der Probanden, dass die Systeme starr seien, dies wird aber nur in 45,9% der Fälle für störend gehalten (Abbildung 5.3-16).

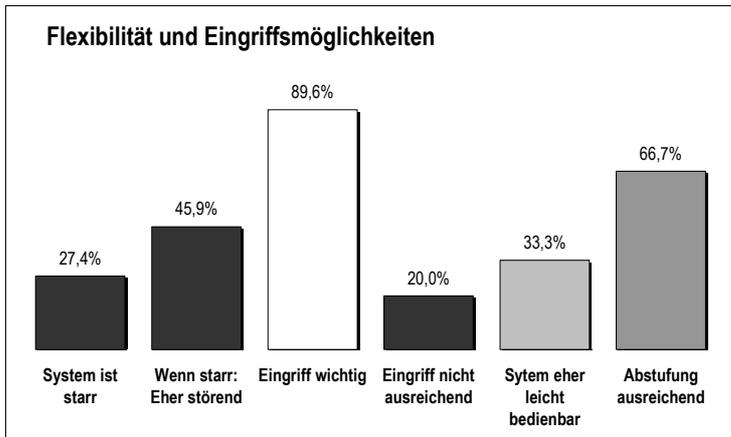


Abbildung 5.3-16: Beurteilung der Flexibilität und Eingriffsmöglichkeiten aller Systeme

Eingriffsmöglichkeiten seien wichtig sagen fast 90% aller Befragten, aber nur 20% antworten, dass die Eingriffsmöglichkeiten in den Fällen der getesteten Systeme nicht ausreichend waren. Die Bedienbarkeit war bei 33,3% „eher gut“ (Skalenspunkte 1-3 zusammengefasst) und die Abstufung bei manuell bedienbaren Systemen wurde mit 66,7% als „ausreichend“ beurteilt.

Eine zusätzliche freie Texteingabe war in dieser Kategorie für die Funktion des Sonnenschutzes, der möglichen Notwendigkeit zusätzlichen Schutzes und der positiven und negativen Eigenschaften der Systeme möglich. Diese wurden unabhängig voneinander angegeben und ausgewertet. Bei der Beurteilung der Funktion wurden insgesamt über 900 Aussagen gemacht. Bezogen auf 336 Fragebögen zeigt dies mit fast 300% an Antworten eine deutliche Resonanz auf die Möglichkeiten, zusätzliche Kommentare abzugeben. Abbildung 5.3-17 (links) zeigt die wichtigsten Antworten in einer thematischen Zusammenfassung. Im Falle der Beurteilung der Schutzfunktion wurden nur 11,1% zusätzliche Angaben über die freie Texteingabe gemacht (bezogen auf die Anzahl der Fragebögen). Davon betrifft fast die Hälfte einen nicht ausreichenden Blendschutz, am zweithäufigsten wird die zu hohe direkte Einstrahlung genannt (das macht jedoch nur 2,6% der Gesamtbefragungen aus) (Abbildung 5.3-17 rechts).

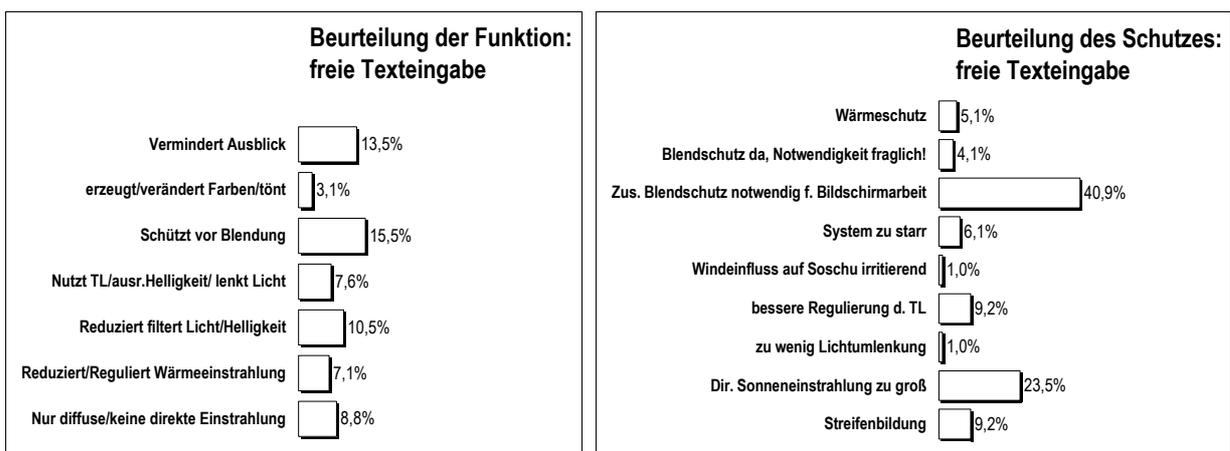


Abbildung 5.3-17: Links: Beurteilung der Funktion insgesamt; rechts: Beurteilung der Schutzfunktion

Die positiven und negativen Eigenschaften wurden, über die Möglichkeiten des Ankreuzens verschiedener Eigenschaften hinausgehend in 29 (Positiv) bzw. 43 (Negativ) Fällen angegeben (Abbildung 5.3-18). Die meisten positiven Urteile gab es zum Thema Ästhetik mit 27,6% der zusätzlichen Angaben über „gutes Design“. Bei den negativen Zusatzkommentaren wurden am häufigsten, nämlich in 27,9% der Fälle, störende Reflexionen bzw. Farbigkeit

beschrieben. Dieser Kommentar auf der positiven Seite wurde durch „schöne Lichtspiele“ mit 17,2% der Angaben beurteilt. Es bleibt zwischen angenehmen und unangenehmen Farberscheinungen zu unterscheiden.

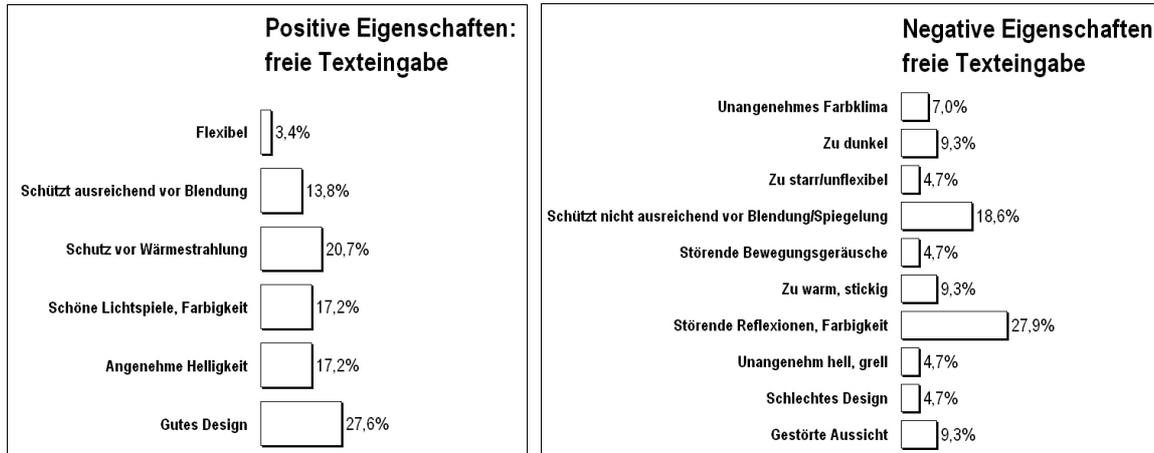


Abbildung 5.3-18: Zusammenfassung der freien Positiv- und Negativurteile der Probanden über die Systeme

Insgesamt haben die zusätzlich möglichen freien Texteingaben Hinweise auf mögliche Störungen gegeben, die es bei der Systemanalyse weiter zu betrachten gilt.

Zum Ende einer jeden Befragungsrunde hatten die Probanden die Gelegenheit, ihren Sonnen- und Blendschutz nach ihren Wünschen zu verändern. Während der Befragungen waren die Systeme aus Vergleichsgründen vor-eingestellt und durften nicht verändert werden. 46% ließen den Sonnenschutz unverändert (Abbildung 5.3-19 links), das heißt im vor-eingestellten aktiven Zustand, dagegen wurde der Blendschutz mit nur 20% unveränderten Einstellungen weitaus häufiger benutzt, um das persönliche Lichtklima zu verändern (Abbildung 5.3-19 rechts).

Innerhalb der durch die Probanden vorgenommenen Veränderungen am Sonnenschutz wurden am häufigsten Lamellen waagrecht gestellt oder der Sonnenschutz halb geöffnet (nach oben gefahren). 5% insgesamt haben den Sonnenschutz ganz geöffnet und ebenfalls 5% diesen ganz geschlossen.

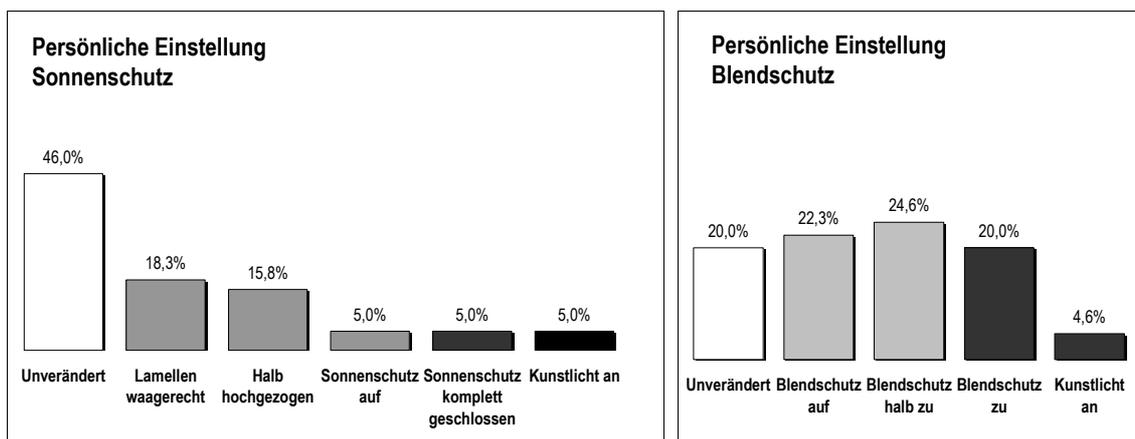


Abbildung 5.3-19: Persönliche Einstellungen des Sonnenschutzes (links) und des Blendschutzes (rechts)

Die letzten 5% haben zusätzlich Kunstlicht angeschaltet. Bei den Einstellungsmöglichkeiten für den Blendschutz wurde dieser am häufigsten halb geschlossen (von unten nach oben gefahren), dieser zu 22,3% ganz geöffnet und zu 20% geschlossen, 4,6% gaben an, Kunstlicht einschalten zu wollen. Genauerem Aufschluss über die Verknüpfungen der Nutzung von Sonnen- und Blendschutz gibt das folgende Kapitel.

5.3.6.3 Systemabhängigkeit (A I)

Die Funktion des Sonnenschutzes nach Raum betrachtet wird bei fast allen Systeme mit über 80% als „eher gut“ (Abbildung 5.3-20) bewertet.

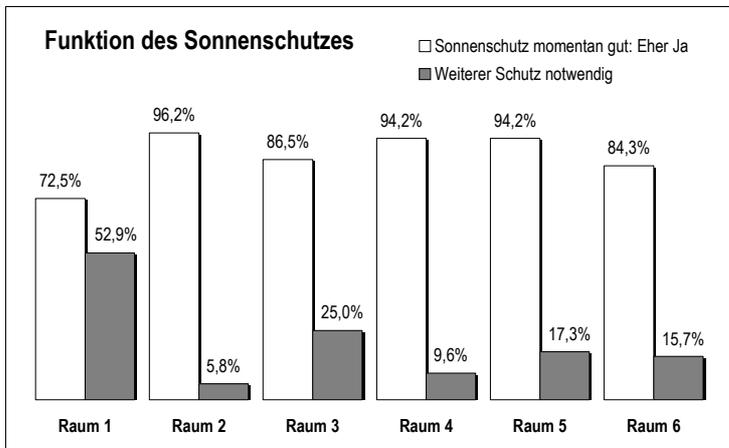


Abbildung 5.3-20: Beurteilung der Schutzfunktionen der Systeme nach Räumen getrennt

System 1 schneidet mit nur 72,5% hier deutlich schlechter ab als die anderen Systeme, am besten mit weit über 90% schneiden die Systeme in Raum 2, 4 und 5 ab. Einen zusätzlichen Schutz wünschen sich 52,9% in Raum 1, trotz schon vorhandenem Blendschutz, dagegen steht ein Bedarf von nur 5,8% nach zusätzlichem Schutz in Raum 2, obwohl dort die Raumtemperatur kritisch gesehen wurde (Kapitel 5.3.3.3).

Die Ästhetik des Sonnenschutzes wird insgesamt eher hoch bewertet (Abbildung 5.3-21).

System 5 steht dabei mit 80,8% Urteilen „eher gut“ ganz vorne, dagegen hat System 1 die meisten Noten „sehr gut“ erhalten (schwarze Umrandung). Am schlechtesten schneidet System 6 ab. Eine Funktion als Statussymbol könnten die konzentrierenden Hologramme mit Fotovoltaik in Raum 1 zu 68,6% und das elektrochrome Glas in Raum 5 zu 38,5% übernehmen. Am schlechtesten schneidet hier das System 4 ab (Lichtlenklamellen in Kombination mit Weißlichthologrammen).

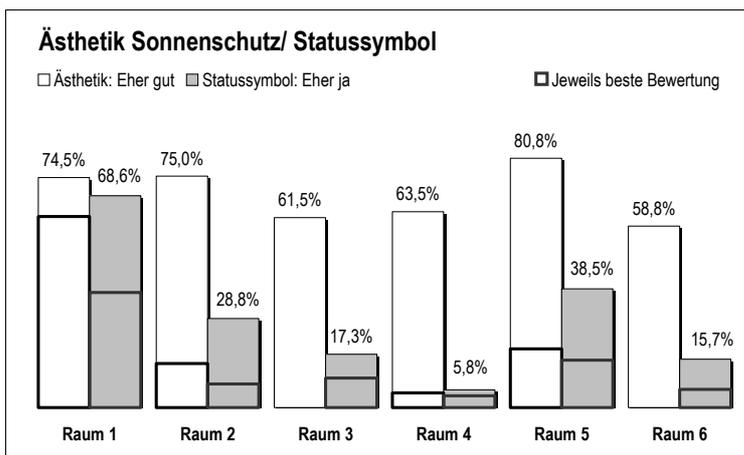


Abbildung 5.3-21: Beurteilung der Ästhetik sowie der Funktion als Statussymbol mit Eintragung der jeweils besten Bewertung (bezogen auf Urteile in den Räumen)

Bei der Beurteilung der Flexibilität und der Eingriffsmöglichkeiten (jeweils unabhängig voneinander beurteilt) halten 58,8% der Befragten in Raum 1 und 42,3% in Raum 5 das System für starr (Abbildung 5.3-22). Die Störung durch ein starres System beträgt nur 10,5% in Raum 1, bei allen anderen Systemen noch weniger. Keine Störung durch einen sehr geringen Anteil an Antworten „starr“ tritt bei System 2 auf. Die Eingriffsmöglichkeiten werden ebenfalls

bei System 1 und 5 am ehesten als “nicht ausreichend“ beschrieben, auf einem Niveau von 50% bzw. 33,3%. Alle anderen Systeme weisen zu 100% ausreichende Eingriffsmöglichkeiten auf, was den Funktionsweisen entspricht.

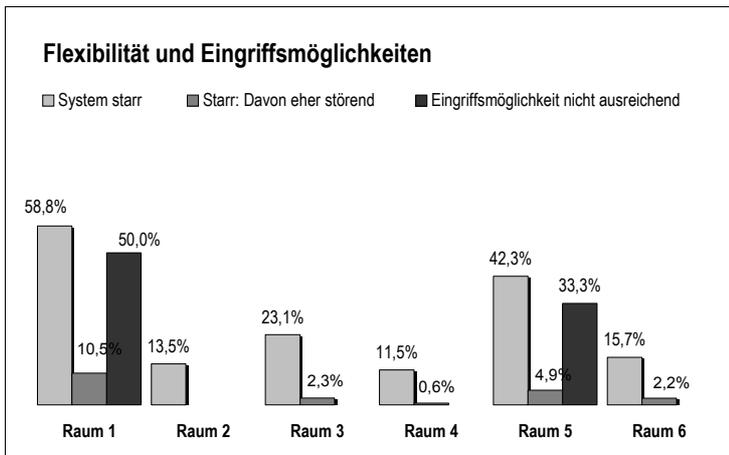


Abbildung 5.3-22: Beurteilung der Eingriffsmöglichkeiten und Flexibilität der Systeme nach Räumen getrennt

Das System als eher leicht bedienbar empfinden 100% in Raum 1 und Raum 2, zur Bedienbarkeit neutral verhalten sich die Probanden in Raum 5, zu den restlichen Systemen gab es keine Aussagen. Ebenso verhält es sich bei der Abstufung der manuell bedienbaren Systeme, auch hier gab es keine Aussagen in Raum 3, 4 und 6.

Bei den persönlichen Einstellungen des Sonnenschutzes wurden 46% unverändert gelassen. Dies ist auf die Starrheit der Systeme 1 und 5 zurückzuführen. System 5 konnte zwar verändert werden, indem das elektrochrome Glas heller gestellt wurde, da dies jedoch einige Zeit in Anspruch nahm, ist dieser Raum in der Grafik nach Räumen getrennt nicht aufgeführt. Abbildung 5.3-23 zeigt die Systeme in Raum 2, 3, 4 und 6 mit den persönlichen Veränderungen pro Raum in der Zusammenfassung.

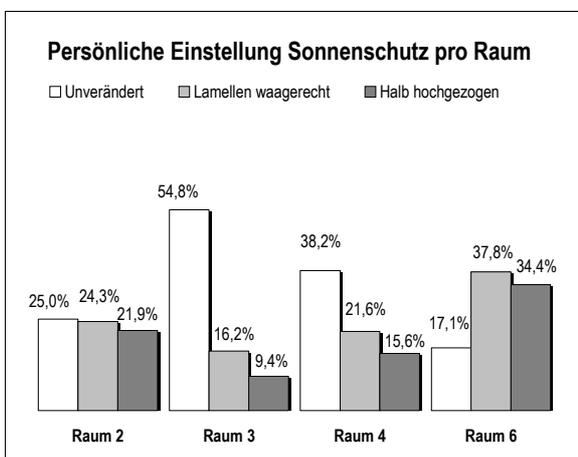


Abbildung 5.3-23: Persönliche Einstellungen des Sonnenschutzes nach Räumen getrennt

Die Probanden ließen den Sonnenschutz in Raum 2 am häufigsten unverändert (54,8% auf Einzelräume bezogen). Am häufigsten hochgefahren, halb hochgefahren oder die Lamellen waagrecht gestellt wurde das System in Raum 6.

Die Möglichkeit, den Blendschutz zu verändern, wurde mit 80% aller Fälle deutlich häufiger wahrgenommen als die Veränderung des Sonnenschutzes. Dabei wurde der Blendschutz in den Räumen, in denen er in der Grundeinstellung nicht genutzt wurde (Raum 2, 3, 4 und 6), relativ häufig eingesetzt, in bis über 60% der Fälle in Raum 4 (Abbildung 5.3-24 links). Den Blendschutz geöffnet im Gegensatz zur Grundeinstellung haben 20% in Raum 1 und

fast 40% in Raum 5 (Abbildung 5.3-24 rechts). Die geringste Anzahl an Veränderungen des Blendschutzes gab es in Raum 1 mit 40%.

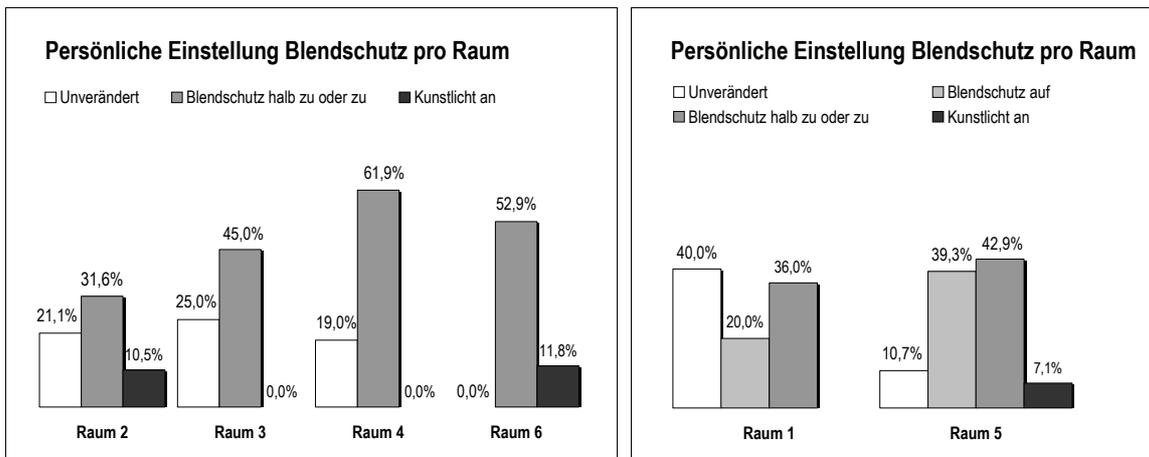


Abbildung 5.3-24: Links: Persönliche Einstellungen des Blendschutzes nach Räumen mit Jalousiesystemen (i.d.R. ohne Blendschutz getestet); rechts: In Räumen mit reinen Sonnenschutzsystemen (grundsätzlich mit Blendschutz getestet)

Insgesamt wurde ein großer Prozentsatz der Sonnenschutzvorrichtungen bei der freien Einstellung ganz oder teilweise geöffnet. Dies ist im Zusammenhang mit dem Energieverbrauch durch Kühlung bzw. bei der Berechnung von Kühllasten interessant, da die Sonnenschutzfunktion bei teilweiser Öffnung deutlich gemindert wird.

Die Gegenüberstellung der Nutzung in den Räumen mit beweglichem Sonnenschutz zeigt, dass ein geöffneter oder halb geöffneter Sonnenschutz meist mit einem halb oder ganz geschlossenen Blendschutz korreliert (Abbildung 5.3-25). Bei der Nutzung des Blendschutzes fällt auf, dass er häufiger genutzt wird als der Sonnenschutz, um die Lichtsituation am Arbeitsplatz zu verändern, meist wird er halb geschlossen oder geschlossen. Dies kann ein Hinweis auf verminderte Aussicht durch geschlossenen Sonnenschutz bei gleichzeitiger Schutzbedürftigkeit gegen Solareinstrahlung sein und wird im weiteren Verlauf der Auswertung im Bezug zu den gemessenen Werten untersucht.

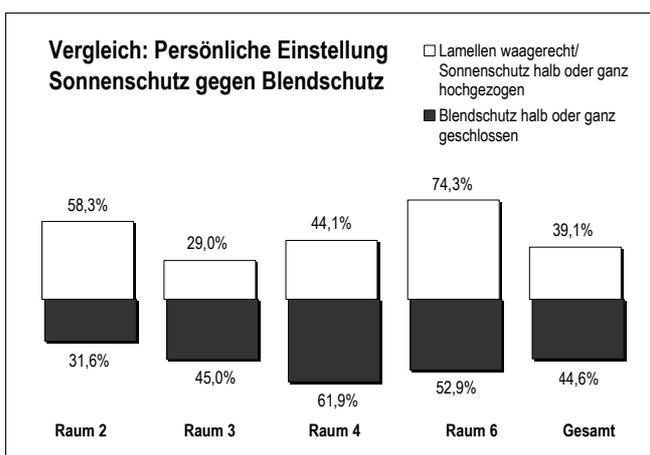


Abbildung 5.3-25: Gegenüberstellung der Nutzung des Sonnen- und Blendschutzes zur Veränderung des Lichtklimas

In den Räumen 1 und 5 wurde diese Gegenüberstellung aufgrund der fehlenden individuellen Einstellmöglichkeiten auf die Systeme nicht durchgeführt.

5.3.6.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Die Beurteilung der Funktion des Sonnenschutzes ist unabhängig von der vorhandenen Eingriffsmöglichkeit, sie entspricht jedoch dem Wunsch nach weiterem Schutz, und ist abhängig von der Flexibilität eines Systems und der

möglicherweise resultierenden Störung durch ein starres System. Die Ästhetik korreliert mit den Angaben darüber, ob ein System als Statussymbol gelten kann. Die Flexibilität korreliert mit der dadurch auftretenden Störung, das heißt, bei einem starren System wird dies entsprechend als störend empfunden. Sie korreliert auch mit der Eingriffsmöglichkeit. Für den Fall der persönlichen Einstellungen wurde keine Konsistenzprüfung durchgeführt.

5.3.7 Raumhelligkeit

5.3.7.1 Ziel der Kategorie

Die subjektive Beurteilung der Helligkeit im Raum hat auf der einen Seite mit der Lichtverteilung und dem Beleuchtungsniveau, also den Beleuchtungsstärken, im Raum zu tun, auf der anderen Seite ist für produktives Arbeiten ausreichendes Licht am Arbeitsplatz notwendig. Die Kategorie Helligkeit prüft die Beurteilung von Quantität und Qualität des Tageslichtes in den Räumen. Eine Zusammenfassung der Fragen zeigt Tabelle 5.3-6.

Tabelle 5.3-6: Fragen der Kategorie Helligkeit

Kategorie Helligkeit
Zuschalten von Kunstlicht gewünscht? (Nein - Ja)
Wirkung des Tageslichtes? (Eher dunkel - Eher hell)
Urteil Gesamtraum: Dunkel (Kein Kreuz - Kreuz)
Urteil Gesamtraum: Hell (Kein Kreuz - Kreuz)
Urteil Gesamtraum: Grell (Kein Kreuz - Kreuz)
Tageslicht ausreichend am Arbeitsplatz? (Eher nicht - Eher schon)
Positive Eigenschaft des Systems: Ausreichende Helligkeit (Kein Kreuz - Kreuz)
Verminderung des Tageslichtes durch das System? (Eher nicht - Eher schon)
Verminderung des Tageslichtes eher nicht störend - eher störend?

5.3.7.2 Einfache Auszählung (A.I)

Die Bewertung der Helligkeit im Raum wurde sowohl durch „ja/ nein“ Fragen als auch durch Skalenfragen auf unterschiedliche Arten abgefragt. Zusammenfassend zeigt Abbildung 5.3-26 alle positiv, also „eher hell“ beantworteten Anteile (eher hell, Tageslicht ausreichend, kein Kunstlicht gewünscht etc.).

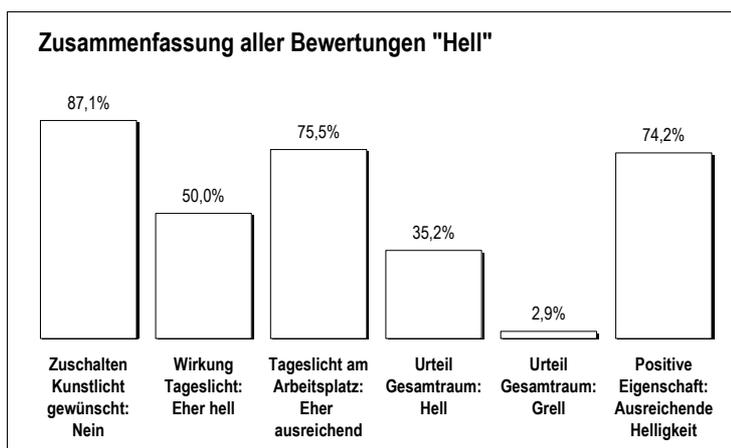


Abbildung 5.3-26: Zusammenfassung aller Bewertungen „hell“ innerhalb der Kategorie

Es gibt Unterschiede zwischen der Wahrnehmung der Raumhelligkeit insgesamt und der Beurteilung der Quantität des Tageslichtes selbst. So beschreiben 50% die Wirkung des Tageslichtes als „eher hell“, während der Gesamt- raum in nur 35,2% der Fälle als hell bezeichnet wird. Dagegen steht die notwendige Helligkeit, die mit 75,5% bzw. 74,2% als „ausreichend“ empfunden wird. Ein noch einmal um über 10 Prozentpunkte höheres Ergebnis liefert die

Frage „Zuschalten des Kunstlichtes erwünscht“. „Grell“ wurde in 7,4% der Fälle angekreuzt. Da diese Frage eher eine Störung repräsentiert, wird in diesem Zusammenhang auf Kapitel 5.3.5 (Blendung) verwiesen. Entsprechend der Zusammenfassung für alle positiven Antworten zeigt Abbildung 5.3-27 dies für alle negativen Antworten, also „eher dunkel“, „nicht ausreichendes Tageslicht“, „Verminderung vorhanden“.

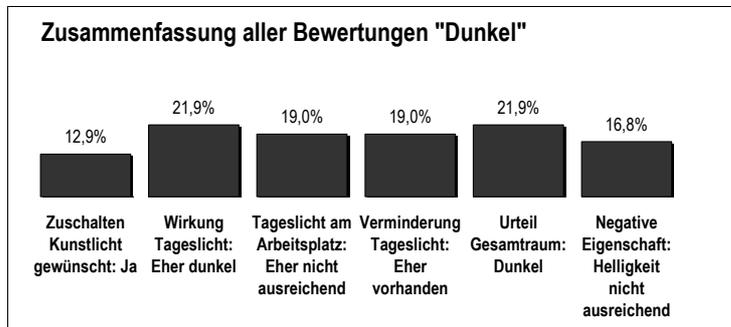


Abbildung 5.3-27: Links: Zusammenfassung aller Bewertungen „dunkel“ innerhalb der Kategorie

Die entgegengesetzte Zusammenfassung der Fragen in der Kategorie Helligkeit zeigt eine deutlichere Konsistenz bei der Bewertung der „Dunkelheit“ eines Raumes. Im Falle des Urteils „dunkel“ wirken sich im Gegensatz zu „hell“ die unterschiedlichen Skalen und Fragearten kaum aus. Das Zuschalten des Kunstlichtes wird hier mit 12,9% aller Antworten mit dem geringsten Prozentsatz bewertet. In 19% der Fälle wird eine Verminderung des Tageslichtes durch das Sonnenschutz- oder Lichtlenksystem empfunden. Störend ist diese Verminderung des Tageslichtes jedoch nur für 24,8% Prozent (nicht in der Grafik enthalten), während 69,6% dies als „nicht störend“ empfinden.

5.3.7.3 Systemabhängigkeit (A I)

Innerhalb der Kategorie Helligkeit sind alle Fragen bei Überprüfung durch den Chi² Test (Kapitel 4.4.2), bis auf das „Zuschalten des Kunstlichtes gewünscht“ signifikant systemabhängig. Raum 5 und 6 schneiden bei dem Wunsch nach Kunstlicht mit 21,2% und 19,6% „ja, Kunstlicht gewünscht“, weniger gut ab, während in Raum 2 mit 5,8% „ja“ nur selten zusätzliches Kunstlicht gewünscht wird (Die Frage wurde durch den statistischen Test als nicht signifikant errechnet, der Wert lag hier jedoch nur unwesentlich über der üblicherweise geltenden Grenze von 5%).

Wie bei der einfachen Auszählung über alle Räume hinweg werden auch hier die positiven Bewertungen der einzelnen Fragen zunächst zusammengefasst. Der Wunsch nach zusätzlichem Kunstlicht sowie die notwendige oder ausreichende Helligkeit und der subjektive Eindruck der Raumhelligkeit werden in Abbildung 5.3-28 dargestellt.

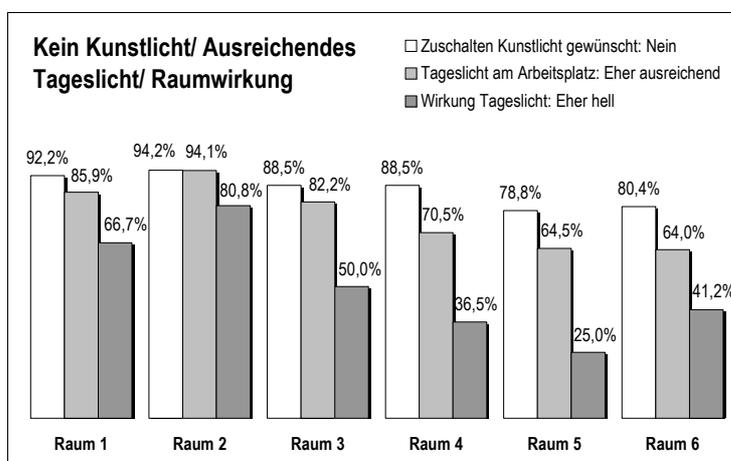


Abbildung 5.3-28: Zusammenfassung der positiven Urteile nach Räumen getrennt

Deutlich wird, dass die Schwelle das Kunstlicht tatsächlich einschalten zu wollen, fast immer höher liegt, als die Aussage über die ausreichende Helligkeit. Die einzige Ausnahme bildet Raum 2, der jedoch mit weit über 90% positiver Antworten beider Fragen fast immer eine „ausreichende“ Helligkeit erreicht. Bei der Raumwirkung liegt ebenfalls Raum 2 mit 80,8% der Bezeichnung „eher hell“ vorne, gefolgt von Raum 1 mit 66,7%. Die entgegengesetzten negativen Beurteilungen entsprechen den positiven Urteilen (Abbildung 5.3-29).

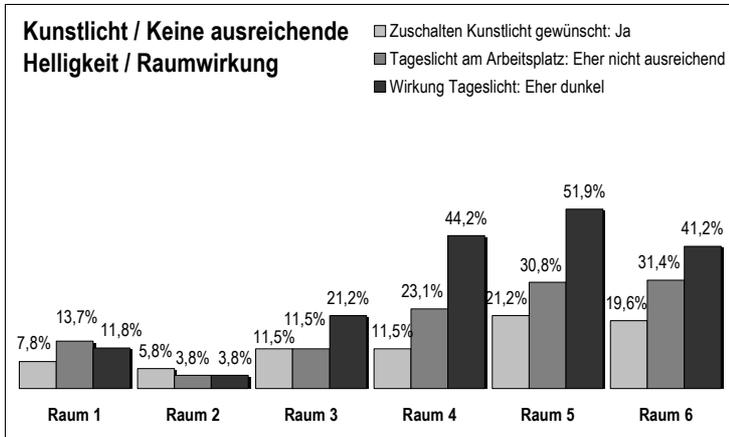


Abbildung 5.3-29: Zusammenfassung der negativen Urteile nach Räumen getrennt

Deutlich wird auch hier der Unterschied der Notwendigkeit des Kunstlichteinsatzes und der Beurteilung der Raumwirkung. Die Beurteilung des „nicht ausreichenden Tageslichtes am Arbeitsplatz“ hingegen liegt bei diesem Vergleich meist im mittleren Bereich. Einzige Ausnahme bildet Raum 1, der einen sehr geringen Anteil an „Kunstlicht zuschalten gewünscht“ aufweist, aber im Vergleich einen größeren Prozentsatz an „nicht ausreichendem Tageslicht“; die „Dunkelheit“ liegt bei diesem Raum im mittleren Bereich.

Betrachtet man die „Verminderung des Tageslichtes“ und die dadurch möglicherweise auftretende Störung (Abbildung 5.3-30), wird grundsätzlich ist dort, wo es weniger Tageslicht gibt, die Empfindung einer Störung durch die Verminderung größer. Die Systemabhängigkeit ist hier entsprechend deutlich zu erkennen.

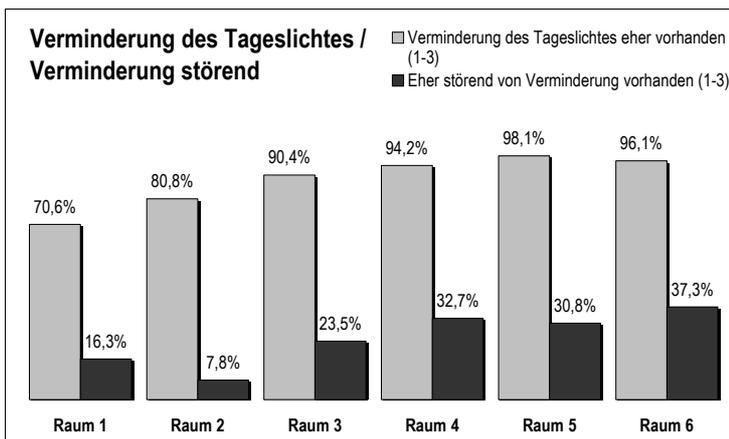


Abbildung 5.3-30: Negative Urteile für die Fragen nach der Verminderung des Tageslichtes durch das System je Raum

Raum 3, 4 und 5 weisen hier in jeweils über 30% der Fälle eine Störung auf, während in Raum 2 aufgrund des hohen Tageslichtangebotes nur von 7,8% der Probanden eine Störung empfunden wird.

5.3.7.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Das Bedürfnis, Kunstlicht zuzuschalten stimmt nicht überein mit der Verminderung des Tageslichtes durch das System. Dies wurde in der einfachen Auswertung bereits deutlich gemacht. Es ist konsistent mit allen anderen

Fragen zur Raumhelligkeit, mit Ausnahme der Beurteilung „grell“, die eher auf eine Störung oder Blendung aufmerksam macht (Kapitel 5.3.5). Die Aussage, ob das Tageslicht am Arbeitsplatz als ausreichend beurteilt, wird stimmt nicht überein mit der Verminderung des Tageslichtes durch den Sonnenschutz, das heißt, dass klar zwischen der Einschränkung durch das System und der notwendigen Helligkeit im Raum unterschieden wird.

5.3.8 Lichtlenkung

5.3.8.1 Ziel der Kategorie

Die Auswertung der Literatur (Kapitel 2.2) zeigte keine Beurteilung einer lichtlenkenden Fassade. Ziel der Kategorie ist es deshalb, die Bewertung einer Lichtlenkung, so vorhanden, abzufragen. Außerdem wird untersucht, in welchen Fällen sie entsprechend beurteilt wird. Zusammenfassend sind die Fragen in Tabelle 5.3-7 genannt.

Tabelle 5.3-7: Fragen der Kategorie Lichtlenkung

Kategorie Lichtlenkung
Lichtlenkung feststellbar? (Nein - Ja)
Lichtlenkung positiv - negativ?

5.3.8.2 Einfache Auszählung (A I)

Die einfache Auswertung der Kategorie Lichtlenkung zeigt, dass die Probanden in 49% der Fälle eine Lichtlenkung feststellen konnten, 6,1% waren unentschieden (Abbildung 5.3-31 links).

Von der wahrnehmbaren Lichtlenkung werden 87,1% als positiv angesehen und nur 4,5% als negativ, 8,4% konnten sich zu keiner positiven oder negativen Aussage durchringen (Abbildung 5.3-31 rechts).

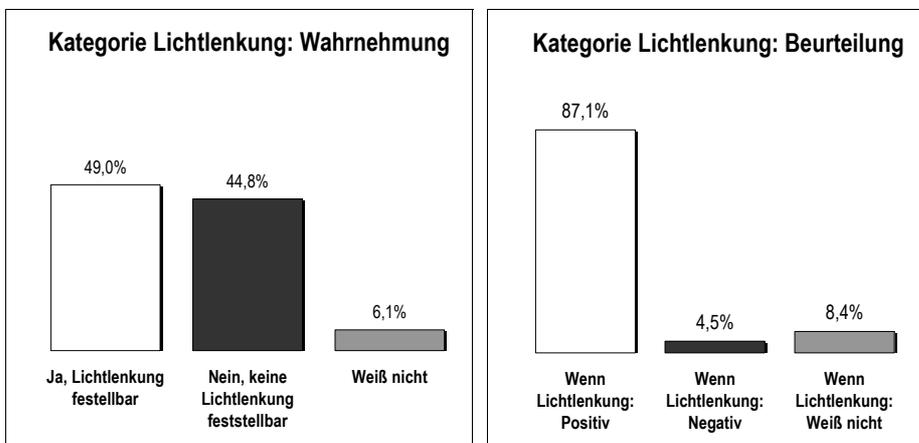


Abbildung 5.3-31: Zusammenfassung der Kategorie Lichtlenkung; links: Wahrnehmung der Lichtlenkung; rechts: Beurteilung der vorhandenen Lichtlenkung

Insgesamt zeichnet sich eine Lichtlenkung durch Tageslichtsysteme positiv aus.

5.3.8.3 Systemabhängigkeit (A I)

Bei der systemabhängigen Bewertung ist die Beurteilung nach Räumen bzw. Systemen sehr klar. Die Lichtlenkung wird eindeutig dort erkannt, wo sie auch effektiv vorhanden ist, wenn auch nicht in dem Maß, das man erwarten würde, insbesondere bezogen auf Raum 2, in dem die Lichtlenkung deutlich zu sehen ist (Abbildung 5.3-32).

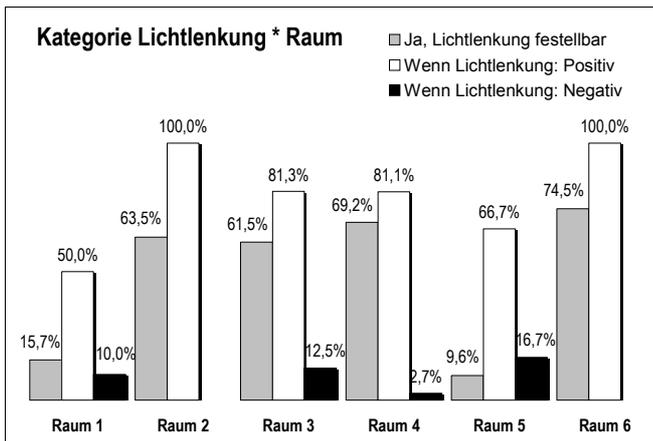


Abbildung 5.3-32: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Beurteilung der Lichtlenkung

Die Lichtlenkung wird in Raum 2 und 6 zu 100% als positiv gewertet, während in den anderen Räumen mit Jalousiesystemen (Raum 3 und 4) die Positivurteile nicht so hoch ausfallen. Negativurteile gibt es für Raum 1, in dem Lichtlenkung nur indirekt, nämlich auf die Fotovoltaik, auftritt. Ursache für diese negativen Beurteilungen mögen jedoch eher auftretende Reflexe gewesen sein oder auch Blendung. Raum 5 weist ebenfalls Negativurteile auf, obwohl dieses System kein Licht lenkt. Insgesamt wird eine vorhandene Lichtlenkung erkannt und diese zu einem hohen Prozentsatz positiv empfunden.

5.3.8.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Die Daten stimmen bei der statistischen Prüfung entsprechend überein, das heißt, es besteht eine Korrelation der Wahrnehmung und der Beurteilung der Lichtlenkung.

5.3.9 Farb- und Raumwirkung

5.3.9.1 Ziel der Kategorie

Bei bisherigen Untersuchungen zu komplexen Tageslicht- und Sonnenschutzsystemen stand meist die Funktion im Vordergrund. Die Kategorie Farb- und Raumwirkung verfolgt vorrangig das Ziel, den Einfluss der unterschiedlichen Systeme auf die empfundene Raumwirkung zu überprüfen. Darüber hinaus wird in diesem Zusammenhang die durch das System oftmals beeinflusste Farbzusammensetzung des Lichtes (Kapitel 5.2.4) auf ihren Einfluss auf den Nutzer hin untersucht. Zusammenfassend zeigt Tabelle 5.3-8 die Fragen der Kategorie.

Tabelle 5.3-8: Fragen der Kategorie Farb- und Raumwirkung

Kategorie Raumwirkung
Wirkung Tageslicht eher angenehm - eher unangenehm?
Wirkung Tageslicht eher natürlich - eher unnatürlich?
Wirkung Tageslicht eher kalt - eher warm?
Urteil Gesamttraum: Verfremdet (Kein Kreuz - Kreuz)
Negative Eigenschaft des Systems: Unangenehmer Raumeindruck (Kein Kreuz - Kreuz)
Farbänderung wahrnehmbar? (Nein - Ja)
Farbänderung eher nicht störend - eher störend?

5.3.9.2 Einfache Auszählung (A I)

Die einfache Auszählung innerhalb der Kategorie Farb- und Raumwirkung zeigt insgesamt eine positive Tendenz, also eine „eher angenehme“ und „natürliche“ Wirkung (Abbildung 5.3-33).

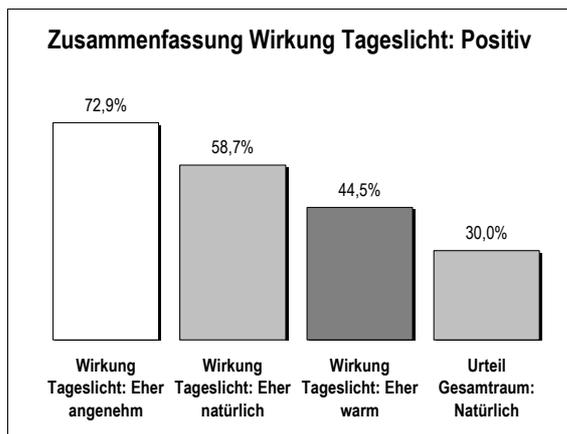


Abbildung 5.3-33: Zusammenfassung aller positiven Antworten zum Thema Lichtwirkung

72,9 % der Befragten empfinden die Wirkung des Tageslichtes als „eher angenehm“. Die Lichtwirkung wurde in 58,7% der Fälle als „eher natürlich“ und das Urteil über den Gesamttraum mit 30% angekreuzter Fälle als „natürlich“ bewertet. Dagegen steht das Urteil, ob der Raum kalt oder warm wirkt, hierbei antworten 44,5% der Probanden, der Raum wirke „eher warm“.

Bezogen auf die Mittelwerte wird die Lichtwirkung mit einem Mittelwert von 2,8 (aus der Skala von 1= angenehm – 7= unangenehm) insgesamt „eher angenehm“ bewertet, der Mittelwert von 3,3 weist insgesamt auf eine „eher natürliche“ Lichtwirkung hin und der Mittelwert von 4,4 bezogen auf „kalt – warm“ weist insgesamt auf eine neutrale Bewertung gegenüber der Farbwirkung hin. Die Diskrepanz zwischen der „natürlichen Lichtwirkung“ und dem Urteil über den Gesamttraum „natürlich“ hat ihre Begründung in den unterschiedlichen Skalen (bipolar mit 7 Skalenpunkten und ankreuzen oder nicht ankreuzen). Die Skala lässt ein feineres Urteil aufgrund der sieben Skalenpunkte zu während die Gesamtbewertung eher aus der Erinnerung heraus gefällt wird.

Entsprechend der Zusammenfassung positiver Aspekte zeigt Abbildung 5.3-34 (links) die Fragen hinsichtlich ihrer negativen Aussagen. Das Tageslicht wurde mir nur 11,3% als „eher unangenehm“, mit 24,5% als „eher unnatürlich“ und mit 20% als „eher kalt“ bewertet. Das Urteil „verfremdet“ ähnelt mit 22,6% angekreuzter Antworten der „eher unnatürlichen“ Wirkung.

Die drei Fragen, die mittels Skalen beantwortet wurden, zeigen einen relativ großen Prozentsatz an neutralen Bewertungen, am höchsten liegt hier die Frage nach der kalten oder warmen Lichtwirkung mit 35,5% (Abbildung 5.3-34 rechts).

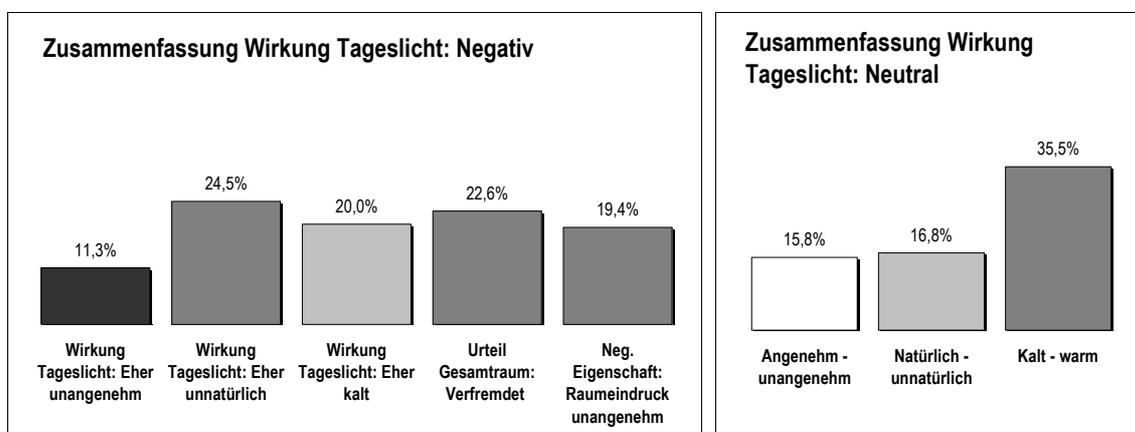


Abbildung 5.3-34: Links: Zusammenfassung aller negativen Antworten; rechts: Zusammenfassung der neutralen Bewertungen zum Thema Lichtwirkung

Die letzte Frage der Kategorie bildet die Frage nach möglichen Farbänderungen durch das geschlossene Sonnenschutz- oder Lichtlenksystem und ob, wenn Farbänderungen wahrgenommen werden, diese durch die Probanden möglicherweise als störend bewertet werden (Abbildung 5.3-35).

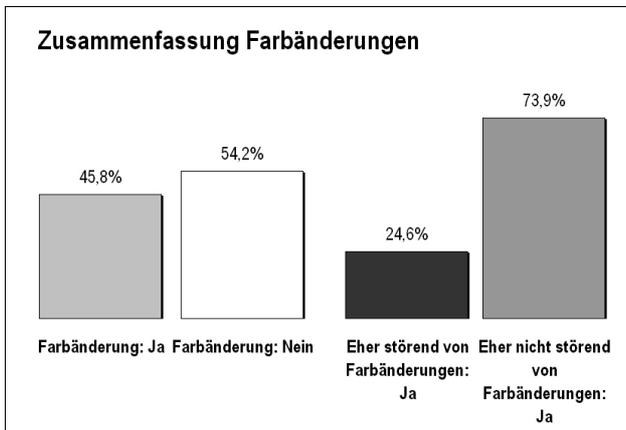


Abbildung 5.3-35: Zusammenfassung der Ergebnisse zum Thema Farbänderungen

Eine Farbänderung im Raum ist für 45,8% der Probanden erkennbar, davon werten 24,6% die Farbänderung als „eher störend“.

Zusammenfassend zeigt die einfache Auswertung dieser Kategorie ein positives Resultat bezogen auf die Raumwirkung bzw. die Lichtwirkung. Die neutrale Haltung weist relativ hohe Anteile auf.

5.3.9.3 Systemabhängigkeit (A I)

Fast alle Fragen sind signifikant systemabhängig, das heißt die Beurteilung der Raumwirkung ist in jedem Fall von dem jeweiligen eingesetzten Sonnenschutz- oder Lichtlenksystem beeinflusst. Die einzige Ausnahme bildet die negative Eigenschaft eines Systems „unangenehmer Raumeindruck“. Die vorhandenen Unterschiede zwischen den Räumen (Raum 5 wird hier mit 26,9% angekreuzter Antworten am schlechtesten beurteilt im Gegensatz zu Raum 2 mit nur 7,7% angekreuzter Antworten) sind bei der statistischen Prüfung als nicht signifikant gewertet worden. Ein Grund mag die geringe Anzahl an Urteilen für diese Frage gewesen sein. Die Zusammenfassung der positiven Antworten („eher angenehm“, „natürliche Wirkung“ und „Urteil Gesamttraum: natürlich“) zeigt ein einheitliches Bild über die Urteile in den Einzelräumen mit abweichenden Ausschlägen (Abbildung 5.3-36).

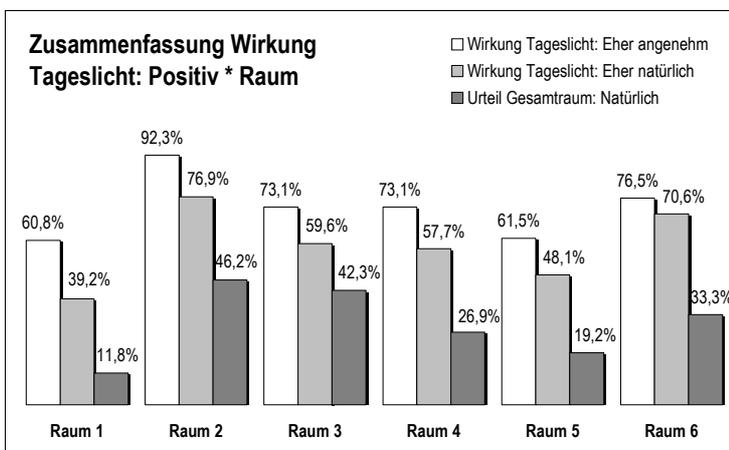


Abbildung 5.3-36: Zusammenfassung der positiven Urteile nach Raum getrennt

Am besten wird Raum 2 bewertet, der mit über 90% „eher angenehmer“ Lichtwirkung weit vor allen anderen liegt. Am schlechtesten schneiden Raum 1 und Raum 5 ab, die beide mit nur um 61% als „eher angenehm“ beurteilt

werden. Alle anderen Systeme weisen Positivurteile von 73,1 bis 76,5% auf. Bemerkenswert ist hier, dass Raum 3 und 4 bei dieser Frage die exakt gleiche Beurteilung erhalten, während bei der Frage nach Natürlichkeit Unterschiede zu Ungunsten des Raumes 4 (Weißlichthologramme) auftreten. Die geringste positive Beurteilung bezüglich der natürlichen Gesamtwirkung des Raumes erhält Raum 1 mit nur 11,8% und Raum 5 mit 19,2%.

Die Zusammenfassung der Negativurteile zeigt bei der „eher unangenehmen“ Lichtwirkung geringe Werte für Raum 2 und 4, im Gegensatz dazu steht die Bewertung der Natürlichkeit, hier schneiden Raum 1 und 5 am schlechtesten ab, ebenso bei dem Urteil „verfremdet“ (Abbildung 5.3-37).

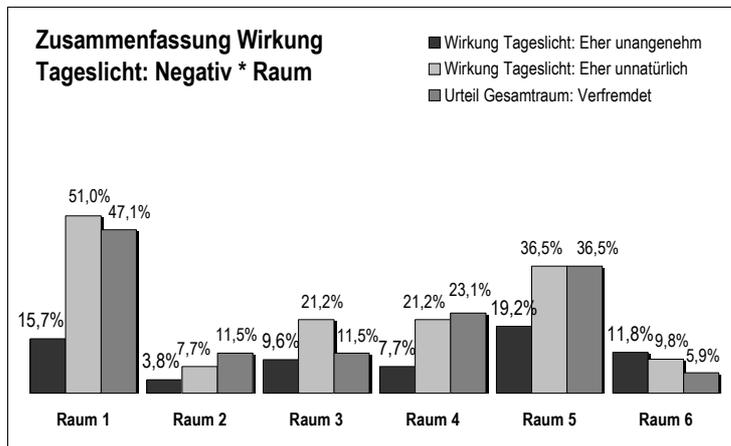


Abbildung 5.3-37: Zusammenfassung der negativen Urteile nach Räumen getrennt

Insgesamt wird klar unterschieden zwischen „unangenehm“ sowie „unnatürlich/ verfremdet“. Das Urteil „unangenehm“ weist hier einen deutlich niedrigeren Prozentsatz auf.

Die Empfindung der Probanden im Bezug auf eine kalte oder warme Lichtwirkung zeigt ein anderes Bild (Abbildung 5.3-38), dabei werden die unterschiedlichen Beurteilungen nach ihrer Gewichtung aufgetragen.

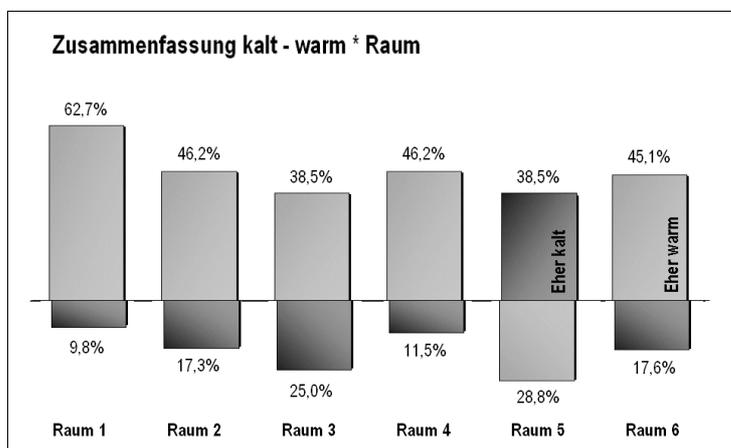


Abbildung 5.3-38: Zusammenfassung der Urteile „kalt – warm“ nach Räumen getrennt

Raum 1 wird am deutlichsten als „eher warm“ beurteilt. Der Raum wirkt „eher kalt“ sagen die meisten Probanden im Raum 5. Diejenigen Räume, die die Extreme in der Beurteilung der kalten oder warmen Lichtsituation aufweisen, werden am ehesten als „unnatürlich“ oder „verfremdet“ beurteilt.

Dies spiegelt sich auch in der Beurteilung der Wahrnehmung von Farbänderungen wieder (Abbildung 5.3-39).

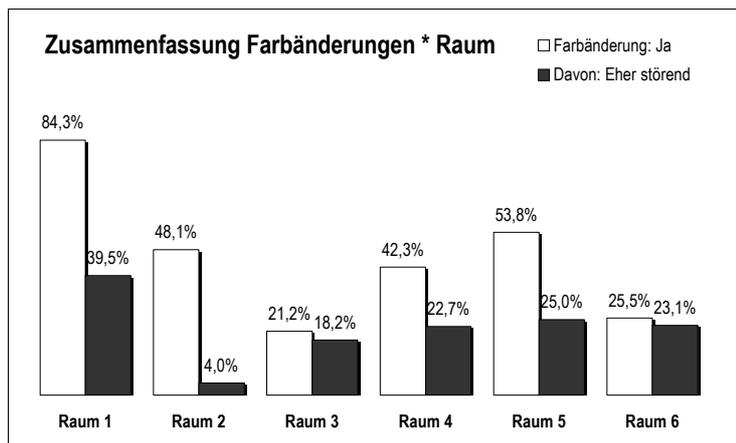


Abbildung 5.3-39: Farbänderungen und deren Bewertung nach Räumen getrennt

Die Farbänderung wird am häufigsten, nämlich zu 84,3% in Raum 1 wahrgenommen, hier ist sie auch am häufigsten mit 39,5% (bezogen auf die wahrgenommenen Farbänderungen) „störend“. In Raum 5 (elektrochromes Glas) werden Farbänderungen deutlich seltener wahrgenommen, nämlich von 53,8% der Probanden, in Raum 2 nehmen immerhin noch fast die Hälfte der Probanden eine Farbänderung wahr, beurteilen sie jedoch nur zu einem verschwindend geringen Anteil als „störend“. Die geringste Wahrnehmung einer Farbänderung waren in Raum 3 und 6 zu erkennen.

Insgesamt hat eine Farbänderung in den warmen Bereich eher einen unnatürlichen Eindruck hervorgerufen, eine Änderung in den kalten Bereich wurde eher mit „unangenehm“ bewertet.

5.3.9.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Das Urteil „angenehm - unangenehm“ bezogen auf die Lichtwirkung ist nicht konsistent mit der Beurteilung „kalt - warm“ und der Wahrnehmung der Farbänderung. Es stimmt jedoch überein mit der Natürlichkeit der Lichtwirkung und einem verfremdeten Eindruck des Gesamtraumes sowie der Störung durch die Farbänderungen. Die „natürliche bis unnatürliche“ Raumwirkung korreliert mit der Frage nach „kaltem bis warmem“ Raumeindruck, ebenso mit dem Gesamturteil „unangenehmer Raumeindruck“ und mit der Wahrnehmung von Farbänderung sowie der dazugehörigen möglichen Störung durch Farbänderungen. Die Wahrnehmung von Farbänderungen entspricht den Beurteilungen „natürlich – unnatürlich“ sowie mit den Gesamturteilen „verfremdet“ und „unangenehmer Raumeindruck“, nicht jedoch mit dem Urteil „kalt – warm“. Der Anteil der störenden Farbänderungen entspricht nicht dem Urteil über kalten oder warmen Raumeindruck. Insgesamt hat eine natürliche oder unnatürliche Lichtwirkung mit der Wahrnehmung von Farbänderungen zu tun (auch mit dem Urteil kalt-warm).

5.3.10 Privatheit

5.3.10.1 Ziel der Kategorie

Das Bedürfnis, sich vor Einblicken in den „privaten“ Arbeitsbereich zu schützen ist allgemein bekannt. Man denkt an Pappeln oder Jalousien, manchmal sogar Regalen vor verglasten Trennwänden in modernen Bürogebäuden. Die Frage in diesem Zusammenhang ist, ob die Privatheit bei gleichen Räumen, aber unterschiedlichen Systemen möglicherweise unterschiedliche Ausprägungen hat. Ziel ist, subjektive Einschätzungen von den Probanden über ihren privaten Arbeitsplatz zu erhalten. Aus Gründen der Datenreduktion wurden hier keine Faktorenanalysen (Kapitel 4.4.1) durchgeführt. Mit in die Auswertung eingeflossen sind jedoch noch einmal die Urteile über die Gesamträume „offen“, „geschlossen“ und „eingeschlossen“.

Tabelle 5.3-9: Fragen der Kategorie Privatheit

Kategorie Privatheit	
Einblick in Raum tagsüber	
Einblick in Raum abends	

5.3.10.2 Einfache Auszählung (A I)

Die einfache Auszählung zeigt Prozentsätze um etwas mehr als 20% zum Thema „Einblick in den Raum tagsüber und abends möglich“. Dagegen stehen noch einmal die Beurteilungen des Gesamtraumes aus Kapitel 5.3.2 (Abbildung 5.3-40).

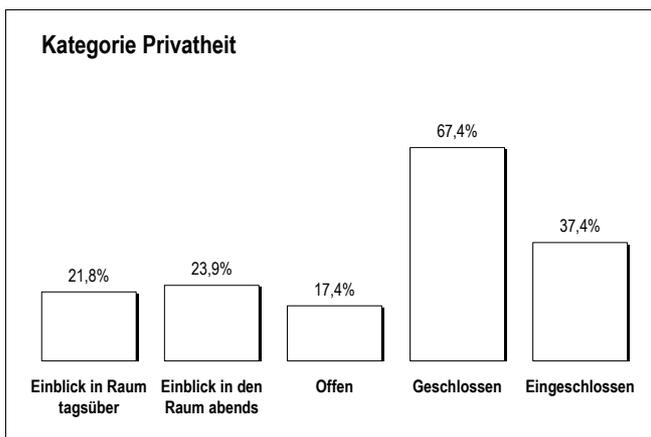


Abbildung 5.3-40: Urteile der Kategorie Privatheit in der Zusammenfassung

5.3.10.3 Systemabhängigkeit (A I)

Die Systemabhängigkeit wird in dieser Kategorie klar dokumentiert (Abbildung 5.3-41). System 1 und 5 werden am ehesten mit einem Einblick in den Raum in Verbindung gebracht, während dies in den anderen Räumen gar keine oder nur eine geringfügige Rolle spielt.

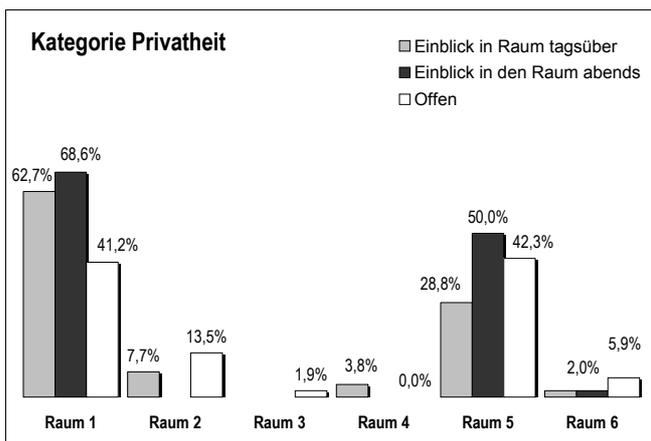


Abbildung 5.3-41: Zusammenfassung der Beurteilungen in der Kategorie Privatheit nach Räumen getrennt

Trotz der Tatsache, dass Sonnenschutzsysteme, wenn beweglich, abends hochgefahren werden, gibt es bei der Beurteilung einen deutlichen Zusammenhang mit den geschlossenen bzw. aktiven Systemen. Dies ist auf die Art und Weise der Befragungen zurückzuführen, die nur bei geschlossenen Systemen durchgeführt wurden. Eine abweichende Bewertung ist bei Langzeitbefragungen möglich.

5.3.10.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Die Konsistenz innerhalb des Datensatzes zum Thema Privatheit besteht zu 100%, das heißt, alle hier gezeigten Fragen stimmen mit den jeweiligen anderen in ihren Antworten überein.

5.3.11 Gesamtbeurteilung

5.3.11.1 Ziel der Kategorie

Die Kategorie „Gesamtbeurteilungen“ gibt einen Überblick über die Benotung der Systeme durch die Probanden und dient als Referenz für die im weiteren Verlauf zu entwickelnde Bewertungsmatrix.

5.3.11.2 Einfache Auszählung (A I)

Die Notenverteilung über die Gesamtbeurteilung der Systeme ist in Abbildung 5.3-42 dargestellt.

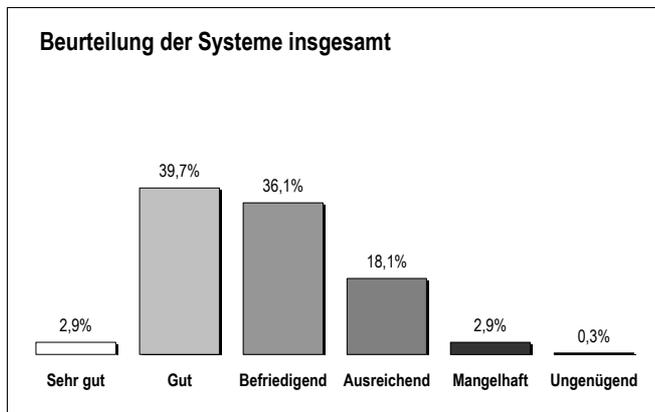


Abbildung 5.3-42: Gesamtbeurteilungen der Systeme durch die Probanden

Insgesamt beurteilen fast 80% der Befragten die Systeme mit „eher gut“ (Schulnoten 1-3). Etwas genauer aufgeschlüsselt beurteilen 42,6% die Systeme mit „sehr gut“ bis „gut“, 36,1% sagen, die Systeme sind „befriedigend“ bis „ausreichend“ und nur 3,2% finden die Funktionen „mangelhaft“ oder „ungenügend“.

5.3.11.3 Systemabhängigkeit (A I)

Die Bewertungen der Systeme waren in der Untersuchung der Systemabhängigkeit nicht signifikant, alle Räume schneiden auf der Skala von 1-7 im Mittel eher gut bis befriedigend ab. Die Gesamtbeurteilung spiegelt in keiner Weise die unterschiedlichen Systeme wieder, sondern zeigt, dass negative Bewertungen mancher Eigenschaften durch positive Bewertungen ausgeglichen werden, die dann in der Gesamtsumme ähnliche Bewertungen ergeben.

5.3.11.4 Konsistenz der Daten innerhalb der Kategorie (A II)

Es wurde keine Konsistenzprüfung durchgeführt.

5.4 Interkategorieelle Abhängigkeiten

5.4.1 Ziel

Bei der einfachen Auszählung und der Überprüfung der Systemabhängigkeit sind zusätzliche Fragen bezogen auf andere Kategorien aufgetreten, die hier bei einer kategorienübergreifenden Betrachtung weiter analysiert werden. Die untersuchten Bezüge werden in Abbildung 5.4-1 dargestellt.

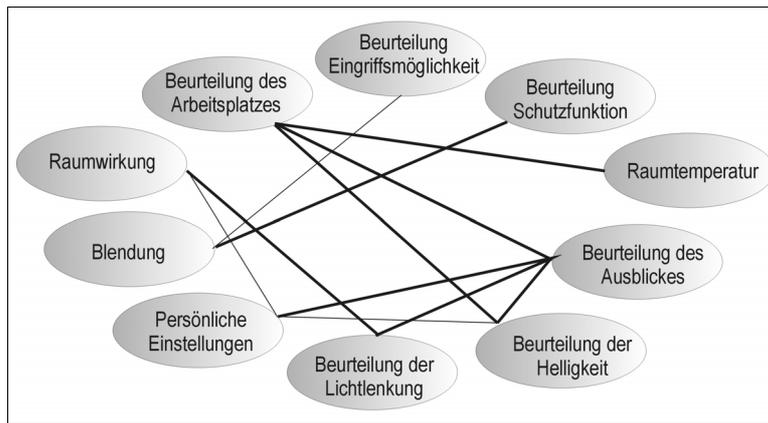


Abbildung 5.4-1: Zu analysierende interkategoriale Beziehungen

5.4.2 Arbeitsplatz im Bezug zum Ausblick

Es stellte sich die Frage, ob möglicherweise der Arbeitsplatz in Abhängigkeit der Aussicht beurteilt wird. Das Urteil „offen“ aus der Kategorie Arbeitsplatz korreliert tatsächlich mit der Frage nach dem Ausblick, und zwar bei denjenigen Fragen, die direkt nach dem Ausblick fragen und bei der Einschränkung des Tageslichtes durch den Sonnenschutz. Abbildung 5.4-2 zeigt die Zusammenhänge im Überblick.

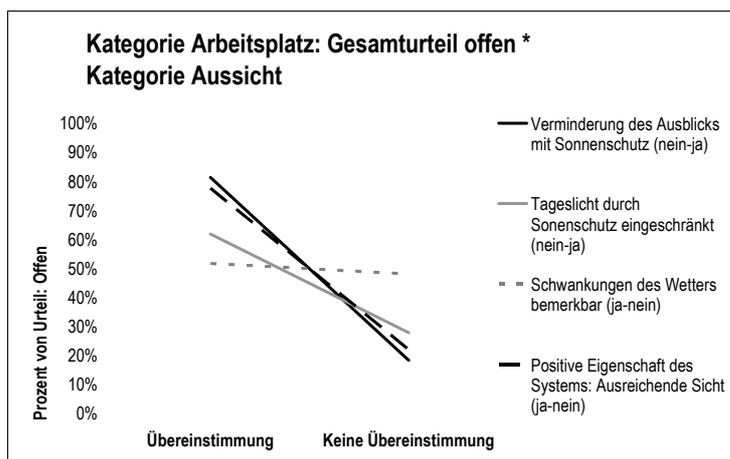


Abbildung 5.4-2: Gesamtbeurteilungen „offen“ gegen die Kategorie Aussicht gestellt

Dabei wird das Urteil „offen“ den Fragen graphisch gegenübergestellt, das heißt, bezogen auf die Verminderung des Ausblicks beispielsweise, dass bei über 80% der Urteile „offen“ die Verringerung des Ausblicks gering und bei unter 20% der Urteile „offen“ der Ausblick als vermindert gilt. Ebenso werden die positiven Eigenschaften „ausreichende Sichtverbindung“ bei fast allen Urteilen „offen“ getroffen. Die Korrelation mit der Wahrnehmung von Schwankungen ist ebenfalls signifikant, jedoch nicht sehr ausgeprägt.

Interessant ist bei der Frage nach Offenheit und Ausblick auch die Beurteilung in den Einzelräumen. Abbildung 5.4-3 stellt die Beurteilungen „offen“ der „Verminderung des Ausblicks bei geschlossenem System“ gegenüber. Eine Übereinstimmung von fast 100% gibt es in den Räumen mit Ausblick (Raum 1 und 5), eine geringfügige Übereinstimmung in Raum 2, der eine wesentlich höhere Raumhelligkeit bietet. Keine Übereinstimmung zu 100% zeigen die Räume 3 und 6, diese bieten bei geschlossenem Sonnenschutz keinen Ausblick. Für Raum 4 gab es keine Urteile „offen“. Die Beurteilung eines Raumes bezogen auf die Raumwirkung „offen“ hängt also eindeutig zusammen mit dem vorhandenen Ausblick.

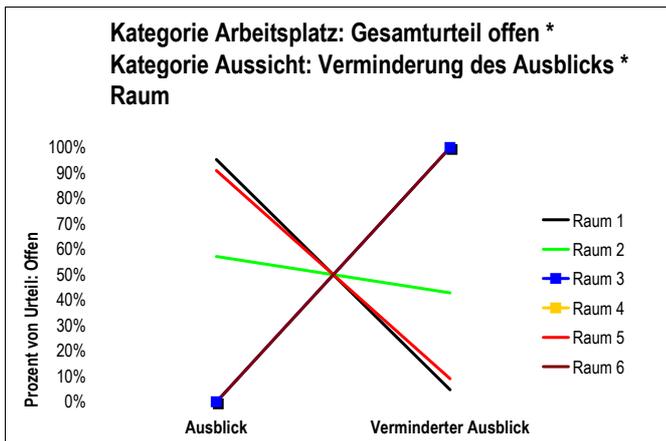


Abbildung 5.4-3: Beurteilung: „offen“ gegen die Verminderung des Ausblicks pro Raum

5.4.3 Arbeitsplatz im Bezug zur Raumtemperatur

Es stellte sich die Frage, ob das aktuelle Wohlbefinden, obwohl nicht in den Räumen unterschiedlich bewertet, möglicherweise trotzdem von den empfundenen Raumtemperaturen abhing. Bei einer Signifikanzprüfung konnte dieser Zusammenhang mit $P < 0,05$ nachgewiesen werden. Je höher also die Innenraumtemperaturen desto schlechter wurde das allgemeine Wohlbefinden von den Probanden bewertet.

5.4.4 Arbeitsplatz im Bezug zur Helligkeit

Die Frage nach der Kompensation eines verminderten Ausblicks und damit auch dem Urteil „offen“ stellt sich insbesondere in Raum 2. Ein Vergleich der Beurteilung der Offenheit mit Fragen der Kategorie Helligkeit zeigt jedoch keine statistisch signifikanten Zusammenhänge. Dies mag jedoch in der geringen Anzahl an Urteilen je Raum begründet liegen. Aus diesem Grund wurde die Analyse noch einmal nur für die Lichtlenksysteme zusammengefasst durchgeführt (Raum 2, 3, 4 und 6). Hier gibt es tatsächlich einen statistisch relevanten Zusammenhang zwischen dem Gesamturteil „hell“ eines Raumes (Abbildung 5.4-4) und der Beurteilung „offen“. Der Prozentanteil der Beurteilung „offen“ steigt mit dem Urteil „hell“ eines Raumes an.

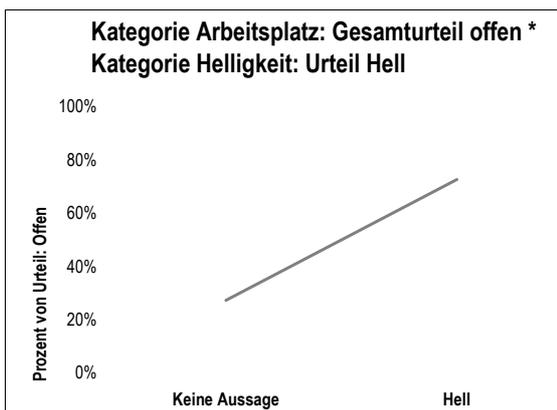


Abbildung 5.4-4: Gesamturteil: Offen gegenübergestellt dem Gesamturteil: Hell (nur Lichtlenksysteme)

Damit kann belegt werden, dass tatsächlich die fehlende Offenheit eines Raumes, damit auch der fehlende Ausblick mit einer höheren Raumhelligkeit kompensiert werden kann.

5.4.5 Aussicht im Bezug zur Helligkeit

Ein vermuteter Zusammenhang der Bewertungen einer verminderten Aussicht (positiv – negativ) mit der Raumhelligkeit führt hier zu einer genaueren Analyse dieses Bezuges.

Wie in Kapitel 5.4.4 bereits dokumentiert, wurde in diesem Zusammenhang die Analyse ebenfalls nur für die Lichtlenksysteme in Raum 2, 3, 4 und 6 durchgeführt, um bessere Vergleichsmöglichkeiten bezogen auf den Ausblick zu erhalten. Der statistisch signifikante Zusammenhang zwischen der negativen Beurteilung der Verminderung der Aussicht im Zusammenhang mit der Beurteilung der Helligkeit eines Raumes wird in Abbildung 5.4-5 dargestellt.

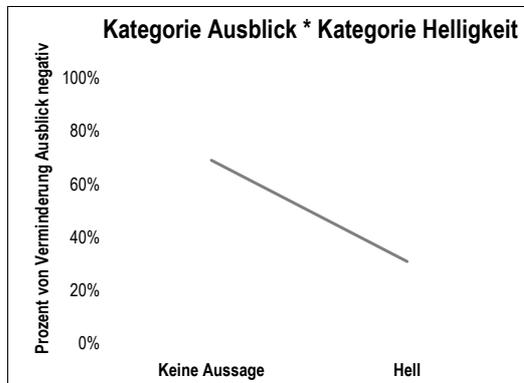


Abbildung 5.4-5: Negative Beurteilung der Verminderung des Ausblicks gegenüber den Urteilen „hell“ (nur Lichtlenksysteme)

Eine fehlende Beurteilung „hell“ im Rahmen der Möglichkeit, im Fragebogen ein Kreuz zu machen oder nicht, bedeutet einen höheren Anteil an negativen Beurteilungen gegenüber der Aussicht.

Für alle anderen Fragen bezogen auf die Helligkeit konnte kein signifikanter Zusammenhang definiert werden.

Der interkategorieelle Vergleich zeigt, dass insgesamt der hellere Raumeindruck, nicht jedoch das ausreichende Tageslicht am Arbeitsplatz, in statistisch signifikanter Verbindung steht mit der negativen Bewertung der verminderten Aussicht. Anders sieht es bei der Analyse nach Räumen getrennt aus. Hier ist der Bezug nur in Raum 4 und 6 signifikant, je dunkler, desto negativer wird die Verminderung des Ausblicks angesehen. Die anderen Jalousiesysteme sowie System 1 werden bei helleren Räumen schlechter bewertet. Dieser Bezug kann also insgesamt nicht als signifikant gelten.

5.4.6 Aussicht im Bezug zur Lichtlenkung

Aus dem vorangegangenen Kapitel heraus stellte sich zusätzlich die Frage, ob möglicherweise die Lichtlenkung für eine weniger schlechte Bewertung eines grundsätzlich gestörten oder verminderten Ausblicks verantwortlich ist. Abbildung 5.4-6 zeigt diesen Zusammenhang (wieder nur für die Lichtlenksysteme) im Bezug zur Wahrnehmung (links) und zur Beurteilung (rechts) der Lichtlenkfunktion auf.

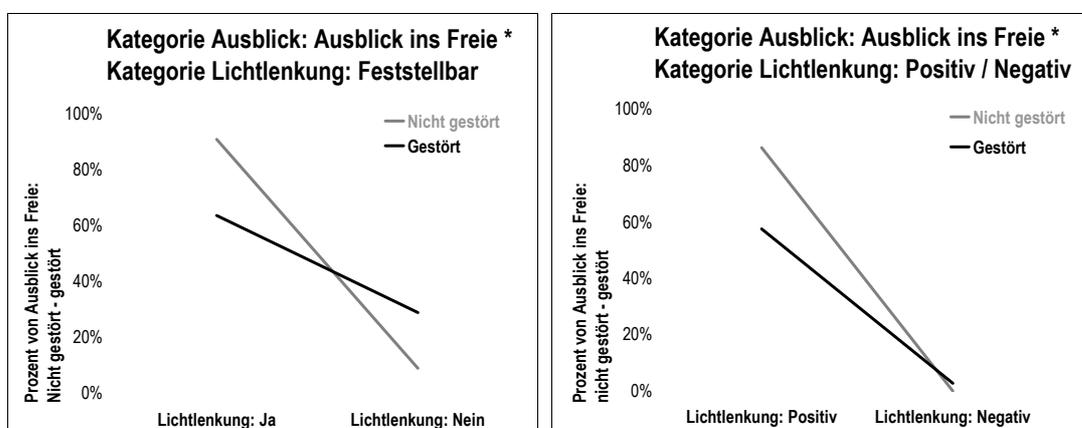


Abbildung 5.4-6: Links: Beurteilungen der Aussicht gegenüber den Beurteilungen der feststellbaren Lichtlenkung; rechts: Ausblick gegenüber der Bewertung der Lichtlenkung (je nur Lichtlenksysteme)

In der Tendenz zeigt sich auch hier, dass ein höherer Prozentsatz nicht gestörten Ausblicks mit einer Feststellung der Lichtlenkfunktion und dem positiven Urteil derselben zusammen hängt.

5.4.7 Eingriffsmöglichkeit im Bezug zur Blendung

Aufgrund der einfachen Auswertungen (Kapitel 5.3.6 und 5.3.5) wird ein Zusammenhang zwischen der Wichtigkeit von Eingriffsmöglichkeiten auf das System und möglicherweise auftretenden Störungen vermutet. Der Vergleich der Beurteilung der Eingriffsmöglichkeiten mit der Frage nach aktuell vorhandener Blendung zeigt sich statistisch nicht signifikant. Dennoch wird bei auftretender Blendung bei den Eingriffsmöglichkeiten häufiger „wichtig“ angekreuzt, ohne Blendung häufiger „unwichtig“.

Bei allen Fragen ist auch nach Räumen getrennt kein statistisch signifikanter Zusammenhang zu erkennen. Die Ursache hierfür kann in der geringen Anzahl an Urteilen zum Thema Blendung und Störung insgesamt liegen, denn die Tendenz zeigt, dass bei Blendung oder Störung Eingriffsmöglichkeiten als wichtiger erachtet werden.

5.4.8 Schutzfunktion im Bezug zur Blendung

Die Analyse der Schutzfunktion in den Einzelkategorien hat ergeben, dass zusätzlicher Schutz insbesondere in Raum 6 gefordert wird, trotz des im Vergleich zu den anderen Räumen geringen Niveaus an vertikalen Beleuchtungsstärken. Der Grund wird in der möglichen Blendung vermutet (Vergleich mit Kapitel 5.2.3, Abbildung 5.2-6). Korreliert wird hier die Frage nach einem zusätzlich notwendigen Schutz und den Fragen zum Thema Blendung / Störung. Alle diese Zusammenhänge zeigen sich statistisch signifikant. Stellvertretend zeigt Abbildung 5.4-7 den Zusammenhang des zusätzlichen Schutzes mit störenden Spiegelungen.

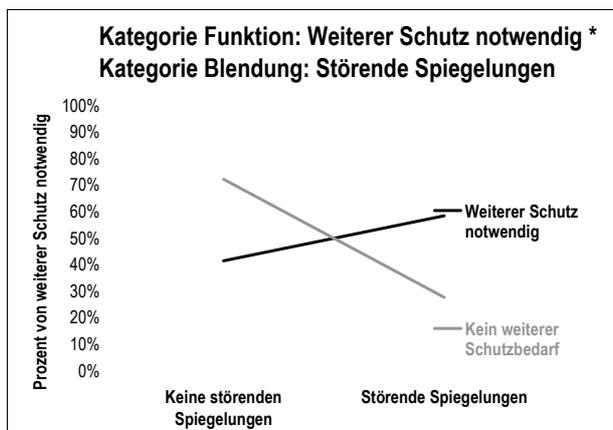


Abbildung 5.4-7: Der Wunsch nach weiterem Schutz den möglichen störenden Spiegelungen gegenübergestellt

Ein zusätzlicher Schutz wird also hauptsächlich und immer dann gefordert, wenn Blendung oder aber Störungen durch Spiegelungen auftreten. Er wird nicht abhängig von der Raumtemperatur gefordert.

5.4.9 Persönliche Einstellungen im Bezug zur Aussicht

Die persönlichen Einstellungen des Sonnen- und Blendschutzes am Ende einer jeden Befragungsrunde wiesen einen möglichen Zusammenhang mit dem Ausblick auf, weniger mit der Lichtqualität oder -quantität. Anders formuliert, es wird vermutet, dass Sonnen- und Blendschutz immer dann geändert bzw. geöffnet werden, wenn der Ausblick nicht ausreichend ist, weniger deshalb, weil die Helligkeit nicht ausreichend ist. Abbildung 5.4-8 zeigt die Frage nach der persönlichen Einstellung des Sonnen- und Blendschutzsystems in Verbindung mit einem ausreichenden oder nicht ausreichenden Ausblick zusammenfassend über alle Räume auf.

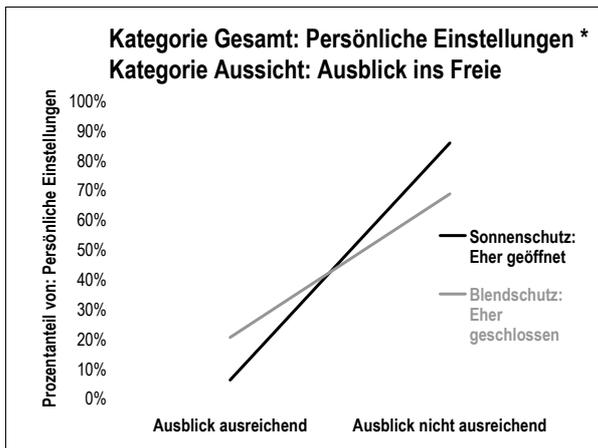


Abbildung 5.4-8: Gegenüberstellung der Anteile persönlicher Einstellungen der Systeme und der Beurteilung des Ausblicks

Obwohl nur die Bedienung des Blendschutzes als statistisch signifikant gelten kann (dies liegt am Einschluss der Sonnenschutzsysteme 1 und 5, die nicht veränderbar waren), zeigt auch die Veränderung des Sonnenschutzes eine klare Abhängigkeit. Das heißt, je gestörter die Aussicht, desto eher wurden die Systemeinstellungen verändert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Blendschutz häufig zugunsten der Aussicht genutzt und der Sonnenschutz, so er die Aussicht einschränkt, so weit wie möglich geöffnet wird.

5.4.10 Persönliche Einstellungen im Bezug zur Helligkeit

Die zweite Frage in diesem Zusammenhang ist die persönliche Einstellung von Sonnen- und Blendschutz bezogen auf die Bewertung der Raumhelligkeit, also der mögliche Beweis, dass die Aussicht die vorrangige Entscheidungsgrundlage für die Nutzung der freien Einstellung ist. Die Frage nach dem ausreichenden Tageslicht am Arbeitsplatz zeigt eine Tendenz zur Betätigung der Systeme bei nicht ausreichender Beleuchtung (Abbildung 5.4-9 links). Die Frage nach der Raumwirkung dagegen scheint relativ unabhängig von der Nutzung der persönlichen Einstellungsmöglichkeit zu sein (Abbildung 5.4-9 rechts).

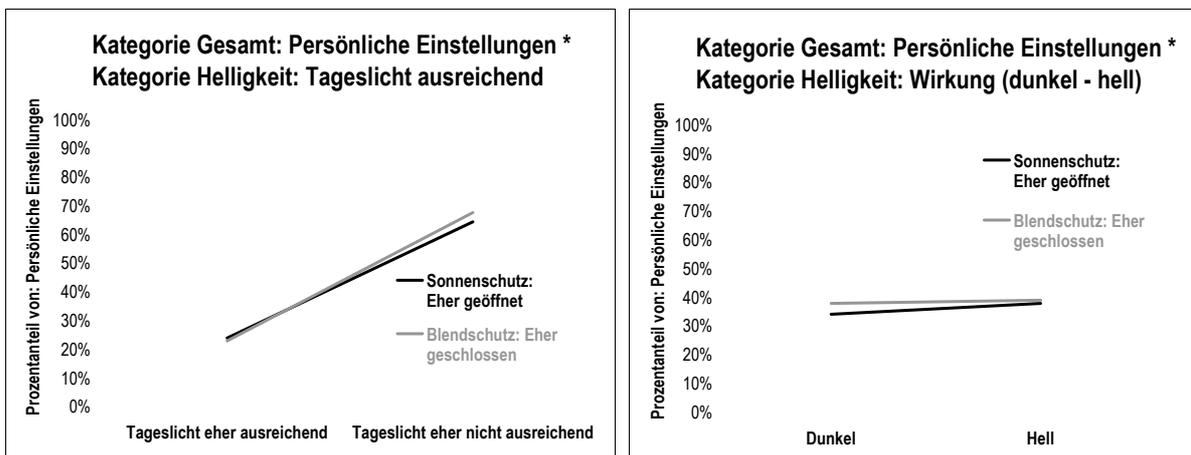


Abbildung 5.4-9: Links: Persönliche Einstellungen und ausreichendes Tageslicht; rechts: persönliche Einstellungen und Raumwirkung dunkel - hell

Insgesamt lässt sich sagen, dass der Blendschutz häufig anstelle des Sonnenschutzes zugunsten des Ausblicks genutzt wird, sofern freie Einstellungen möglich sind. Die Nutzung scheint jedoch weniger von der Raumwirkung bzw. der Qualität des Tageslichtes als vielmehr vom Ausblick und dem notwendigen Tageslicht abhängig zu sein.

5.4.11 Lichtlenkung im Bezug zur Raumwirkung

Aus den einfachen Auswertungen heraus stellte sich die Frage, welchen Einfluss die Lichtlenkfunktion auf die Raumwirkung hat. Die beiden Kategorien zeigen insgesamt bei vielen Fragen deutlich signifikante Abhängigkeiten. Die Wahrnehmung einer Lichtlenkung und deren Bewertung korreliert bei der Auswertung über alle Räume hinweg nicht mit der Frage nach einem „dunklen“ oder „hellen“ Raumeindruck. Sie korreliert jedoch mit einem „natürlichen“, „verfremdeten“ oder gar „unangenehmen“ Raumeindruck. Eine wahrnehmbare Lichtlenkung wird eher einen „angenehmen“, „natürlichen“, seltener einen „verfremdeten“ Raumeindruck erzeugen, und auch entsprechend eher positiv bewertet werden. Diese Tendenz zeigt Abbildung 5.4-10.

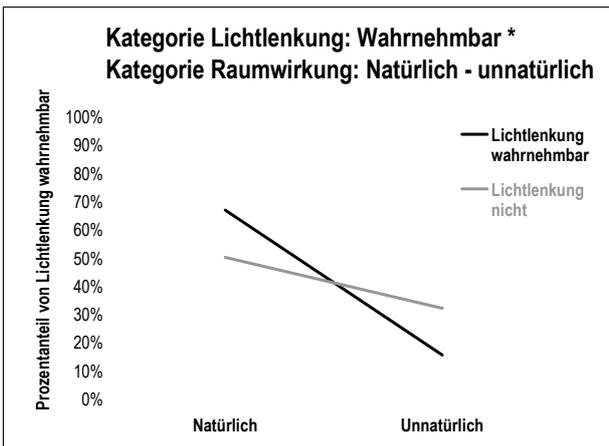


Abbildung 5.4-10: Eine auftretende Lichtlenkung über dem subjektiven Raumeindruck (nur Lichtlenksysteme)

Bei der Auswertung der Jalousiesysteme mit Lichtlenkfunktion entstehen zusätzliche signifikante Abhängigkeiten, und zwar zu der Lichtwirkung „kalt – warm“. Eine Lichtlenkung wird dann positiv bewertet, wenn ein „eher warmer“ Raumeindruck entsteht und negativ, wenn der Raumeindruck „eher kalt“ ist (Abbildung 5.4-11 links), bzw. ein „eher warmer“ Eindruck wird möglicherweise durch eine vermehrte Lichtlenkung unterstützt. Im Gegenzug wird ein Raum, der nicht „natürlich“ wirkt, bezogen auf die Lichtlenkung eher negativ beurteilt, oder umgekehrt formuliert, eine negative Bewertung der Lichtlenkung resultiert möglicherweise aus einer nicht natürlichen Raumwirkung (Abbildung 5.4-11 rechts).

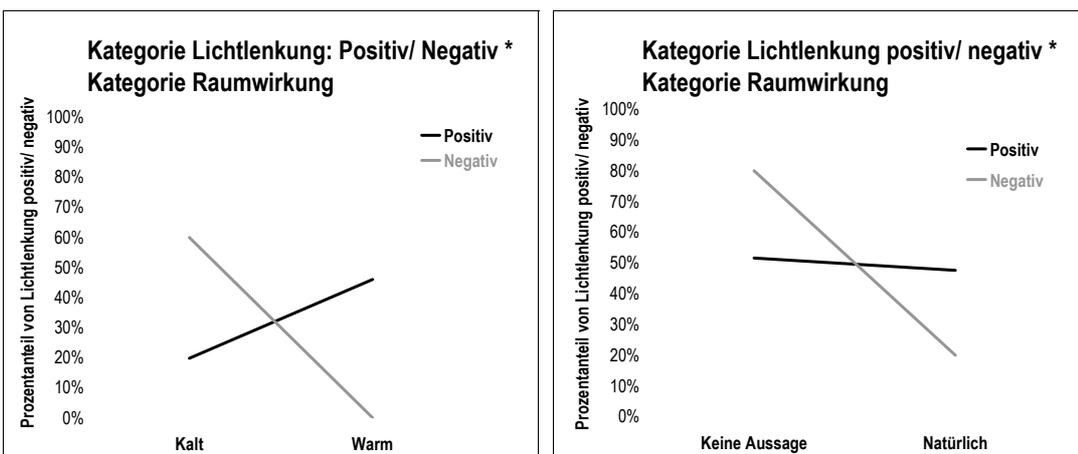


Abbildung 5.4-11: Links: Bewertung der Lichtlenkfunktion im Bezug zur Lichtwirkung kalt – warm (nur Lichtlenksysteme); rechts: Bewertung der Lichtlenkung im Bezug zur Beurteilung natürlich (nur Lichtlenksysteme)

Alles in allem zeigt sich bei dieser Betrachtung deutlich, dass zum einen eine Lichtlenkung positiv bewertet wird, wenn der Raum entsprechend „natürlich“ und „angenehm“ bewertet wird, und zum Anderen, dass eine „warme“ Lichtwirkung anscheinend auch einen positiven Effekt auf die Bewertung der Lichtlenkung ausübt.

6 Feldversuche - übergreifende Analyse

6.1 Ziel

Der Gesamtdatensatz dieser Studie wurde anhand von Faktorenanalysen überprüft. Das heißt, Messwerte ähnlicher Verhaltensweisen wurden zu Faktoren zusammengefasst, und diese mit allen Fragen auf statistisch signifikante Korrelationen hin überprüft (Kapitel 4.4.1). Die wichtigsten Ergebnisse einer jeden Kategorie werden in diesem Teil der Arbeit dargestellt. Die Vorgehensweise verfolgt vorrangig das Ziel, Messgrößen für die Charakterisierung von Tageslichtsystemen im Zusammenhang mit subjektiven Beurteilungen zu definieren. Darüber hinaus wird eine Schwellwertanalyse zu einzelnen repräsentativen Fragen mit entsprechend abhängigen Messgrößen aus der Faktorenanalyse durchgeführt. Die Anzahl der durchgeführten Befragungen ist aufgrund der zum Teil sehr unterschiedlich bewerteten Systeme für diese Art der Schwellwertanalyse häufig zu klein bzw. die subjektive Bewertung in ihren Unterschieden zu groß; Schwellwerte werden deshalb nur für wenige Messgrößen definiert.

6.2 Faktorenanalyse

6.2.1 Vorgehensweise

Die Faktorenanalyse beschreibt die Abhängigkeit subjektiver Nutzerbewertung von objektiven Messdaten. Faktoren wurden aufgrund ihrer ähnlichen Verhaltensweisen statistisch erfasst und im weiteren Verlauf geprüft. Tabelle 6.2-1 zeigt die Faktoren mit den beinhalteten Einzeldaten in der Übersicht. Zur Erklärung der Messgrößen wird auf Kapitel 1.5.4.2 und zur Erklärung der Messpositionen auf Kapitel 4.2.2 verwiesen.

Tabelle 6.2-1: Zusammenstellung der Faktoren, resultierend aus der statistischen Analyse der Messwerte

		Faktoren	
LUX	Beleuchtungsstärken (Lux)	tempi	Innenraumtemperatur (°C)
		M1	Horizontal an der Decke (D1-3) Horizontal in der Arbeitsebene fensternah (A1) Vertikal an der Rückwand (RW 1) Sonnenlichtquotient an der Decke fensternah (SQ D1)
		M2	Global (messglob) Vertikal außen vor Fassade (messvert) Sonnenlichtquotient in der Arbeitsebene (SQ A1)
		M3	Vertikal am Auge (Aug) Sonnenlichtquotient am Auge (SQ Aug)
		L1	Minimalwerte Position 1, 2, 3 (Min Pos1, 2, 3)
		L2	Mittelwerte Position 1, 2, 3 (MW Pos 1, 2, 3) Maximalwerte Position 3 (Max Pos 1, 2, 3) Uniformität (Unif)
LMK	Leuchtdichten (cd/m ²)	L3	Maximalwerte Position 1, 2, 3 (Max Pos 1, 2, 3)
		L4	Minimal-, Maximal- und Mittelwerte während der Befragungen
		F1	Farbtemperaturabweichung Wand, Decke, Arbeitsebene, Nutzerposition Farbwiedergabewertabweichung an der Nutzerposition
		F2	Farbtemperatur Decke, Arbeitsebene, Nutzerposition
Farbe	Farbtemperaturen (Kelvin)	F3	Farbtemperatur und -abweichung oberer und unterer Fensterbereich

Zusätzlich zu den statistisch relevanten Abhängigkeiten wurden bei für die Praxis wichtigen Messwerten weitere Analysen durchgeführt, die zum Teil eindeutige Aussagen zulassen. Die statistische Irrelevanz (in den Übersichten

in Klammern dargestellt) kann grundsätzlich vier Ursachen haben. Zum einen wird eine allgemeine Abhängigkeit aufgrund von Systemunterschieden häufig nicht signifikant gewertet, d.h. hier werden gegebenenfalls Systeme oder Systemfunktionen zusätzlich einzeln betrachtet werden müssen, zum anderen werden die Faktoren bei der Analyse gewichtet, d.h. die jeweils am Anfang stehenden Werte (Tabelle 6.2-1) haben theoretisch die höchste Gewichtung, dies jedoch weicht in der Praxis bezogen auf einzelne Systeme häufig ab. Die dritte Ursache kann in der hohen Streubreite der Mess- oder Befragungsergebnisse liegen. Ein letzter Grund kann die vergleichsweise geringe Anzahl entsprechender Antworten sein, die dann statistisch nicht mehr signifikant ist. Bei manchen Fragen können also durchaus zusätzliche Abhängigkeiten vorhanden sein.

Für die Kategorien Privatheit und die Gesamtbeurteilungen wurden aufgrund der unabhängigen Fragestellungen keine Faktorenanalysen durchgeführt. Der Faktor L1 mit den minimalen Leuchtdichten kann für die Praxis als irrelevant gelten und wird daher nicht weiter analysiert. Zu Beginn einer jeden Kategorie wird jeweils eine Übersicht über die signifikant abhängigen Faktoren gegeben. Hier werden positiv abhängige Faktoren mit einem „+“ gekennzeichnet (je höher der Messwert desto höher die Punkte auf der Skala) und negativ abhängige Faktoren mit einem „-“ (je höher der Messwert desto niedriger die Punkte auf der Skala). Durchgehend wird für die Räume im folgenden ein Farbcode verwendet, um die Lesbarkeit zu erleichtern, dass heißt, immer wenn nach Räumen getrennt ausgewertet wird, wird Raum 1 in schwarz, Raum 2 grün, Raum 3 blau, Raum 4 orange, Raum 4 rot und Raum 6 braun dargestellt. Die Raumnummern entsprechen den Systemnummern.

6.2.2 Arbeitsplatz

Die Kategorie Arbeitsplatz beinhaltet Fragen zum „momentanen Wohlbefinden“, der „Position des Bildschirms“ und des Arbeitsplatzes im Hinblick auf das Fenster sowie seiner Größe, außerdem die Frage nach der Raumwirkung (offen, geschlossen und eingeschlossen). Drei der sieben Fragen dieser Kategorie zeigen sich unabhängig von Messwerten oder Faktoren. Einmal war die Innenraumtemperatur signifikant, diese jedoch zeigt sich bei der detaillierten Betrachtung aufgrund großer Raumunterschiede nicht konsistent. Die Farbfaktoren zeigen sich signifikant bei den Beurteilungen des Raumes nach „offen“, „geschlossen“, „eingeschlossen“, dokumentieren jedoch in diesem Zusammenhang die Systemfunktion (Raum 5 mit deutlich höherem Blauanteil) und werden hier deshalb nicht weiter analysiert. Am häufigsten waren die Leuchtdichtefaktoren signifikant. Tabelle 6.2-2 zeigt die statistisch signifikanten Abhängigkeiten für die Kategorie Arbeitsplatz im Vergleich.

Tabelle 6.2-2: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Arbeitsplatz

Faktorenanalyse Kategorie Arbeitsplatz								
Kategorie	TEMP	LUX			LMK			
	temp1	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4
Momentanes Wohlbefinden								
Position des Bildschirms								
Nähe d. Fensters 1 eher gut - 2 eher zu weit					+	+		
Urteil Gesamtraum: Offen 0 kein Kreuz - 1 Kreuz					+		-	
Urteil Gesamtraum: Geschlossen 0 kein Kreuz - 1 Kreuz					-		+	
Urteil Gesamtraum: Eingeschlossen 0 kein Kreuz - 1 Kreuz	+							
Größe des Arbeitsbereiches								

Die Frage nach der „Nähe des Fensters“ (im Bezug zum Arbeitsplatz) zeigt signifikante Abhängigkeiten mit den Faktoren L1 (nicht dargestellt) und L2 (Abbildung 6.2-1 links), je höher die mittleren Leuchtdichten desto eher wird die „Nähe des Fensters“ als „zu weit“ beurteilt. Dies gilt in der Zusammenfassung sowohl bei den Lichtlenk- als auch bei den Sonnenschutzsystemen (Abbildung 6.2-1 rechts).

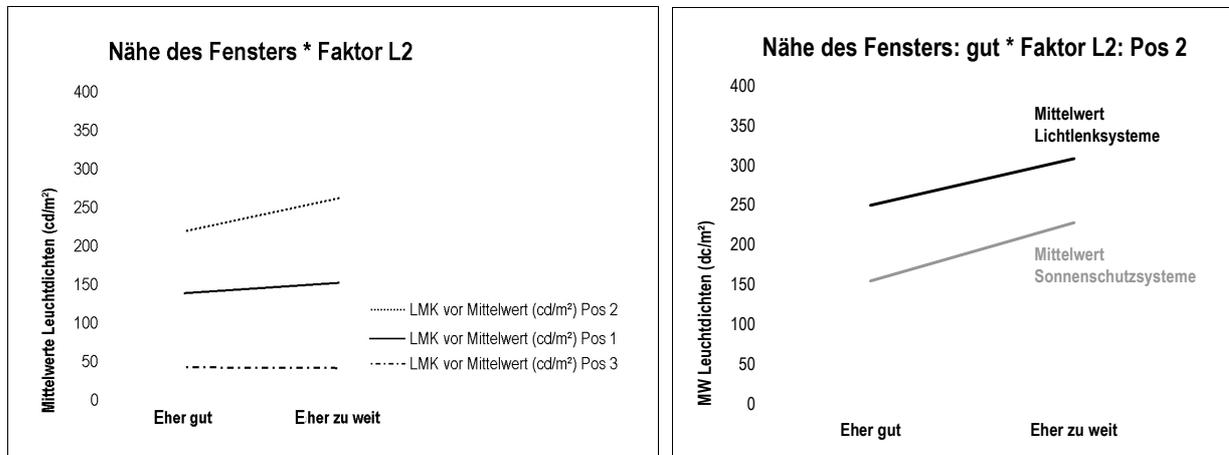


Abbildung 6.2-1: Links: Vergleich der Ergebnisse „Nähe des Fensters“ mit Mittelwerten der Faktoren L2; rechts: getrennt nach Funktion der Systeme bezogen auf Faktor L2 aus Messposition 2

Eine getrennte Analyse nach Räumen zeigt uneinheitliche Ergebnisse, so dass der Zusammenhang zwischen Minimal- und Maximalwerten nicht als allgemeingültig interpretiert werden kann.

Das Raumurteil „offen“ weist insgesamt einen negativen Zusammenhang mit den maximal auftretenden Leuchtdichten im Raum auf (Abbildung 6.2-2 links). Dies liegt begründet darin, dass die Sonnenschutzsysteme deutlich häufiger als „offen“ bezeichnet werden, aber wesentlich niedrigere Raumhelligkeiten aufweisen. Daher verzerrt diese Betrachtungsweise das Ergebnis. Die Raumanalyse (Abbildung 6.2-2 rechts) zeigt, dass ein Raum als „offen“ beurteilt wird, der eine positive Abhängigkeit mit maximalen Leuchtdichten aufweist. Einzig Raum 2 weicht davon ab. Die Ursache hierfür wird im weiteren Verlauf der Arbeit betrachtet werden.

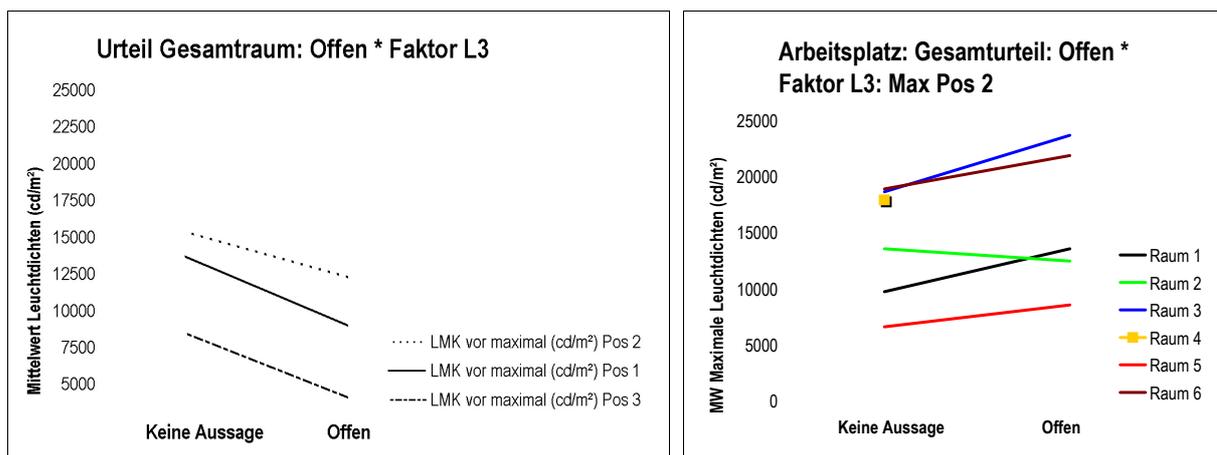


Abbildung 6.2-2: Links: Vergleich der Ergebnisse „offen“ mit Faktor L3; rechts: Raumanalyse Faktor L3 aus Messposition 2

Der gleiche Vergleich wurde im Bezug zu den Leuchtdichtemittelwerten durchgeführt, da vermutet wurde, dass die Raumhelligkeit eine Rolle spielt. Dieser ist jedoch statistisch nicht signifikant. In den Räumen zeigte sich keine einheitliche Tendenz der Raumhelligkeit im Bezug zur Beurteilung „offen“.

Das Urteil „Eingeschlossen“ korreliert signifikant mit der Innenraumtemperatur (Faktor tempi). Je höher die gemessene Innenraumtemperatur desto eher fühlen sich die Probanden eingeschlossen. Insgesamt ist dieser Zusammen-

hang jedoch marginal, die Mittelwerte unterscheiden sich nur um ein zehntel Grad. Abbildung 6.2-3 zeigt den Zusammenhang nach Räumen aufgeschlüsselt.

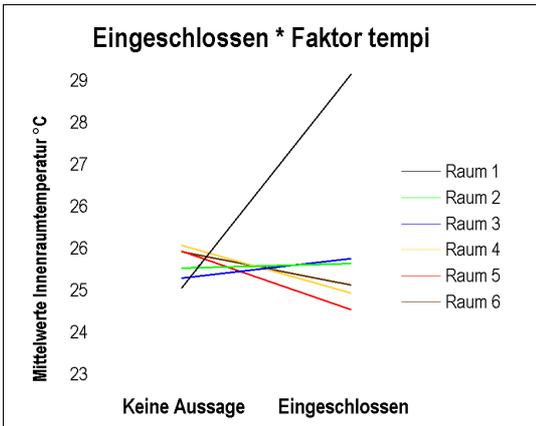


Abbildung 6.2-3: Beurteilung „eingeschlossen“, aufgeschlüsselt nach Raum im Bezug zur Innenraumtemperatur

Insbesondere in Raum 1 zeigt sich bei höheren Temperaturen eine deutliche Tendenz zur Bewertung „eingeschlossen“. Über die Ursachen kann hier nur spekuliert werden. Eine eindeutige Tendenz ist in den Räumen nicht zu erkennen. Das „momentane Wohlbefinden“ sowie die Beurteilung des Arbeitsplatzes zeigen sich unabhängig von den gemessenen Werten.

6.2.3 Innenraumtemperatur

Die gemessene Innenraumtemperatur (Faktor tempi) korreliert mit der Frage nach der Temperaturempfindung, sie ist nicht relevant für die Beurteilung der Systemfunktion (Schutzfunktion). Faktor M1 (Beleuchtungsstärken an der Decke sowie der Arbeitsebene und vertikal an der rückwärtigen Wand) hängt mit der Empfindung der Innenraumtemperatur zusammen, Faktor M2 (Globalstrahlung und Beleuchtungsstärke vertikal vor der Fassade sowie Sonnenlichtquotient am Messpunkt A1) mit der Behinderung durch Hitze. Bei den Farbfaktoren sind hauptsächlich die Farbtemperaturen signifikant. Tabelle 6.2-3 zeigt die Zusammenfassung in der Übersicht.

Tabelle 6.2-3: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Innenraumtemperatur

Faktorenanalyse Kategorie Temperatur											
Kategorie	TEMP	LUX			LMK				Farbe		
	tempi	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4	F1	F2	F3
Temperatur im Raum 1 richtig, 2 zu hoch	+	+								-	
Behinderung durch Hitze 1 nein - 2 ja	+		+		+					-	
Schutz gegen Wärmeeinstrahlung ja - 2 nein					+						+

Die Innenraumtemperaturmittelwerte (Faktor tempi) aufgetragen über den beiden relevanten Fragen der Kategorie finden sich in Abbildung 6.2-4 links, die entsprechende Analyse nach Räumen getrennt beispielhaft für die Bewertung der Innenraumtemperatur in Abbildung 6.2-4 rechts. Beide Fragen zeigen eine deutliche positive Abhängigkeit, das heißt, bei höheren Innenraumtemperaturen wird die Temperatur als „zu hoch“ und die Behinderung aufgrund der höheren Temperatur deutlicher empfunden. Die Bewertung der Schutzfunktion hingegen zeigt sich unabhängig von der Innenraumtemperatur. Die Faktorenanalyse nach Räumen getrennt betrachtet ergibt, hier beispielhaft für die Beurteilung der Raumtemperatur dargestellt, ein gleichmäßiges Bild.

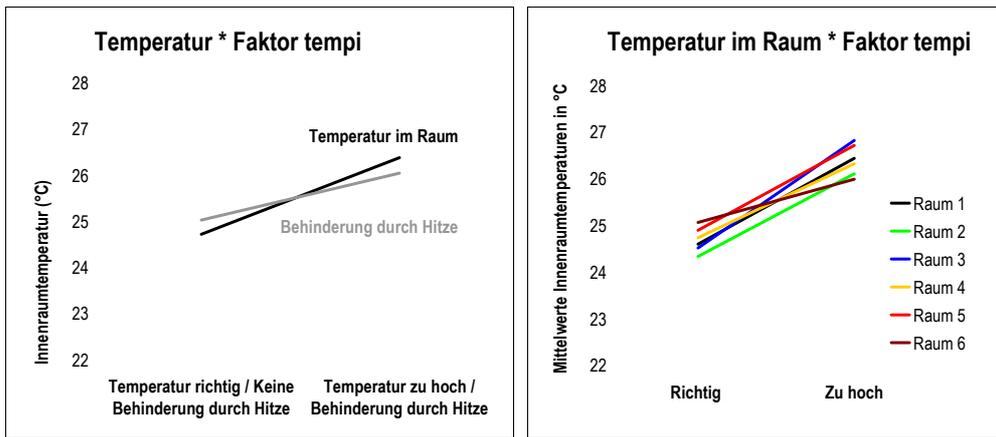


Abbildung 6.2-4: Links: Die Fragen der Kategorie Temperatur in Abhängigkeit der gemessenen Innenraumtemperaturen; rechts: Die Frage nach der Beurteilung der Innenraumtemperatur nach Räumen getrennt

In Raum 6 scheinen die Raumtemperaturen weniger deutlich wahrgenommen zu werden. Bereits in der einfachen Auszählung war dieser Raum am wenigsten kritisch beurteilt worden (Kapitel 5.3.3.3). Raum 2 zeigt eine niedrigere Schwelle, möglicherweise aufgrund höherer Oberflächentemperaturen der Scheiben.

Faktor M1 (Beleuchtungsstärken an der Decke, in der Arbeitsebene und an der rückwärtigen Wand) zeigt einen deutlichen Zusammenhang mit den Beurteilungen der Innenraumtemperaturen (Abbildung 6.2-5 links). Der Rückschluss, dass bei höheren Beleuchtungsstärken mehr Unzufriedenheit mit den Innenraumtemperaturen herrscht, kann jedoch nicht gezogen werden, da bei höheren Außentemperaturen ein entsprechend höheres Beleuchtungs-niveau gemessen wurde (Kapitel 6.2.7). Hier stellt sich die Frage, ob gleiche Innenraumtemperaturen bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken möglicherweise unterschiedlich bewertet werden. Abbildung 6.2-5 (rechts) zeigt die Tendenz der schlechteren Bewertung bei gleichen Raumtemperaturen, aber höheren Beleuchtungsstärken am fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene bei steigender Spreizung auf.

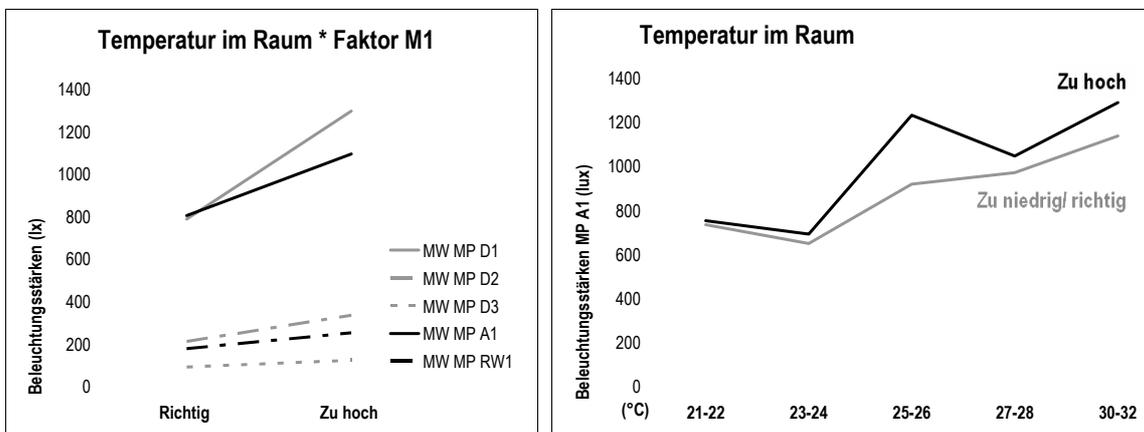


Abbildung 6.2-5: Die Bewertung der Innenraumtemperatur über dem Faktor M1; rechts: Die Beurteilung der Innenraumtemperatur über den Beleuchtungsstärken an MP A1 und nach Raumtemperaturgruppen zusammengefasst

Der Zusammenhang nach Räumen getrennt bewertet stellt sich zum Teil unterschiedlich dar. Ein Grund ist, dass die Fallzahlen zu klein waren, um repräsentative Aussagen machen zu können. Zum anderen werden die Räume aus anderen Gründen unterschiedlich bewertet wie aus den vorangegangenen Auswertungen hervorgegangen ist. Ein signifikanter Zusammenhang besteht bei der „Behinderung durch Hitze“ in Verbindung mit Faktor M2 (Außenbeleuchtungsstärken vertikal und global sowie Sonnenlichtquotient in der Arbeitsebene) (Abbildung 6.2-6). Während die globale und die senkrecht vor der Fassade gemessene Außenbeleuchtungsstärke jeweils positiv abhängig sind, das heißt je höher die Außenbeleuchtungsstärken desto eher fühlen sich die Probanden durch die hohen Innentem-

peraturen gestört, verhält es sich beim Sonnenlichtquotienten am Arbeitsplatz umgekehrt. Je mehr Licht also im Verhältnis zu außen in den Raum hinein trat desto zufriedener waren die Probanden.

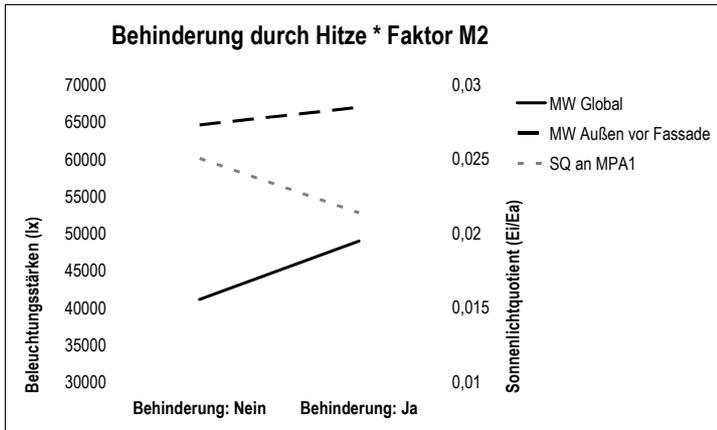


Abbildung 6.2-6: Eine mögliche Behinderung durch Hitze aufgetragen über den Messwerten des Faktors M2

Hierzu wird der Faktor nach Räumen bzw. Systemen getrennt dargestellt (Abbildung 6.2-7). Die Tendenzen sind im Falle der globalen Außenbeleuchtungsstärke in allen Räumen gemäß der Zusammenfassung (links) positiv, bezogen auf die vertikale Beleuchtungsstärke auf der Fassade gibt es Unterschiede in den Räumen (Mitte). Im Falle des Sonnenlichtquotienten zeigen sich bis auf Raum 2 negative Abhängigkeiten (rechts).

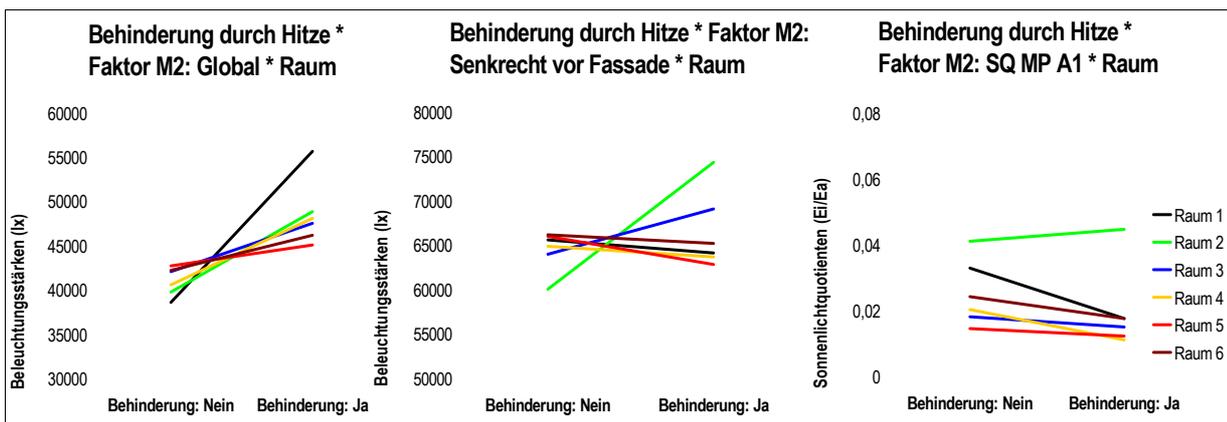


Abbildung 6.2-7: Die Behinderung durch Hitze aufgetragen über: Links: M2 Global; Mitte: M2 Fassadenmesswert; rechts: M2 Sonnenlichtquotient am Messpunkt A1

Bezogen auf den globalen Messwert außen hat Raum 1 die steilste Kurve aufzuweisen; hier spiegelt sich die Funktionsweise des Sonnenschutzsystems wieder, welches insgesamt weniger Schutz vor der Gesamtstrahlung bietet und tendenziell bei sehr hohen Außenwerten negativ beurteilt wird. Im Falle des Messwertes senkrecht vor der Fassade gemessen wird Raum 2 erst bei höchsten Außenbeleuchtungsstärken (damit auch den höchsten Temperaturen) negativ beurteilt. Dies hängt vermutlich mit den höheren gemessenen Oberflächentemperaturen des Glases zusammen. Die Sonnenlichtquotienten sind bis auf Raum 2 alle negativ korreliert, das heißt bei geringeren Sonnenlichtquotienten folgt eine schlechtere Bewertung; System 2 erzeugt insgesamt wesentlich höhere Beleuchtungsstärken im Innenraum, möglicherweise wird dies ab einer gewissen Schwelle bei hohen Innenraumtemperaturen wieder negativ beurteilt.

Faktor F2 bildet den relevanten Anteil an den Farbfaktoren mit den Fragen nach der "Empfindung der Raumtemperatur" und einer „Behinderung durch Hitze“. Er beinhaltet hauptsächlich die Farbtemperaturen. Alle Räume insgesamt betrachtet liefern eine negative Abhängigkeit aller Farbtemperaturen, das heißt, bei geringeren Farbtemperaturen schlechtere Bewertungen (dies entspräche der Kruihof Kurve, Kapitel 1.3.5). Beispielhaft zeigt Abbildung 6.2-8

die Bewertung der Innenraumtemperatur über den Farbtemperaturen nach Räumen getrennt, stellvertretend für die Farbtemperatur in der Arbeitsebene.

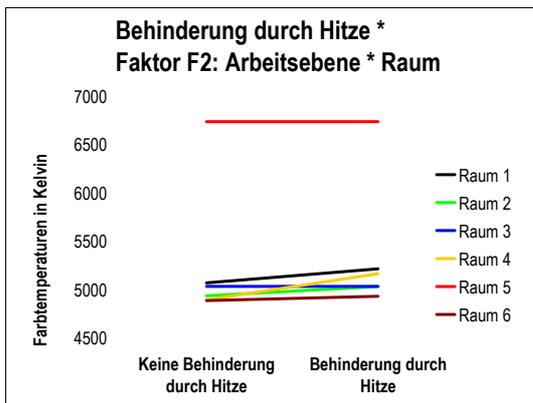


Abbildung 6.2-8: Die Bewertung der Innenraumtemperatur aufgetragen über dem Farbfaktor F2 nach Räumen getrennt

Raum 5 zeigt deutlich die höchsten Farbtemperaturen, jedoch ohne Unterschiede bezogen auf die Bewertung der Innenraumtemperatur. Eine deutliche Tendenz zeigt Raum 4, in dem die höhere Farbtemperatur schlechtere Bewertungen liefert. Eine minimale Tendenz ist auch bei Raum 2 zu erkennen. Ein ähnliches Bild liefert auch die Frage nach der "Behinderung durch zu hohe Raumtemperaturen".

Es stellt sich die Frage, ob gleiche Innenraumtemperaturen bei höheren Farbtemperaturen möglicherweise anders beurteilt werden. Abbildung 6.2-9 (links) zeigt hierzu die Zusammenfassung. Höhere Farbtemperaturen werden im Temperaturbereiche 23 bis 28°C tatsächlich besser bewertet, bei noch höheren Raumtemperaturen ist dies allerdings nicht der Fall. Nach Räumen und Temperaturbereichen aufgeschlüsselt (Abbildung 6.2-9 rechts) zeigt sich, dass Raum 1 und Raum 6 bei niedrigeren und Raum 2 und 4 bei höheren Farbtemperaturen als zu hoch bewertet werden (letztere mit geringeren Unterschieden).

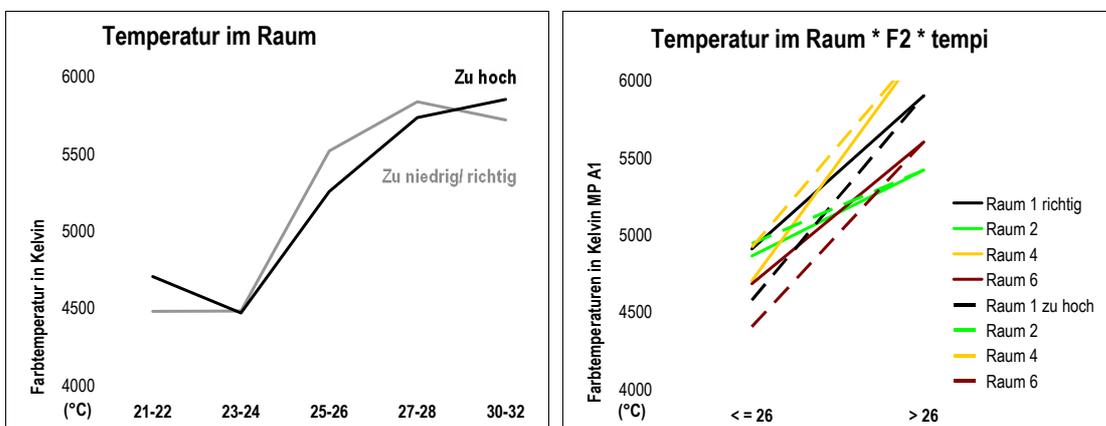


Abbildung 6.2-9: Links: Beurteilung der Innenraumtemperatur über den Farbtemperaturen in der Arbeitsebene und nach Raumtemperaturgruppen zusammengefasst; rechts: Nach Räumen getrennt

Da Farbmessungen nur in geringer Anzahl durchgeführt wurden kann dieser Zusammenhang nur Tendenzen zeigen, die durch eine höhere Anzahl an Messungen geprüft werden müssen.

6.2.4 Ausblick

Bei der Faktorenanalyse waren Leuchtdichte- und Farbmesswerte am häufigsten signifikant. Da die Farbwerte nur vereinzelt gemessen worden sind können diese nur bei Auswertung des Gesamtdatensatzes, die nicht aktiven Systeme eingeschlossen, ausgewertet werden. Da gerade in dieser Kategorie jedoch die geschlossenen Systeme

eine wichtige Rolle für die Bewertung spielen, wird auf die Bewertung der Farbwerte hier verzichtet. Darüber hinaus wird verwiesen auf das Kapitel 6.2.9 (Farb- und Raumwirkung). Eine Frage nach der Wahrnehmung von Witterschwankungen und möglicherweise daraus resultierende Störungen stand in keinem Zusammenhang mit Faktoren. Die signifikanten Faktoren mit der entsprechenden Abhängigkeit in Tabelle 6.2-4 dargestellt.

Tabelle 6.2-4: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für die Kategorie „Aussicht“

Faktorenanalyse Kategorie Aussicht								
Kategorie	TEMP	LUX			LMK			
	tempi	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4
Verminderung d. Ausblicks mit Sonnenschutz 1 nein - 2 ja							+	
Verminderung Ausblick pos/neg 1 pos - 2 neg		+						
Tageslicht durch Sonnenschutz 1 eher nicht eing. - 2 eher eing.								-
Einschränkung 1 Nicht störend - 2 störend						-		-
Ausblick ins Freie 1 eher nicht beschr. - 2 beschr.					-	+	+	
Ausblick ins Freie 1 eher nicht gest. - 2 eher gestört							+	
Ausblick ins Freie 1 eher ausr. - 2 eher nicht ausr.				-	-		+	
Pos. Eigenschaft d. Soschu: ausr. Sicht					+		+	
Neg. Eigenschaft d. Soschu: Sichtverb. nicht ausr.					-		-	

Die „Verminderung des Ausblicks“ zeigt eine negative Abhängigkeit mit dem Faktor L3. Er repräsentiert die maximalen Leuchtdichtewerte, die in Abbildung 6.2-10 (links) zusammenfassend über alle Räume dargestellt sind. Je höher die maximalen Leuchtdichtewerte aus allen drei Messpositionen desto eher wird eine „Verminderung des Ausblicks“ bei geschlossenem Sonnenschutz wahrgenommen.

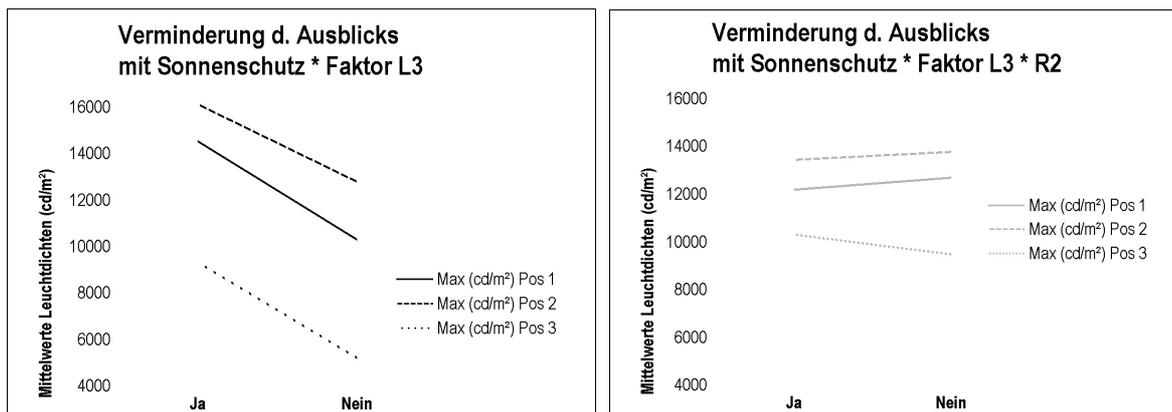


Abbildung 6.2-10: Links: Die Verminderung des Ausblicks im Zusammenhang mit dem signifikanten Faktor L3; rechts: gesondert für Raum 2 dargestellt

In der Realität heißt die, dass diejenigen Systeme, die mehr Aussicht bieten, geringere maximale Leuchtdichten erzeugen und umgekehrt. Raum 2 zeigt innerhalb dieser Abhängigkeit eine positive Tendenz, das heißt, je höher hier die Messwerte aus Position 1 und 2 heraus desto weniger wird die „Verminderung des Ausblicks“ wahrgenommen (Abbildung 6.2-10 rechts). Position 3 repräsentiert die Werte aus dem hinteren Teil des Raumes und verhält sich eher entgegengesetzt.

Die positive oder negative Wahrnehmung der Verminderung des Ausblicks hängt signifikant von Faktor M1 ab, in dem die Deckenbeleuchtungsstärken, die Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene und diejenige an der rückwärtigen Wand enthalten sind. Diese positive Abhängigkeit wird in Abbildung 6.2-11 links gezeigt, alle Messwerte über alle Räume einschließend. Am deutlichsten ist der Zusammenhang am Messpunkt an der Decke in Fensternähe (D1) zu erkennen, der sich auch nach Räumen getrennt, bis auf Raum 1, deutlich darstellt. Mit Ausnahme von Raum 5, der ebenfalls eine deutlich bessere Aussicht aufweist als die Räume mit Jalousiesystemen und bei niedrigeren Beleuchtungsstärken in der Arbeitsebene schlechter bewertet wird (Abbildung 6.2-11 rechts), zeigt sich insgesamt die klare Tendenz dazu, dass höhere Beleuchtungsstärken schlechtere Bewertungen nach sich ziehen.

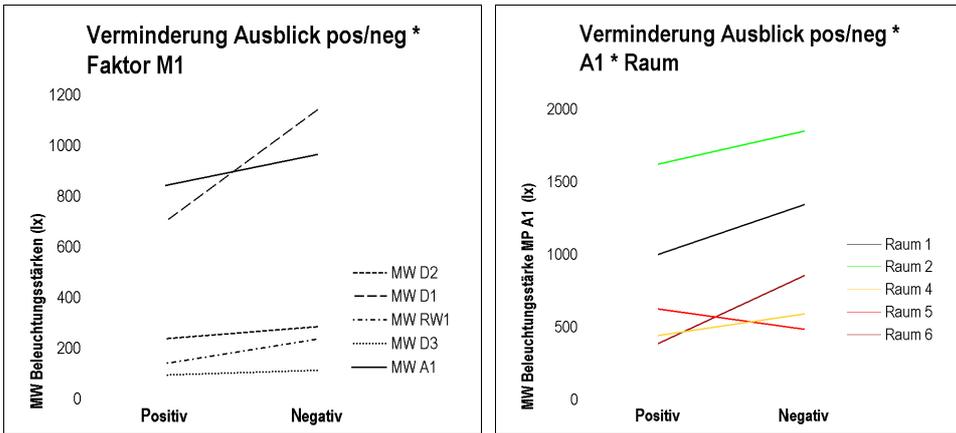


Abbildung 6.2-11: Links: Die Bewertung des verminderten Ausblicks im Zusammenhang mit dem signifikanten Faktor M1; rechts: Nach Räumen getrennt bezogen auf den fensternahen Messpunkt A 1 in der Arbeitsebene

Es stellt sich die Frage, welchen Grund die schlechtere Bewertung bei höheren Beleuchtungsstärken haben mag. Zu diesem Zweck wurden die Sonnenlichtquotienten zum Vergleich herangezogen. Abbildung 6.2-12 zeigt dazu die Vergleiche des fensternahen Messpunktes in der Arbeitsebene (links) und dem vertikalen Messpunkt am Auge im Vergleich zum entsprechenden Sonnenlichtquotienten (rechts).

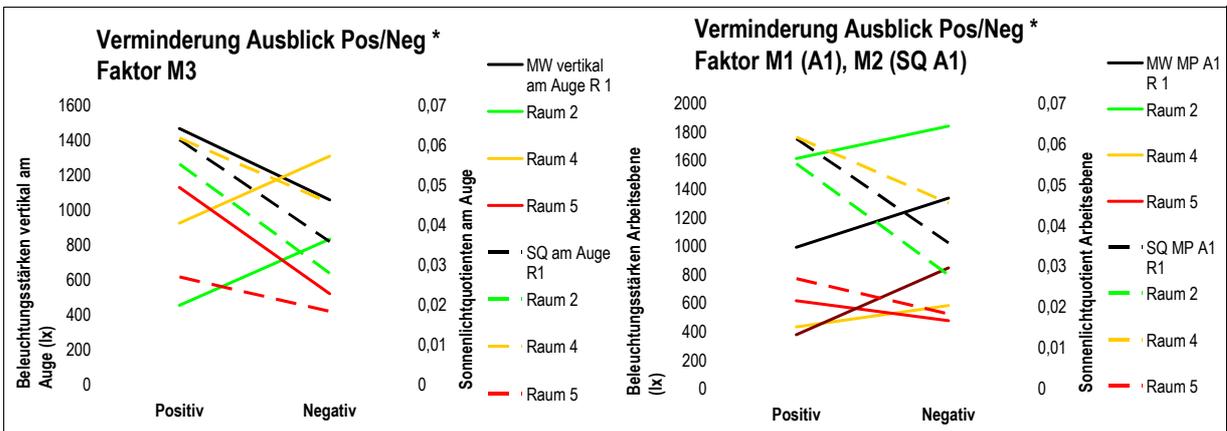


Abbildung 6.2-12: Links: Die Bewertung des verminderten Ausblicks im Zusammenhang mit MP A1 und SQ A1; rechts: Vertikaler Messpunkt am Auge und dazugehöriger Sonnenlichtquotienten

Deutlich zeigt sich, dass die Bewertung der Aussicht in beiden Fällen vom einfallenden Tageslicht bezogen auf die Außenbedingungen vorgenommen wird (Kapitel 2.2.6). Je mehr Licht im Verhältnis in den Raum eintritt, desto weniger kritisch wird die Verminderung der Aussicht bewertet.

Die "Einschränkung des Tageslichtes" ist signifikant abhängig von Faktor L4 (Leuchtdichtewerte während der Befragungen aus Messposition 3 gemessen), dessen Bewertung von L2 (hauptsächlich durch Leuchtdichtemittelwerte repräsentiert) und L4. Abbildung 6.2-13 (links) zeigt die Leuchtdichtemittel- und maximalwerte in ihrem Zusammen-

hang mit der Frage nach der „Einschränkung des Tageslichtes“ auf. Die Bewertung „eingeschränkt“ wurde hier bei geringeren Leuchtdichten gewählt. Nach Räumen getrennt bildet System 1 die einzige gegensätzliche Tendenz. Faktor L2 (Leuchtdichtemittelwerte) wird in Abbildung 6.2-13 (rechts) für Messposition 2 nach Räumen getrennt dargestellt und zeigt eine positive Tendenz, also weniger Störung bei höherer Leuchtdichte.

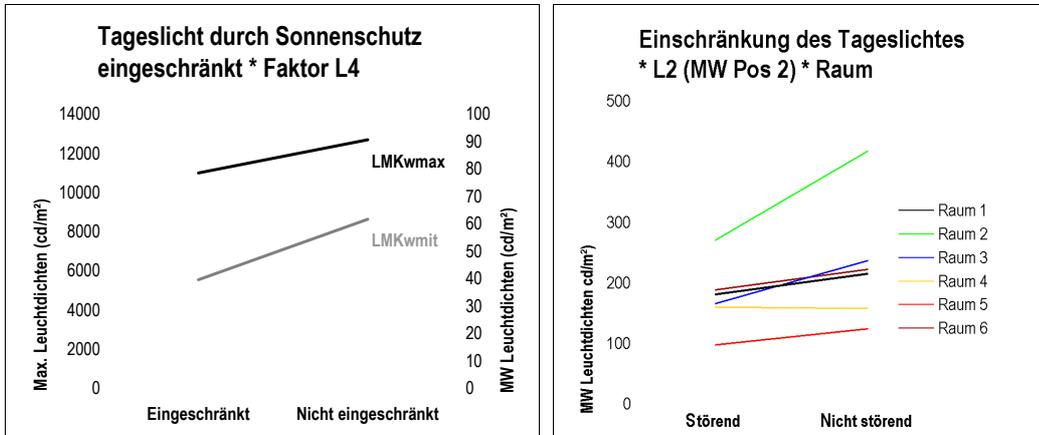


Abbildung 6.2-13: Links: Die Einschränkung des Tageslichtes im Bezug zu Faktor L4; rechts: Raumabhängigkeit der Störung durch die Einschränkung des Tageslichtes (Faktor L2)

Die Bewertung des Ausblicks auf einer Skala von 1-7 mit den Bewertungen (nicht) „beschränkt“, (nicht) „gestört“ oder (nicht) „ausreichend“ wurde in der einfachen Auswertung in ihrer Systemabhängigkeit ausführlich dargestellt. Für die Faktorenanalyse ergibt sich folgendes diverses Bild: Die Beschränkung des Ausblicks zeigt zusammenfassend eher niedrigere Mittel- und Maximalwerte im Zusammenhang mit einer positiven Beurteilung („nicht beschränkt“), ähnlich wie schon bei den anderen Fragen nach der Verminderung des Ausblicks. Wiederum sind diese Aussagen deutlich auf das System bezogen, diejenigen Systeme, die eine gute Aussicht vorweisen, produzieren durch die verringerte Lichttransmission weniger Raumhelligkeit insgesamt.

Zusätzlich zu den Leuchtdichten zeigt sich bei der Frage „Ausblick ins Freie ausreichend - nicht ausreichend“ noch eine Abhängigkeit mit M3 (vertikale Beleuchtungsstärke am Auge und Sonnenlichtquotient, Abbildung 6.2-14).

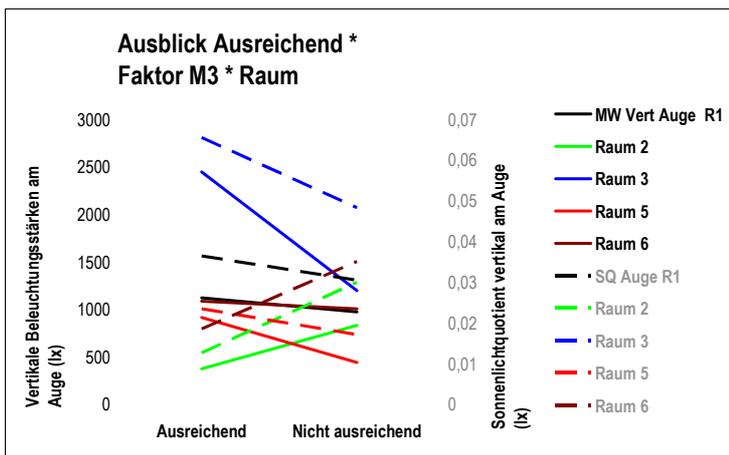


Abbildung 6.2-14: Raumabhängigkeit bei der Bewertung des ausreichenden Ausblicks im Bezug zu Faktor M3

Hier zeigt sich insgesamt eine leichte Tendenz zur negativen Seite, das heißt, je höher die Beleuchtungsstärke am Auge desto eher ist der Ausblick ausreichend. Nach Räumen getrennt zeigt sich hier ein sehr uneinheitliches Bild. Als „ausreichend“ werden meist die höheren vertikalen Messwerte am Auge bewertet. Die einzige Ausnahme bildet Raum 2. Über die Ursachen kann hier nur spekuliert werden. Die positiven und negativen Eigenschaften der Systeme bezogen auf den Ausblick zeigen wie schon diskutiert eine positive Abhängigkeit mit Faktor L3. Das heißt, je

höher die Werte, desto weniger wird die Aussicht als "ausreichend" beschrieben. Zusammenfassend zeigt sich für die Kategorie Aussicht eine klare Tendenz zur Systemabhängigkeit. Außerdem scheint eine fehlende Aussicht zum Teil durch einen helleren Raumeindruck kompensiert werden zu können. Dazu wird auch auf das Kapitel 6.2.7 (Helligkeit) verwiesen.

6.2.5 Blendung

Beinahe alle Faktoren innerhalb der Kategorie Blendung sind bei einer oder mehreren Fragen signifikant abhängig von den Messdaten. Die größte Zahl an signifikanten Zusammenhängen bezogen auf die getesteten Fragen gab es bei dem Faktor M3 (vertikal gemessene Beleuchtungsstärke in Augenhöhe und der dazugehörige Sonnenlichtquotient) sowie L3 (Maximale Leuchtdichtewerte aus den verschiedenen Messpositionen heraus). Darüber hinaus wurden innerhalb dieser Kategorie einige Sonderuntersuchungen durchgeführt, deren Zusammenhänge in Tabelle 6.2-5 in Klammern dargestellt sind. Auf die Bewertung des Faktors L1 und der Farbfaktoren wird verzichtet.

Tabelle 6.2-5: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie „Blendung“

Faktorenanalyse Kategorie Blendung								
Kategorie	TEMP	LUX			LMK			
	tempi	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4
Blendung durch helle Oberflächen 1 eher nie - 2 eher oft				+	+	(+)	(+)	
Wenn Blendung: Wände 0 kein Kreuz - 1 Kreuz				+	+		+	
Wenn Blendung: Sonnenschutz 0 kein Kreuz - 1 Kreuz			(+)	(+)	+		+	
Störende Spiegelungen 1 nein - 2 ja							+	
Störende Spiegelungen 1 eher selten - 2 eher oft							+	
Helle Flächen: zusammengefasst 1 eher n. wahrn.b. - 2 eher unkonf.		(+)	(+)		(-)	(+)	(+)	
Momentan geblendet 1 nein - 2 ja	-			+			+	
Neg. Eigenschaft d. Soschu: Blendung 0 kein Kreuz - 1 Kreuz	-			+			(+)	
Muster/Streifen 1 nein - 2 ja	-	+	+	+	-		+	
Muster/Streifen 1 Eher n. störend - 2 eher stör.	-		(+)			-		

Die Faktorenanalyse zeigt für die Innenraumtemperatur signifikante Zusammenhänge, die sich wie folgt zusammensetzen: Bei den Fragen nach „momentaner Blendung“ zum Zeitpunkt der Befragungen, der „negativen Eigenschaften eines Systems“ (Blendung) sowie bei der Entstehung von „Mustern und Streifen“ bzw. deren Grad an Störung, gibt es jeweils eine negative Abhängigkeit, das heißt, je höher die Innenraumtemperatur desto weniger Störung. Dieser Zusammenhang lässt sich nicht auf die Innenraumtemperatur zurückführen, sondern eher auf die bessere Sonnenschutzwirkung bei steileren Sonnenständen. Interessanter ist in diesem Zusammenhang die Frage, ob bei steigender Innenraumtemperatur der Anteil negativer Bewertungen ansteigt. Abbildung 6.2-15 (links) zeigt, dass Muster oder Streifen bei höheren Innenraumtemperaturen einen höheren Anteil an Störungen ergeben. Dagegen zeigt die Frage nach der direkten Blendung diesen Zusammenhang nicht (Abbildung 6.2-15 rechts).

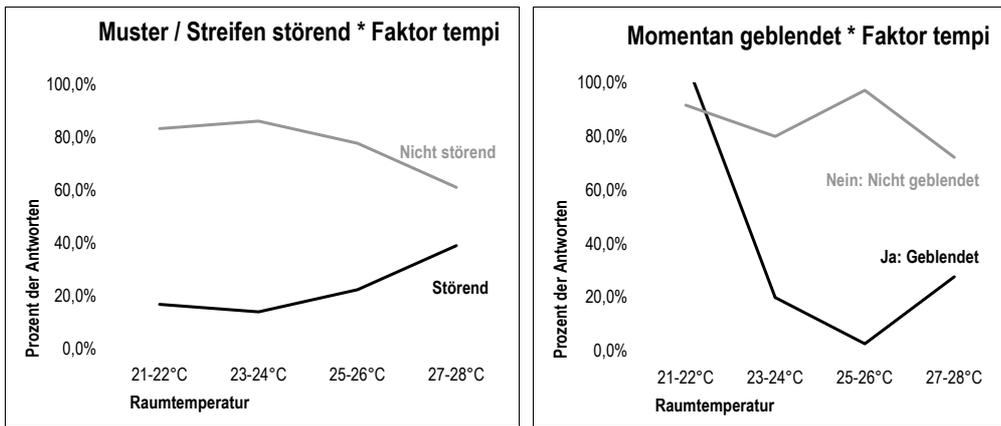


Abbildung 6.2-15: Links: Störende Muster oder Streifen über der Innenraumtemperatur; rechts: Direkte Blendung zum Zeitpunkt der Befragungen über der Innenraumtemperatur

Nach Räumen getrennt betrachtet zeigt sich eine marginale Tendenz abhängig von der Funktion der Systeme, das heißt, Raum 5 zeigt eine positive, bei steigender Temperatur „eher störende“, die anderen Systeme eine negative Tendenz, Raum 1 zeigt sich weitgehend neutral. Ursache hierfür könnte die „sichtbare“ Schutzfunktion der Systeme sein, aber auch die Sonnenhöhe, denn die Innenraumtemperatur steigt bei höherer Solareinstrahlung, das heißt bei höheren Sonnenständen an.

Abbildung 6.2-16 (links) zeigt die Bewertung von hellen Flächen nach „eher wahrnehmbar“ bis „eher unakzeptabel/unkomfortabel“. Insgesamt zeigen sich alle Werte des Faktors negativ abhängig, das heißt, je höher die Werte desto weniger störend. Insbesondere der Messwert an der rückwärtigen Wand (vertikal gemessen) gibt bei allen Räumen die gleiche Tendenz an (Abbildung 6.2-16 rechts). Das heißt, dieser Messwert könnte ein Indiz dafür sein, dass insgesamt hellere Lichtniveaus aufgrund geringerer Kontraste eher keine Störungen hervorrufen.

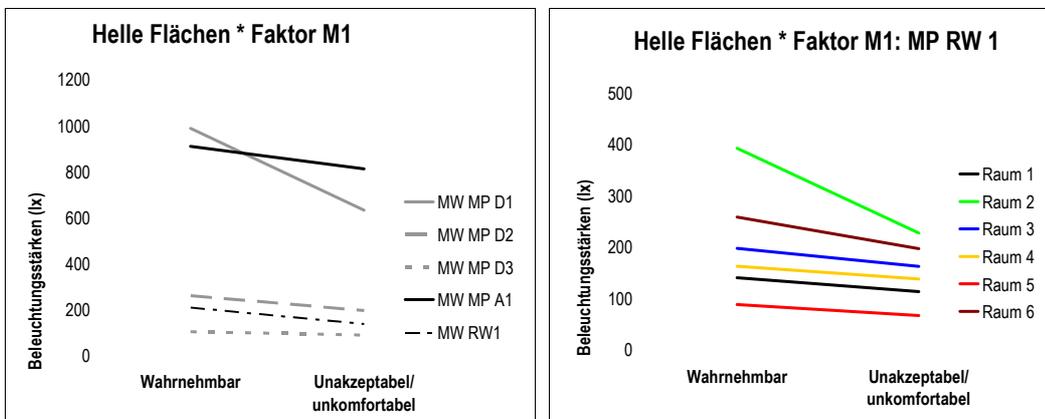


Abbildung 6.2-16: Links: Die Bewertung heller Flächen im Bezug zu Faktor M1; rechts: Raumanalyse im Bezug zu M1 (MP A1)

In Raum 2 zeigt sich im Bezug zum Messpunkt in der Arbeitsebene eine positive Tendenz (nicht dargestellt), das heißt, es werden eher Störungen wahrgenommen, wenn die Arbeitsfläche sehr hell ist; das deckt sich auch mit den Blendursachen aus der einfachen Auszählung nach Raum (Kapitel 5.3.5). Die fensternahe Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene zeigt diese Tendenz nicht in allen Räumen, somit stellt er kein geeignetes Mittel für die Beurteilung von Blendung dar, obwohl er statistisch signifikant ist.

Bei den Faktor M2 (Außenmesswerte und Sonnenlichtquotient in der Arbeitsebene) zeigt die Frage nach auftretenden „Mustern und Streifen“ signifikant, nicht jedoch der Grad an Störung. Hier besteht eine negative Abhängigkeit, das heißt, je höher der Messwert senkrecht vor der Fassade, desto eher gibt es auch Muster oder Streifen im Raum, die sich meist „störend“ auswirken. Nach Räumen getrennt betrachtet ist die Frage im Falle der Beleuch-

tungsstärke vor der Fassade (Abbildung 6.2-17 links) in allen Räumen positiv abhängig. Bezogen auf die globale Beleuchtungsstärke ist dies trotz statistischer Signifikanz nicht der Fall (Abbildung 6.2-17 rechts). Die beiden Sonnenschutzsysteme (Raum 1 und 5) sind positiv abhängig, die Jalousiesysteme negativ.

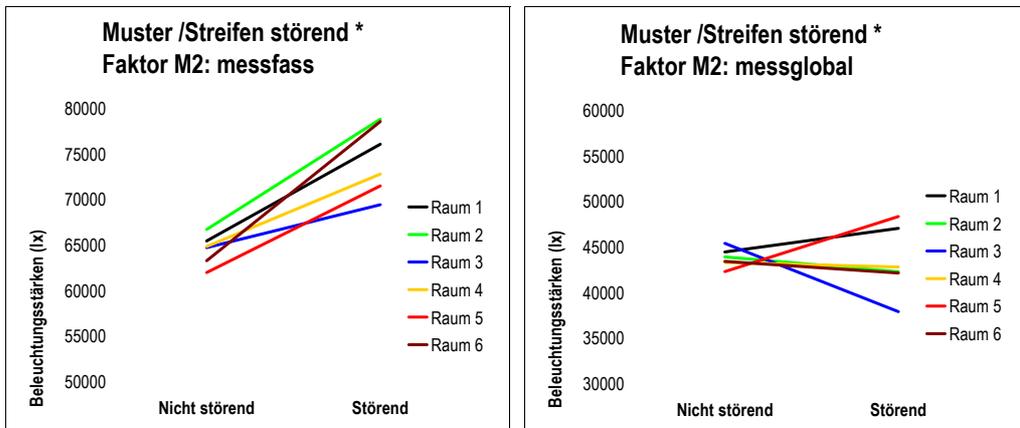


Abbildung 6.2-17: Links: Störende Muster und Streifen im Bezug zur Beleuchtungsstärke auf der Fassade; rechts: im Bezug zur globalen Beleuchtungsstärke (nicht signifikant)

Zusammenfassend heißt dies, dass Störungen durch Tageslichtsysteme in aktivem Zustand und direkter Einstrahlung auf die Fassade aufgrund der vertikalen Beleuchtungsstärken vor der Fassade beurteilt werden kann.

Der Faktor M3 (vertikal in Augenhöhe in Richtung Fenster gemessen sowie der dazugehörige Sonnenlichtquotient) wird bei gut der Hälfte aller subjektiven Beurteilungen als signifikant klassifiziert. Abbildung 6.2-18 zeigt dies am Beispiel der vertikalen Beleuchtungsstärken am Auge stellvertretend für alle relevanten Fragen zum Thema Blendung. Der Faktor ist in allen Fällen positiv abhängig, das heißt, je höher der Messwert bzw. der Sonnenlichtquotient desto eher werden negative Urteile zum Thema Blendung abgegeben (Blendung direkt, die Häufigkeit sowie das Auftreten von Mustern oder Streifen).

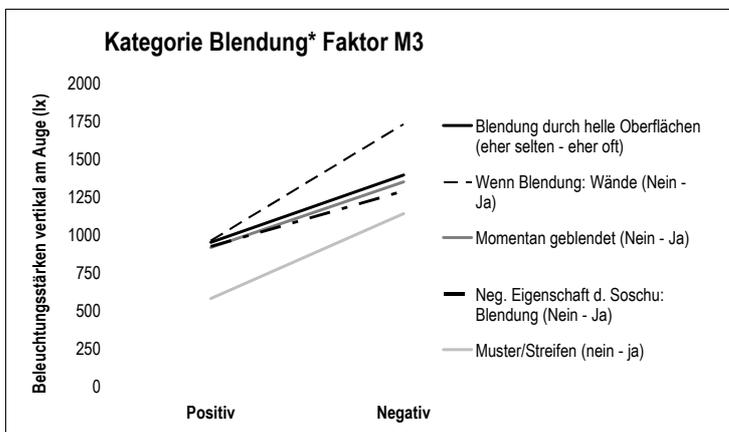


Abbildung 6.2-18: Die Fragen der Kategorie Blendung im Bezug zu Faktor M3

Obwohl die Gesamttendenz bezüglich der Abhängigkeit der Fragenkategorie Blendung im Bezug zu Faktor M2 insgesamt signifikant ist, gibt es in Einzelräumen zum Teil Abweichung, die im Folgenden dargestellt werden:

Die Häufigkeit der "Blendung durch helle Oberflächen" steigt bei allen Räumen mit den steigenden vertikalen Beleuchtungsstärken an. Zum Zeitpunkt der Befragungen direkt geblendet wurden die Probanden ebenfalls eher bei steigenden Beleuchtungsstärken, mit Ausnahme von Raum 2, begründet möglicherweise in dem höheren Gesamtbeleuchtungsniveau des Raumes (Abbildung 6.2-19 links). Die negativen Eigenschaften von Sonnenschutzsystemen „blendet“ wurden ebenfalls bei steigenden Beleuchtungsstärken eher angekreuzt, in Raum 6 mit der deutlichen

ten Steigung und mit Ausnahme der Bewertung in Raum 2. „Muster oder Streifen“ zeigen in allen Räumen eine positive Abhängigkeit, das heißt, je höher die Werte desto eher gibt es „Muster oder Streifen“ (Abbildung 6.2-19 rechts), aber je geringer die Werte desto eher wird dies als „störend“ empfunden (Ausnahme Raum 4).

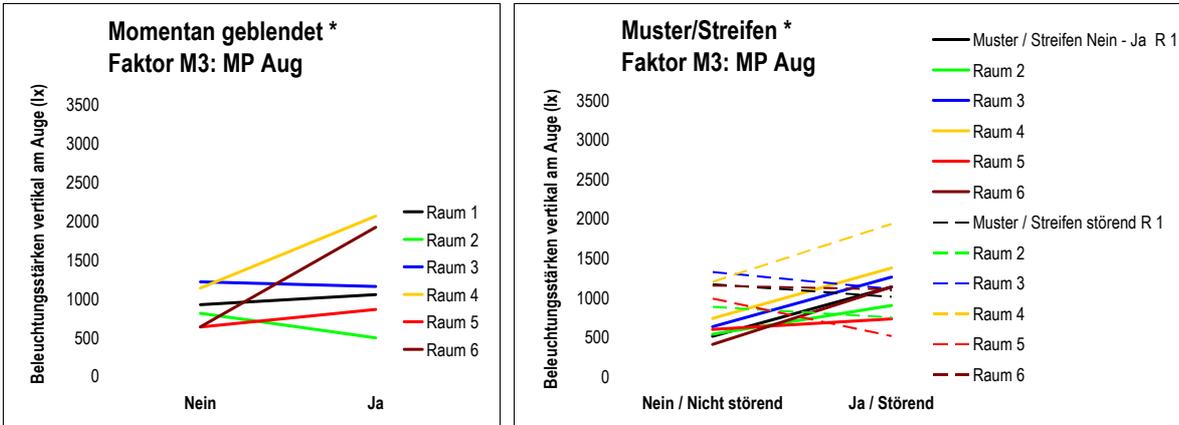


Abbildung 6.2-19: Links: Vertikaler Messpunkt am Auge im Bezug zu momentaner Blendung; rechts: Auftretenden Mustern/ Streifen und deren Grad an Störung

Es stellt sich die Frage ob gleiche vertikale Beleuchtungsstärken in Augenhöhe in den Räumen gleich bewertet werden, ob dieser Wert also tatsächlich die Ursache ist für Blendung ist, oder ob möglicherweise andere systembezogene Einflüsse zu einer Blendung beitragen. Abbildung 6.2-20 zeigt eine genaueren Analyse der Antworten und fasst die Beleuchtungsstärken am Auge in Fünfhunderterschritten zusammen. Gezeigt wird der prozentuale Anteil an Antworten „Ja, Blendung“ oder „Nein, keine Blendung“.

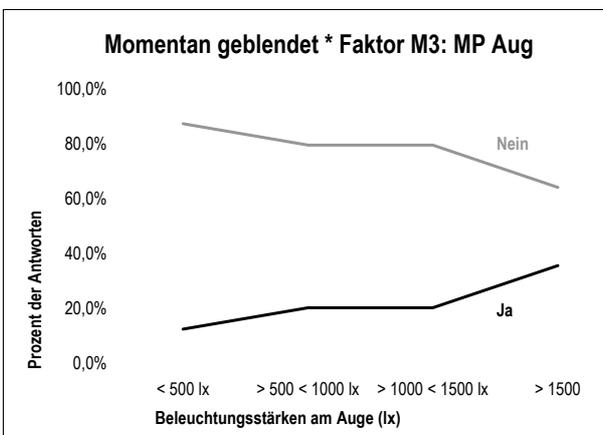


Abbildung 6.2-20: Momentan empfundene Blendung in der Überschreitung der Messwerten vertikal am Auge

Die kritischen vertikalen Beleuchtungsstärken wären demnach ab 1500 Lux aufwärts. Eine genauere Bewertung ist aufgrund der geringen Fallzahlen im Bereich über 2000 Lux kaum möglich.

Faktor L2 mit u.a. den Leuchtdichtemittelwerten ist in einem Fall signifikant, und zwar bei der Störung durch entstehende Muster oder Streifen. Dieser zeigt leicht fallende Tendenzen, das heißt, je geringer die mittleren Leuchtdichten, desto weniger Störung. Interessanter in diesem Zusammenhang sind die maximalen Leuchtdichtewerte (Faktor L3), die bei ca. 60% der Fragen signifikant getestet wurden. Bei den maximalen Leuchtdichtewerten sind alle relevanten Fragen mit Ausnahme der „Störenden Spiegelungen“ (Nein – Ja) und der Beurteilung der „Hellen Flächen“ (nicht wahrnehmbar bis unakzeptabel) positiv abhängig, das heißt, je höher die Werte desto eher tritt Blendung auf. Die Zusammenfassung stellvertretend für Messposition 2 wird in Abbildung 6.2-21 links dargestellt. Die Einzige Ausnahme bildet die Störung durch eventuell auftretende Muster oder Streifen, die sich, wie auch bezogen auf andere Messwerte, eine leicht negative Tendenz darstellt. Die Frage nach der momentanen Blendung wurde noch

einmal für alle drei Messpositionen aufgetragen (Abbildung 6.2-21 rechts), naturgemäß zeigt Messposition 3 die geringsten Tendenzen, da von der rückwärtigen Wand aufgenommen.

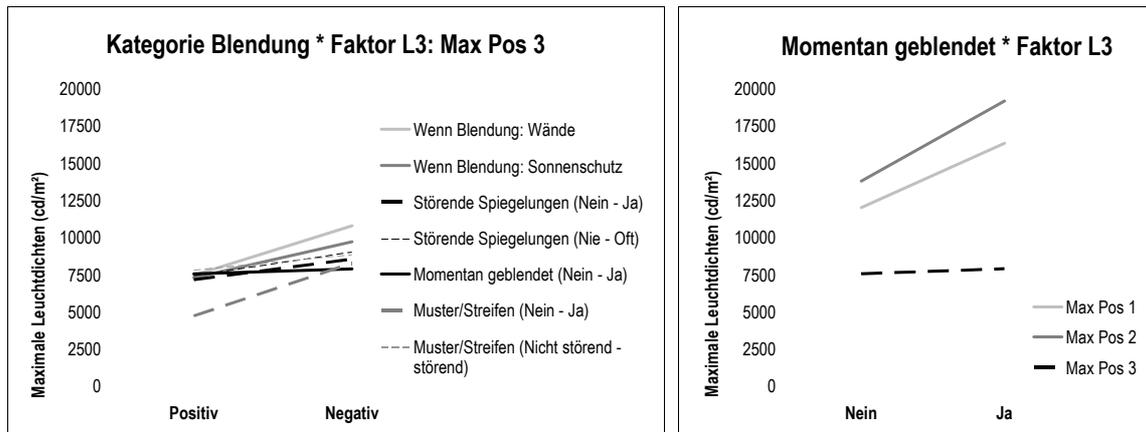


Abbildung 6.2-21: Links: Kategorie Blendung über Faktor L3; rechts: Momentane Blendung über allen drei Messpositionen

Für die genauere Analyse nach Räumen getrennt wird die direkte Frage nach Blendung, der Blendursache (hier Sonnenschutz, da am häufigsten genannt) und den störenden Spiegelungen herangezogen (Abbildung 6.2-22).

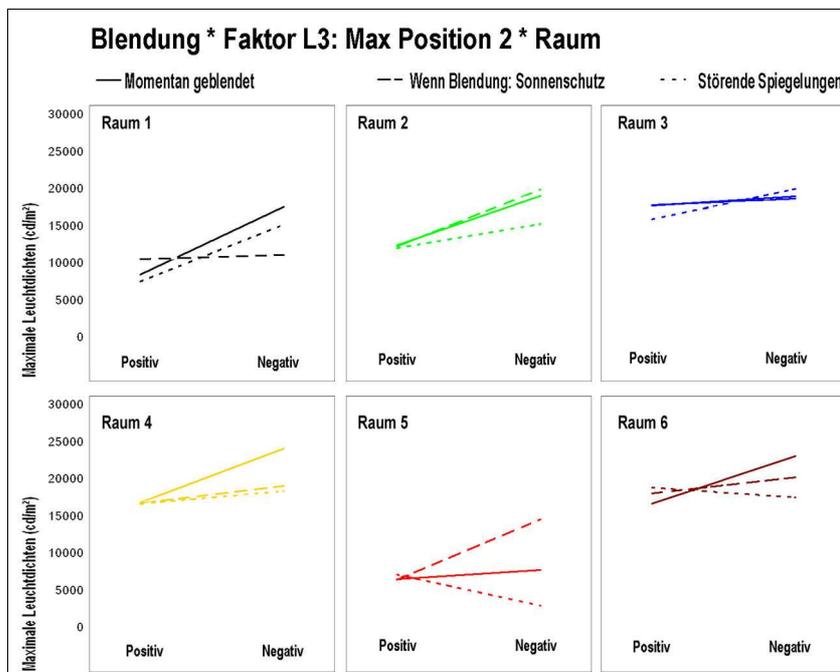


Abbildung 6.2-22: Raumcharakteristik zum Thema Blendung über dem Faktor L3, Messposition 2

Die Antworten der ersten beiden Fragen verhalten sich in ihren Zusammenhängen mit der maximalen Leuchtdichte ähnlich. In Raum 1 ist bei der Blendung durch Sonnenschutz keine nennenswerte Tendenz zu erkennen, während bei der direkten Frage nach Blendung sowie bei den „störenden Spiegelungen“ ein deutlicher positiver Zusammenhang besteht. Raum 5 zeigt im Falle der Spiegelungen negative Abhängigkeiten, das heißt, Störungen treten sogar bei geringeren maximalen Leuchtdichten auf. Die Ursache hierfür wird in den flacheren Sonnenständen zu suchen sein, denn elektrochromes Glas weist seine volle Sonnenschutzfunktion bei steilen Sonnenständen auf. Die „hellen Flächen“ werden insgesamt aus Messposition 2 heraus mit einer leichten positiven Abhängigkeit, aus den anderen Messpositionen heraus mit negativen Abhängigkeiten bewertet. Nach Räumen getrennt bewertet zeigt sich keine einheitliche Tendenz. Die Beurteilung der hellen Flächen lässt sich mit diesem signifikanten Zusammenhang also nicht beschreiben.

Eine Gesamtaussage zu den maximalen Leuchtdichtewerten und deren Beurteilung ist bisher schwierig, weil in den Räumen meist sehr unterschiedliche Ergebnisse auftreten. Zu diesem Punkt werden gesonderte Untersuchungen durchgeführt. Interessant scheint die Frage, wie hoch der Prozentsatz an Störungen durch Blendung bei welchen Leuchtdichten ist. Dazu wird in Abbildung 6.2-23 (links) der Verteilung der Beurteilungen „Momentan geblendet“ in 2000er Schritten dargestellt. Die Überschreitung bestimmter Leuchtdichten und die daraus resultierenden aufsummierten Prozentsätze an durch Blendung gestörten Personen zeigt Abbildung 6.2-23 (rechts).

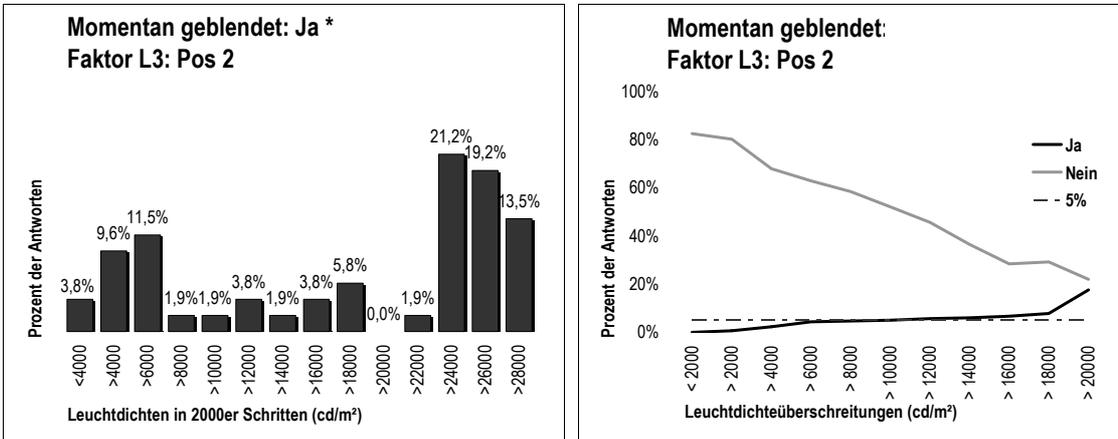


Abbildung 6.2-23: Links: Verteilung der Blendung auf Leuchtdichtewerte; rechts: Leuchtdichteüberschreitung und summarische Zusammenfassung der geblendeten Personen in Prozent

Bis zu einem Wert von 4000 cd/m² maximale Leuchtdichte aus Messposition 2 heraus gemessen fühlen sich nur 3,8% der Probanden geblendet (bezogen auf die Gruppe der geblendeten Personen). Bei genauerem Hinsehen in den Leuchtdichtebereichen oberhalb stellt man fest, dass die weitaus höchste Anzahl an Blendungen erst bei Werten über 24000 cd/m² auftritt. Setzt man eine 5%- Hürde für einen akzeptablen Anteil an geblendeten Personen, so liegt die maximale Leuchtdichte bei bis zu 8 000 cd/m² (bezogen auf alle Befragungen).

6.2.6 Funktion

Die für die Bedienbarkeit und Funktion der Systeme relevanten Fragen sind in Tabelle 6.2-6 dargestellt.

Tabelle 6.2-6: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Bedienbarkeit und Funktion

Faktorenanalyse Kategorie Funktion								
Kategorie	TEMP	LUX			LMK			
	tempi	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4
Sonnenschutz momentan gut? 1 eher gut - 2 eher schlecht		+		(+)	+		(+)	
Weiterer Schutz notwendig 1 nein - 2 ja				+	+		(+)	
System starr oder flexibel 1 flexibel - 2 starr							-	
Wenn starr 1 nicht störend - 2 störend								
Eingriffsmöglichkeit 1 nicht wichtig - 2 wichtig				(+)	+		(+)	

So zeichnen sich die Innenraumtemperatur, die Außenbeleuchtungsstärken (M2), die mittleren Leuchtdichten (L2) und die Werte während der Befragungen (L4) als statistisch irrelevant für die Bewertung. Zum Teil wurden zusätzliche Auswertungen, insbesondere für die Beleuchtungsstärkemesswerte, aber auch in einem Fall für die Innenraumtemperatur durchgeführt. Die Farbfaktoren werden in diesem Zusammenhang nicht weiter betrachtet.

Die Innentemperatur (Faktor temp*i*) zeigt sich positiv abhängig von der Beurteilung der Sonnenschutzwirkung, das heißt, je höher die Innenraumtemperatur, desto schlechter die Bewertung der Schutzwirkung; der Zusammenhang ist jedoch nicht signifikant. Dies liegt in der großen Streubreite der Bewertungen begründet. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Frage nach der Notwendigkeit eines zusätzlichen Schutzes. Diese Frage scheint eher beeinflusst zu sein von lichttechnischen Werten als von der Innenraumtemperatur selbst.

Faktor M1 (Messpunkte an der Decke, in der Arbeitsebene und an der rückwärtigen Wand) ist für die Frage nach der Schutzfunktion hingegen signifikant. Hier jedoch zeigten sich bei der Betrachtung nach Räumen in allen Fällen Ausreißer, meist in Raum 4 und 1, die sich entsprechend entgegengesetzt verhielten. Im Allgemeinen wurden höhere Werte hinsichtlich der Schutzfunktion eher schlechter bewertet. Die Beurteilung der Eingriffsmöglichkeiten ist im Bezug zu Faktor M1 deutlicher, jedoch nicht signifikant. Je höher die Beleuchtungsstärken im Innenraum, desto unwichtiger werden die Eingriffsmöglichkeiten beurteilt. Die einzige Ausnahme bildet die Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene am fensternahen Messpunkt, bei dem sich der Effekt umkehrt. Insgesamt heißt dies, dass grundsätzlich höhere Messwerte zu geringerem Wunsch nach Eingriffsmöglichkeiten führen, umgekehrt ein höherer Messwert am Arbeitsplatz eher dazu führt, dass Eingriffsmöglichkeiten als "wichtig" erachtet werden.

Faktor M2 war in keinem Fall signifikant. Dennoch gibt es eine tendenzielle Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke vertikal vor der Fassade gemessen mit der Bewertung des Sonnenschutzes. Je höher die Außenbeleuchtungsstärken vor der Fassade desto eher wird das Urteil „Sonnenschutz momentan eher schlecht“ abgegeben.

Faktor M3, der die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge beinhaltet, ist bei der Frage nach zusätzlichem Schutz signifikant. Der Zusammenhang zeigt sich sowohl bezogen auf den direkten Messwert als auch auf den dazugehörigen Sonnenlichtquotienten. Bei Mittelwerten um 1000 Lux wird kein zusätzlicher Schutz gefordert, bei Werten um 1300 Lux schon (Abbildung 6.2-24 links). Die Analyse nach Räumen getrennt zeigt den Einfluss des Systems 6 auf, das hohe vertikale Beleuchtungsstärken erzeugt und mit dem Wunsch nach weiterem Schutz verbindet.

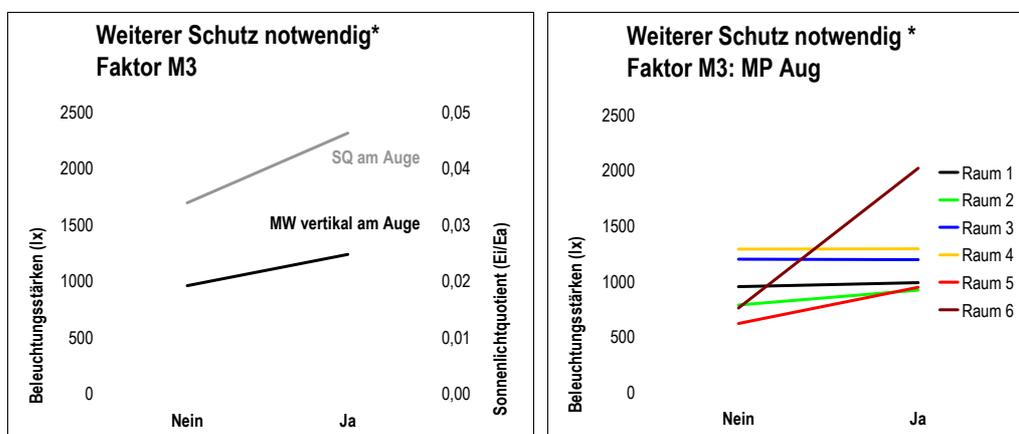


Abbildung 6.2-24: Links: „Weiterer Schutz“ über Faktor M3; rechts: Raumanalyse bezogen auf vertikalen Messpunkt am Auge

Bei den Leuchtdichtefaktoren zeichneten sich die Maximalwerte (L3) signifikant. Dieser wurde bezogen auf die Flexibilität eines Systems positiv getestet, das heißt, je höher der Maximalwert, desto eher wurde ein System als flexibel bezeichnet. Da dieser spezielle Zusammenhang lediglich die Funktionsweise der Systeme widerspiegelt, wird dieser Faktor nicht weiter analysiert. Interessanter ist die Frage nach den maximalen Leuchtdichtewerten (L3) im Bezug auf die Schutzfunktionen. Er zeigt einen tendenzielle Zusammenhang auf, ebenso wie die Wichtigkeit der Eingriffsmöglichkeiten (Abbildung 6.2-25 links). Bei der Betrachtung der Einzelräume zeigt die Frage nach weiteren Schutzmöglichkeiten positive Zusammenhänge mit dem Maximalwert aus Position 2 heraus, mit Ausnahme der Räume 1 und 5, die die Sonnenschutzsysteme repräsentieren. Hier verlangen niedrigere Werte eine höhere Schutz-

funktion. Ursache können niedrige Sonnenstände und damit verbundene direkte Sonneneinstrahlung sein (Abbildung 6.2-25 rechts).

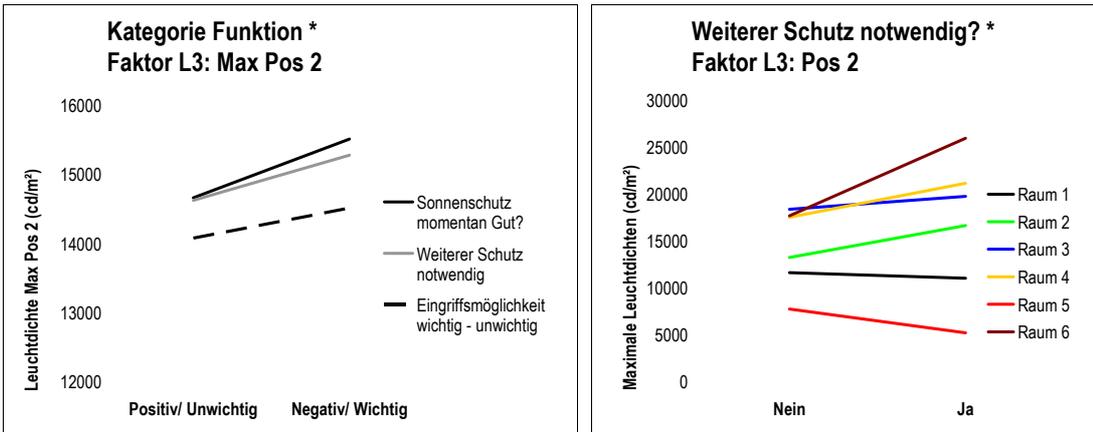


Abbildung 6.2-25: Links: Kategorie Funktion im Bezug zu Faktor L3; rechts: Raumanalyse der Schutzfunktion im Bezug zu L3

6.2.7 Raumhelligkeit

Die Faktorenanalyse in der Kategorie Helligkeit zeigt die gemessene Innenraumtemperatur (temp_i), die Beleuchtungsstärken global und senkrecht vor der Fassade gemessen und der Sonnenlichtquotienten in der Arbeitsebene (M2) signifikant; darüber hinaus die Leuchtdichtemittelwerte (L2, gemessen kurz vor den Befragungen) und die Leuchtdichten, die während der Befragungen gemessen wurden (L4). Zusätzliche Auswertungen zu den Beleuchtungsstärken zeigen Abhängigkeiten mit M1 (Deckenmesspunkte, rückwärtige Wand und Arbeitsebene) und M3 (Vertikal gemessene Beleuchtungsstärken am Auge und der dazugehörige Sonnenlichtquotient); diese wurden in Klammern dargestellt. Dass diese Faktoren innerhalb der Faktorenanalyse als nicht signifikant gewertet wurden, liegt zum einen daran, dass andere Messgrößen möglicherweise aussagekräftiger waren, also eine höhere Gewichtung aufwiesen, und zum anderen, dass die Zusammenhänge in den Einzelräumen möglicherweise nicht konsistent waren oder aber die Streubreite zu groß war. Tabelle 6.2-7 zeigt die Ergebnisse zusammenfassend.

Tabelle 6.2-7: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Helligkeit

Faktorenanalyse Kategorie Helligkeit												
Kategorie	TEMP	LUX			LMK				Farbe			
	temp _i	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4	F1	F2	F3	
Zuschalten Kunstlicht gewünscht 1 nein- 2 ja	+	(-)	-			-						
Wirkung Tageslicht 1 eher dunkel - 2 eher hell		+	+	+				+				
Urteil Gesamttraum: Dunkel 0 kein Kreuz - 1 Kreuz	+		-			-		-			+	
Urteil Gesamttraum: Hell 0 kein Kreuz - 1 Kreuz		+	+	(+)								
Urteil Gesamttraum: Grell 0 kein Kreuz - 1 Kreuz							(+)					
Tageslicht ausreichend am AP 1 eher nicht - 2 eher schon		(+)	+	(+)				+				
Pos. Eigenschaft d. SS: ausr. Helligkeit 0 kein Kreuz - 1 Kreuz	-		+			+		+				
Verminderung des TL durch SS 1 eher nicht - 2 eher vorhanden	-		+		-		+	-				
Verminderung 1 eher nicht stör. - 2 eher stör.						-		-	(-)			

Die Innenraumtemperatur wird in diesem Zusammenhang als eher irrelevant angesehen, da es keine unterschiedlichen gemessenen Raumtemperaturen gab (eine thermische Trennung der Räume war nicht möglich). Insgesamt wird die Helligkeit im Raum mit steigender Innenraumtemperatur eher als positiv, das heißt als hell oder ausreichend beurteilt, bei sinkender Raumtemperatur als eher dunkel oder nicht ausreichend (Abbildung 6.2-26). Der Grund liegt in der geringeren tatsächlichen Raumhelligkeit bei geringeren Innenraumtemperaturen.

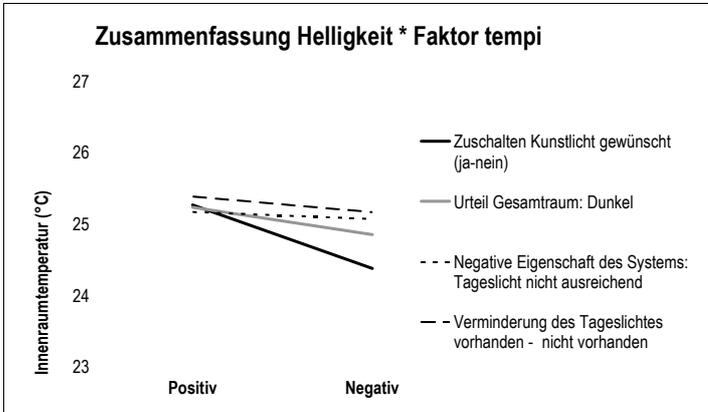


Abbildung 6.2-26: Zusammenfassung der signifikanten Fragen bezogen auf Faktor temp

Die Innenraumtemperatur ist also nicht die Ursache für die bessere Bewertung der Raumhelligkeit bei höheren Temperaturen, vielmehr die Begleiterscheinung, dass die gemessenen Beleuchtungsstärken bei steigenden Innenraumtemperaturen höher waren. In diesem Zusammenhang wird auch auf Kapitel 6.2.3 verwiesen.

Der Faktor M1 (Deckenmesspunkte sowie Arbeitsebene und vertikale Beleuchtungsstärke von der rückwärtigen Wand) zeigt sich bezogen auf die Raumwirkung positiv signifikant, das heißt, je höher die Beleuchtungsstärken im Innenraum desto eher wird der Raum mit „hell“ beurteilt. Die Raumwirkung (Zusammenfassung der 7 Skalenpunkte dunkel - hell) wird in Abbildung 6.2-27 (links) stellvertretend dargestellt. Sowohl der Deckenmesspunkt als auch der Messpunkt in der Arbeitsebene in Fensternähe werden bei Betrachtung aller Räume erst ab deutlich über 500 Lux als „hell“ bewertet. Bei der Betrachtung der Einzelräume sind abweichende Ergebnisse erkennbar, hier hat Raum 2 die steilste Kurve aufzuweisen mit Bewertungen ab dem Skalenpunkt 3 aufwärts (Abbildung 6.2-27 rechts). Raum 5 zeigt eine von der Beleuchtungsstärke fast unabhängige Bewertung.

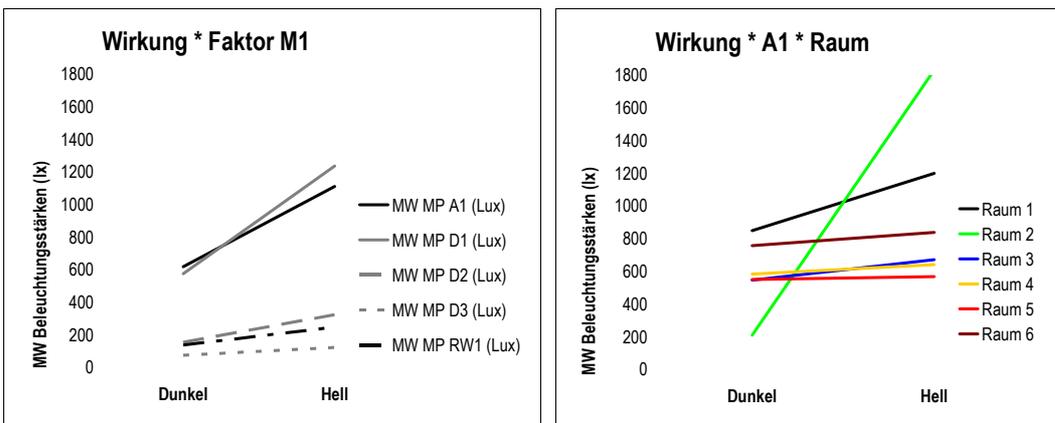


Abbildung 6.2-27: Links: Raumwirkung und signifikanter Faktor M1, rechts: Raumwirkung bezogen auf den fensternen Messpunkt in der Arbeitsebene nach Räumen getrennt

Der gleiche Effekt zeigt sich, wenn man nach der notwendigen oder ausreichenden Helligkeit fragt. Abbildung 6.2-28 (links) zeigt diesen Zusammenhang mit dem Faktor M1 (nicht signifikant). Auch hier lässt sich deutlich erkennen, dass über alle Räume hinweg erst eine Beleuchtungsstärke um etwa 1000 lx im Mittel als „eher ausreichend“ emp-

funden wurde (bei einer Zusammenfassung der Skalenwerte 1 - 3: eher nicht bis 5 - 7: eher schon). Bei der Betrachtung nach Einzelräumen fällt auf, dass sich in Raum 6 als einziger eine negative Tendenz zeigt (Abbildung 6.2-28 rechts). System 2 produziert insgesamt wesentlich höhere Beleuchtungsstärken, der Raum wird aus diesem Grund möglicherweise auf einem höheren Niveau beurteilt. Insgesamt werden aber erst Beleuchtungsstärken oberhalb 500 lx im Mittel als „eher ausreichend“ empfunden.

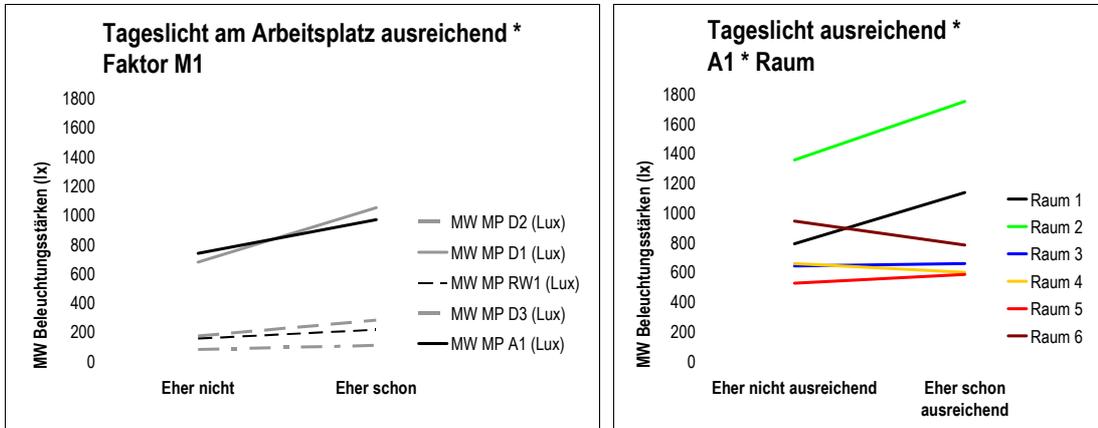


Abbildung 6.2-28: Links: Ausreichendes Tageslicht am Arbeitsplatz über Faktor M1; rechts: Nach Räumen getrennt

Insgesamt wird deutlich, dass die Beurteilung der Helligkeit eindeutig von der tatsächlich vorhandenen Beleuchtungsstärke abhängt. Ob die horizontale Beleuchtungsstärke das beste Maß darstellt, um diese Fragen zu bewerten, zeigt sich in der folgenden Auswertung. Der Faktor M2 beinhaltet die Außenbeleuchtungsstärken global und vertikal vor der Fassade gemessen sowie den Sonnenlichtquotienten bezogen auf die Arbeitsebene. Die beiden Außenmessungen weisen den gleichen Charakter auf die Antworten bezogen auf, somit wird in Abbildung 6.2-29 stellvertretend die globale Außenbeleuchtungsstärke dargestellt. Die Werte senkrecht zur Fassade gemessen sind naturgemäß entsprechend höher (Südwestseite) und zeigen daher einen steileren Bezug.

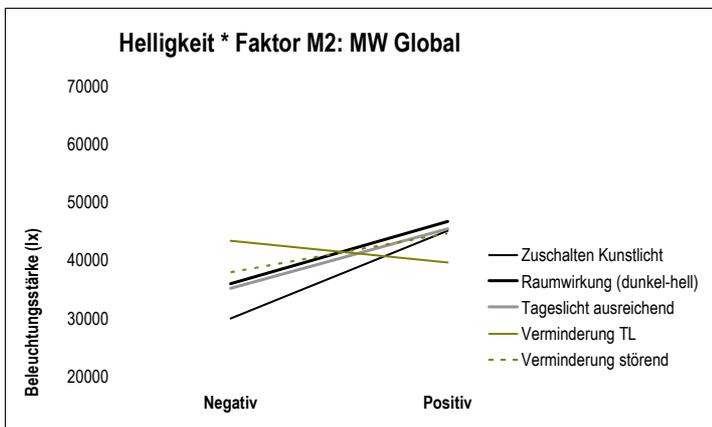


Abbildung 6.2-29: Die globale Außenbeleuchtungsstärke stellvertretend für den Faktor M2

Grundsätzlich sind alle Fragen positiv abhängig (Zuschalten Kunstlicht, Raumwirkung, ausreichendes Tageslicht und die störende Verminderung des Tageslichtes), das heißt, je höher die Außenwerte, desto „heller“, „eher ausreichend“ etc. wird der Raum beurteilt. Die einzige Ausnahme bildet die Frage nach der „Verminderung des Tageslichtes“ durch das geschlossene Sonnenschutzsystem, die sich entgegengesetzt verhält (grüne Linie). Die „Störung durch die Verminderung“ wurde nicht als signifikant gewertet; sie wurde als Zusatzinformation jedoch in die Grafik integriert. Bei der „Verminderung des Tageslichtes“ und der dazugehörigen Störung zeigt sich bei höheren Außenbeleuchtungsstärken eine deutlichere Wahrnehmung der Verminderung, diese wirkt sich jedoch weniger „störend“ aus als bei niedrigeren Außenbeleuchtungsstärken.

Betrachtet man die Analyse der global gemessenen Außenbeleuchtungsstärke nach Räumen getrennt (Abbildung 6.2-30 links) so zeichnet sich die Tendenz zur negativen Korrelation (größere Störung bei höheren Außenwerten) einzig in Raum 1, der eine bessere Aussicht bietet, aber auch eher Probleme mit störenden Reflexen aufweist (Kapitel 5.3.5.3). In allen anderen Räumen zeigt sich insgesamt eine positive Korrelation, also bei höheren Außenwerten weniger Störung, allerdings auf sehr unterschiedlichem Niveau. Unterscheidet man die Wirkung der Raumhelligkeit nach Räumen getrennt (Abbildung 6.2-30 rechts), so stellt sich der Bezug in Raum 2 am steilsten dar, dessen Bewertung bei Skalenpunkt 3 (auf einer Skala von 1-7) erst anfängt.

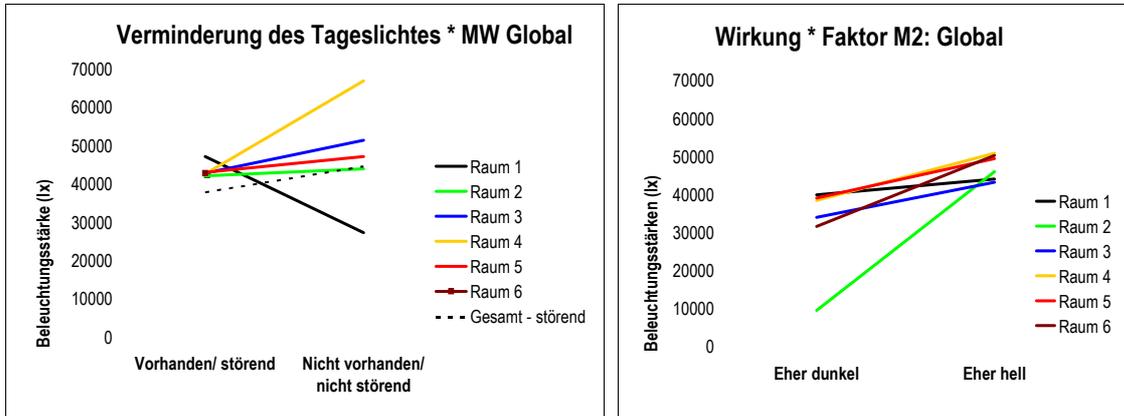


Abbildung 6.2-30: Links: Verminderung des Tageslichtes im Bezug zur globalen Außenbeleuchtungsstärke nach Räumen getrennt; rechts: Die Raumwirkung im Vergleich zur globalen Außenbeleuchtungsstärke (Faktor M2)

Der Faktor M3 beinhaltet den vertikalen Messpunkt auf Augenhöhe in Richtung Fenster gerichtet sowie den dazugehörigen Sonnenlichtquotienten. Er ist bezogen auf die Wirkung des Tageslichtes und bei Angabe der negativen Eigenschaften signifikant. Aber auch alle anderen Fragen zeigen hier positive (nicht signifikante) Bezüge. Abbildung 6.2-31 (links) zeigt die beiden Messgrößen im Vergleich. Nach Einzelräumen betrachtet weist Raum 2, der bei allen anderen Messpunkten deutlich höhere gemessene Werte zeigt, hier sehr niedrige vertikale Beleuchtungsstärken am Auge auf (Abbildung 6.2-31 rechts). Der Grund liegt in der starken Lichtlenkung an die Decke aus dem oberen Drittel des Fensters heraus (Kapitel 5.2.2). Raum 5 zeigt nur eine geringfügige positive Tendenz.

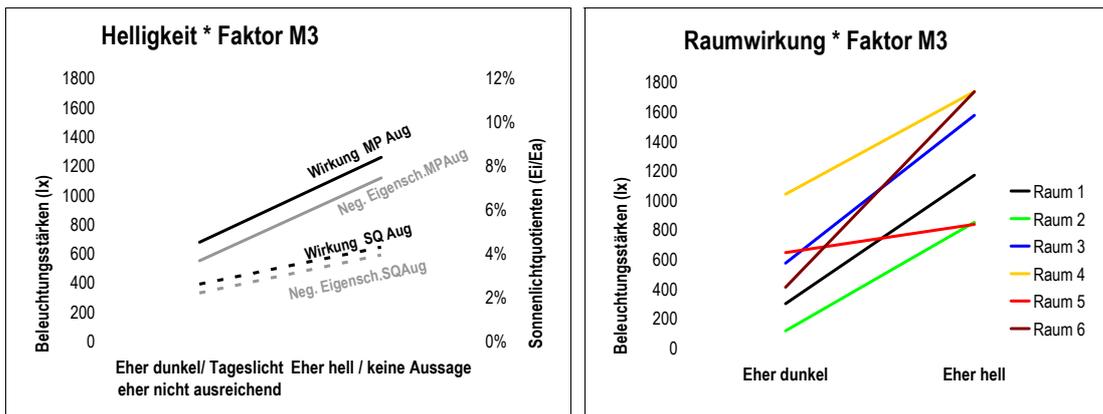


Abbildung 6.2-31: Links: Fragen der Kategorie mit dem signifikanten Faktor M3; rechts: Die Raumwirkung im Bezug zum vertikalen Messpunkt in Augenhöhe nach Räumen getrennt

Der Faktor L2 (repräsentiert hauptsächlich durch die Mittelwerte der Leuchtdichten) zeigt sich in vier Fällen signifikant. Die Abhängigkeit ist bei allen Messpositionen dieses Faktors gleichermaßen positiv, das heißt, je höher die Messwerte, desto „besser“, „heller“, „eher ausreichend“ etc. fällt das subjektive Urteil aus. Stellvertretend wird in Abbildung 6.2-32 der Mittelwert aus der Messposition 2 heraus dargestellt. Die Störung durch die Verminderung des Tageslichtes fällt bei allen Leuchtdichtemesswerten etwas weniger steil, aber in positiver Korrelation, aus.

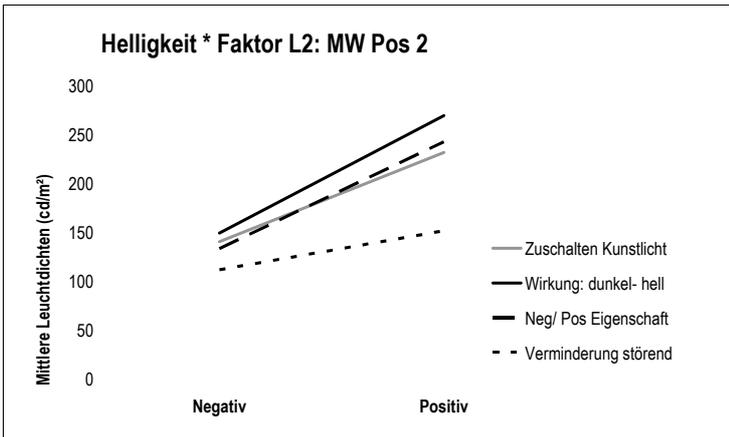


Abbildung 6.2-32: Relevante Fragen für Faktor L2 am Beispiel des Mittelwertes aus Messposition 2

Der die Maximalwerte der Leuchtdichten aus allen drei Messpositionen heraus repräsentierende Faktor L3 hat eine positive Korrelation mit der „Verminderung des Tageslichtes“ (wie auch L1 und L2), mit dem Urteil des Gesamtraumes bezogen auf die Wirkung „grell“ hingegen eine negative, das heißt, je höher die maximalen Leuchtdichtewerte desto eher wird der Raum als „grell“ empfunden (Abbildung 6.2-33 links). Die gleichen Fragen nach Räumen getrennt für die Messposition 2 und die Frage nach der „Verminderung des Tageslichtes“ beispielhaft dargestellt zeigen differenziertere Ergebnisse (Abbildung 6.2-33 rechts). Die „Verminderung des Tageslichtes“ ist in Raum 1 positiv, das heißt, bei höheren Leuchtdichten wird keine Verminderung empfunden, alle anderen Räume weisen eine negative Tendenz auf. Dies spiegelt einmal mehr die Abhängigkeit der Bewertung in Abhängigkeit der Außenbedingungen wider.

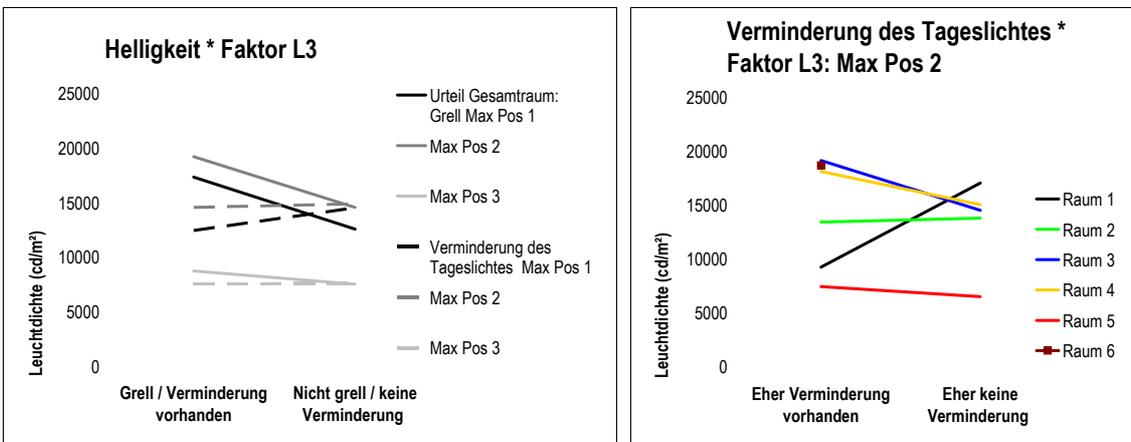


Abbildung 6.2-33: Links: Die für Faktor L3 Fragen zur Kategorie Helligkeit; rechts: Verminderung des Tageslichtes über der maximalen Leuchtdichte nach Räumen getrennt

Faktor L4 beinhaltet im Gegensatz zu den anderen Leuchtdichtefaktoren die Messungen, die während der Befragungen aufgenommen wurden. Dies war nur jeweils in 2 Räumen gleichzeitig der Fall (da nur zwei Kameras vorhanden). Zur Überprüfung der Tendenzen, die sich aus den anderen Leuchtdichtefaktoren ergeben, bei denen die Messungen in allem Räumen jeweils kurz vor den Befragungen durchgeführt wurden, leisten diese Werte dennoch gute Dienste.

Abbildung 6.2-34 zeigt den Faktor angewendet auf die als signifikant geprüften Fragen in der Kategorie Helligkeit beispielhaft für den Mittelwert des jeweils gesamten Leuchtdichtebildes. Die Abhängigkeit ist auch hier signifikant positiv. Die Abweichung zu L2 begründet sich in der geringeren Anzahl an Messungen.

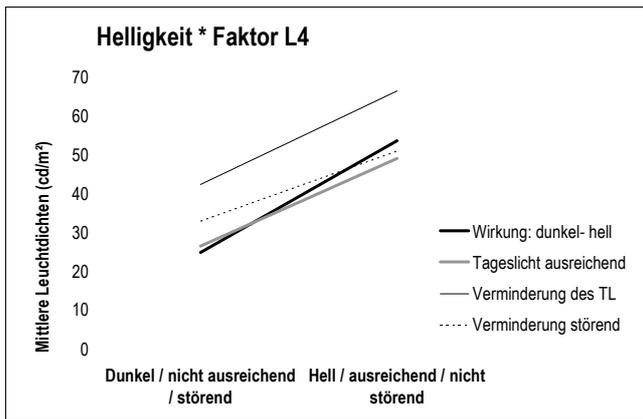


Abbildung 6.2-34: Die Fragen der Kategorie dargestellt im Bezug zu Faktor L4, beispielhaft für die mittleren Leuchtdichten

Das Verfahren, die Leuchtdichtemessungen in allen Räumen kurz vor den Befragungen durchzuführen zeichnet sich somit als repräsentativ aus, vorausgesetzt, die Wetterverhältnisse sind stabil. Das Urteil „dunkel“ abhängig bezogen auf den Gesamttraum wurde signifikant abhängig vom Farbfaktor F3 getestet. Da diese Abhängigkeit jedoch auf den Blauanteil des elektrochromen Glases mit stark verringerter Lichttransmission zurück zu führen ist, wird auf die weitere Betrachtung in diesem Rahmen verzichtet.

6.2.8 Lichtlenkung

Die Faktorenanalyse für die Kategorie Lichtlenkung zeigt Abhängigkeiten mit den Faktoren L2 und L3 im Bezug auf eine erkennbare Lichtlenkung. Keine signifikanten Zusammenhänge gab es bei der Frage nach positiver oder negativer Resonanz auf eine vorhandene Lichtlenkung. Faktor M1 wurde zusätzlich untersucht; die Farbfaktoren wiesen keine signifikanten Zusammenhänge auf. Tabelle 6.2-8 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse.

Tabelle 6.2-8: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Lichtlenkung

Faktorenanalyse Kategorie Lichtlenkung								
Kategorie	TEMP	LUX			LMK			
	tempi	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4
Lichtlenkung feststellbar 1 nein - 2 ja						+	+	
Lichtlenkung 1 positiv - 2 negativ		(+)						

Die Beurteilung der Lichtlenkung ist nicht signifikant, zeigt jedoch einen tendenziellen Zusammenhang mit Faktor M1 (Abbildung 6.2-35). Eine Lichtlenkung wird bei höheren Beleuchtungsstärken insgesamt eher positiv wahrgenommen, auch nach Räumen getrennt. Ein Grund für diesen nicht signifikanten Zusammenhang mag die große Streubreite der individuellen Antworten sein, da einige Räume keine Lichtlenkung aufweisen.

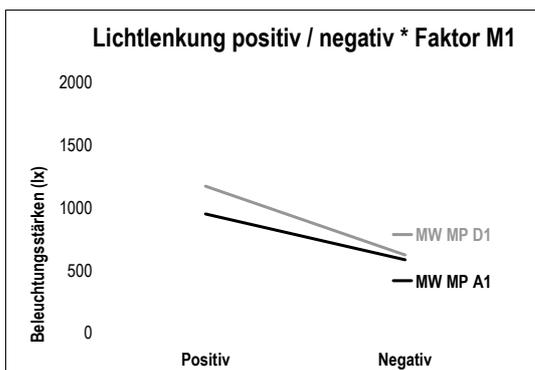


Abbildung 6.2-35: Bewertung einer vorhandenen Lichtlenkung bezogen auf Faktor M1 (MP A1 und D1)

Die Leuchtdichtemittelwerte (Faktor L2), beispielhaft aus Messposition 2, zeigen eine negative Korrelation, das heißt, höhere Werte führen zu höherer Wahrnehmung von Lichtlenkeigenschaften. Nach Räumen getrennt verhält es sich in Raum 4 umgekehrt (Abbildung 6.2-36 links). Die Ursache mag in den Weißlichthogrammen begründet liegen, die bei niedrigeren Sonnenständen deutlichere Lenkungsfunktionen aufweisen. Die gleiche Charakteristik zeigt sich bei den maximalen Leuchtdichten (Faktor L3) (Abbildung 6.2-36 rechts).

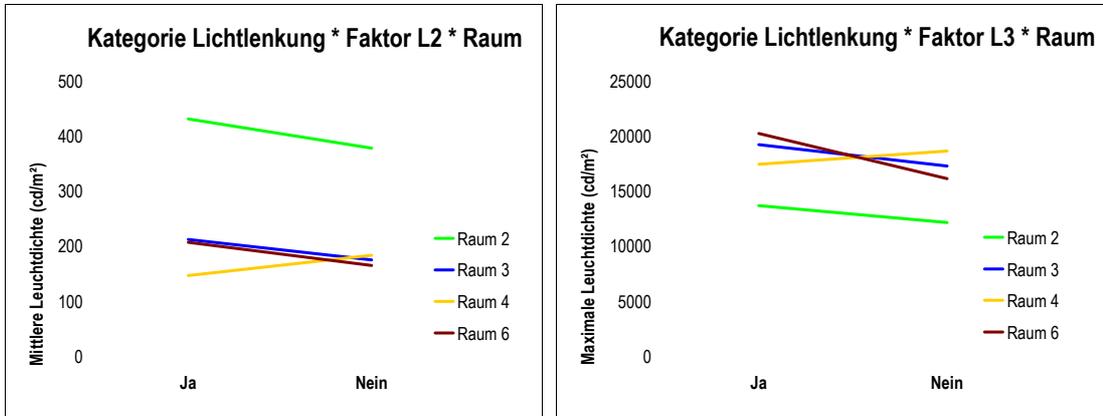


Abbildung 6.2-36: Links: Wahrnehmung der Lichtlenkung, mittlere Leuchtdichten; rechts: maximale Leuchtdichten (nur Lichtlenkssysteme)

Für die Beurteilung der Lichtlenkung zeigen zusätzliche Auswertungen (nicht signifikant) eine interessante Tendenz (Abbildung 6.2-37). Positiv wird die Lichtlenkung angesehen, wenn sie niedrige Leuchtdichtemittelwerte (links), aber hohe Leuchtdichtemaximalwerte (rechts) aufweist. Allerdings wurden nur in Raum 3 und 4 überhaupt negative Urteile abgegeben.

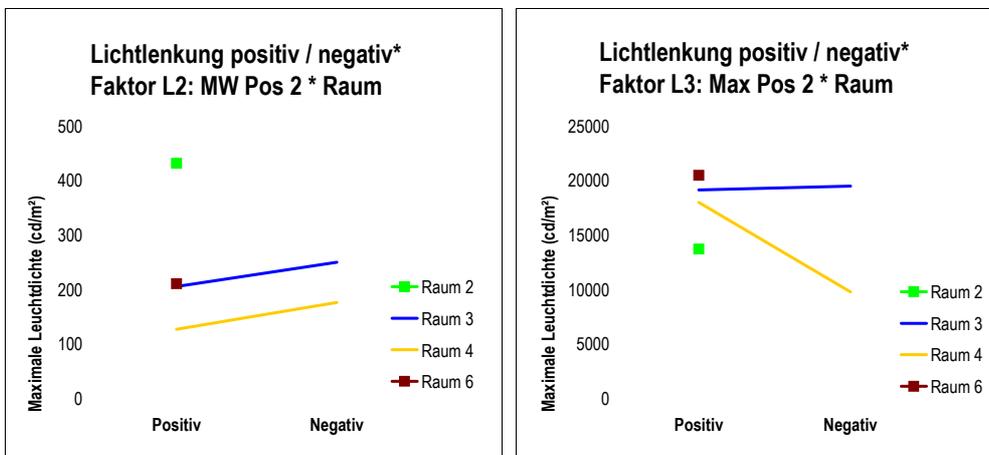


Abbildung 6.2-37: Links: Beurteilung der Lichtlenkfunktion nach Räumen getrennt für Faktor L2; rechts: für Faktor L3

Dieser Zusammenhang stellt lediglich eine Tendenz dar und müsste anhand anderer Befragungen und Messungen überprüft werden.

6.2.9 Farb- und Raumwirkung

Für die Beurteilung der Farb- bzw. Raumwirkung ist Faktor L2 am häufigsten signifikant. Er beinhaltet hauptsächlich die Leuchtdichtemittelwerte. Bei den Beleuchtungsstärken zeigt sich einzig Faktor M2 (mit den Außenbeleuchtungsstärken) signifikant; im Falle der Farbfaktoren gibt es für alle drei Faktoren einen geringen Prozentsatz an Zusammenhängen. Aufgrund der geringen Anzahl an Messungen sind diese jedoch eher tendenziell zu bewerten. Eine Zusammenstellung der für die Kategorie herangezogenen Fragen zeigt Tabelle 6.2-9.

Tabelle 6.2-9: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Farb- und Raumwirkung

Faktorenanalyse Kategorie Wirkung												
Kategorie	TEMP	LUX			LMK				Farbe			
	tempi	M1	M2	M3	L1	L2	L3	L4	F1	F2	F3	
Wirkung Tageslicht 1 eher angenehm - 2 eher unang.						-					(+)	
Wirkung Tageslicht 1 eher natürlich - 2 eher unnat.						-					(+)	
Wirkung Tageslicht 1 eher kalt - 2 eher warm											(+)	
Urteil Gesamtraum: Verfremdet 0 kein Kreuz - 1 Kreuz										+		
Neg. Eigenschaft d. SS: Unang. Raumeindruck 0 k. Kr. - 1 Kreuz						-						
Farbänderung 1 nein- 2 ja							-				(+)	
Farbänderung 1 eher n. stör. - 2 störend			-			-					+	

Der Faktor M2 (Außenbeleuchtungsstärken global und senkrecht vor der Fassade gemessen sowie der Sonnenlichtquotient in der Arbeitsebene) ist für die Frage nach der Störung der Farbänderungen als signifikant. Die empfundenen Farbänderungen (nicht signifikant, aber zur Information eingetragen) zeigen eine negative Tendenz bezogen auf die globale Beleuchtungsstärke, das heißt, je höher die Werte desto eher wird die Farbänderung wahrgenommen.

Die Störung durch die Farbänderung zeigt eine positive Tendenz, das heißt je höher die globalen Außenbeleuchtungsstärken desto weniger störend wird die Farbänderung empfunden (Abbildung 6.2-38).

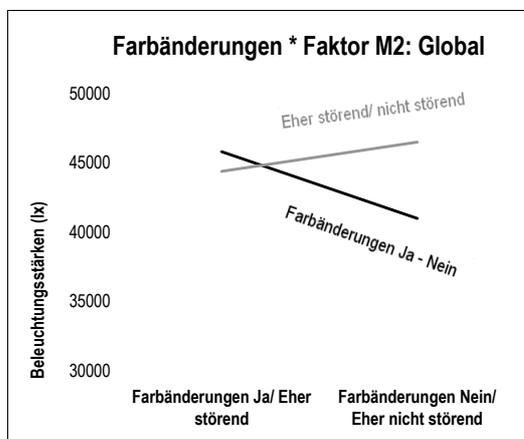


Abbildung 6.2-38: Wahrnehmung und Bewertung von Farbänderungen bezogen auf den Faktor M2

Die Beleuchtungsstärke senkrecht vor der Fassade gemessen zeigt die gleiche Tendenz mit etwas geringeren Ausschlägen. Der Sonnenlichtquotient am Arbeitsplatz zeigt die größere Störung bei höheren Werten, also die umgekehrte Tendenz.

Die signifikanten Abhängigkeiten für den Faktor L2 stellen sich positiv dar, das heißt, je höher die mittleren gemessenen Leuchtdichten, desto „angenehmer“, „natürlicher“ und weniger „unangenehm“ ist der Raumeindruck und desto weniger fallen Farbänderungen ins Gewicht. Abbildung 6.2-39 zeigt die Tendenzen zusammenfassend beispielhaft für die Messposition 2 (Nutzerposition).

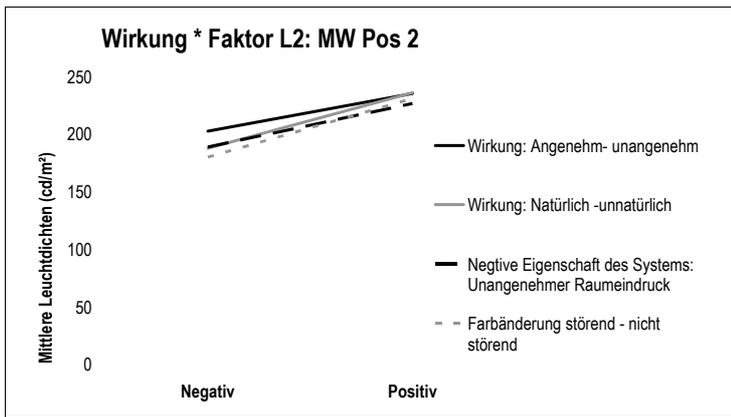


Abbildung 6.2-39: Lichtwirkung im Bezug zu Faktor L2, aus Position 2

Beispielhaft für die Lichtwirkung nach „eher natürlich“ und „eher unnatürlich“ zusammengefasst zeigt Abbildung 6.2-40 (links) den Mittelwert der Leuchtdichten aus Messposition 2 heraus. Raum 4 und Raum 6 zeigen hier eine negative Tendenz, also bei höheren Werten einen „eher unnatürlichen“ Eindruck. Die gleiche Tendenz zeigt sich für die Bewertung der Farbänderungen nach „eher störend“ oder „eher nicht störend“ (Abbildung 6.2-40 rechts).

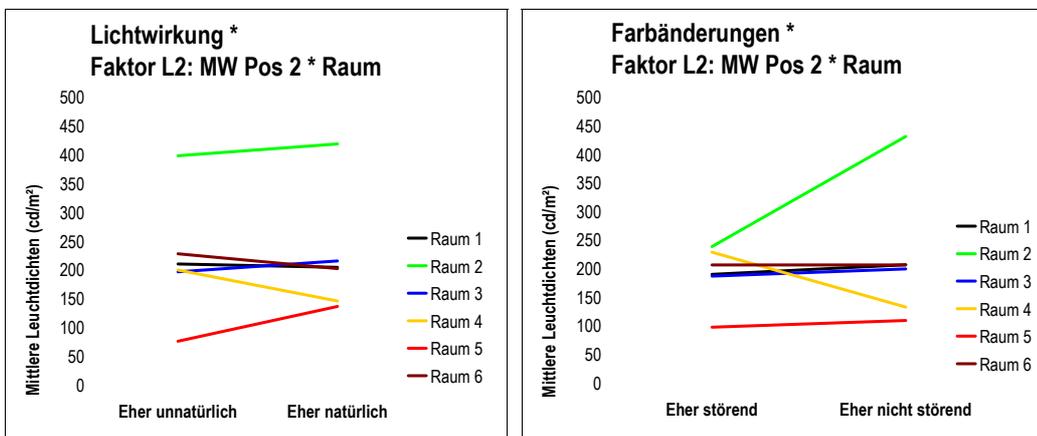


Abbildung 6.2-40: Links: Mittlere Leuchtdichten aus Position 2 im Bezug zur natürlichen Lichtwirkung; rechts: Im Bezug zu möglichen Störung durch Farbänderungen

Zusammenfassend zeigt sich bei den Leuchtdichten ein relativ diverses Bild bezogen auf die Einzelräume. Insgesamt zeigen die Auswertungen, dass höhere Leuchtdichten meist in einem positiven Ergebnis münden. Faktor L3 beinhaltet die Maximalwerte der Leuchtdichtemessungen aus den verschiedenen Positionen heraus. Abbildung 6.2-41 zeigt die Auswirkungen in der Zusammenfassung.

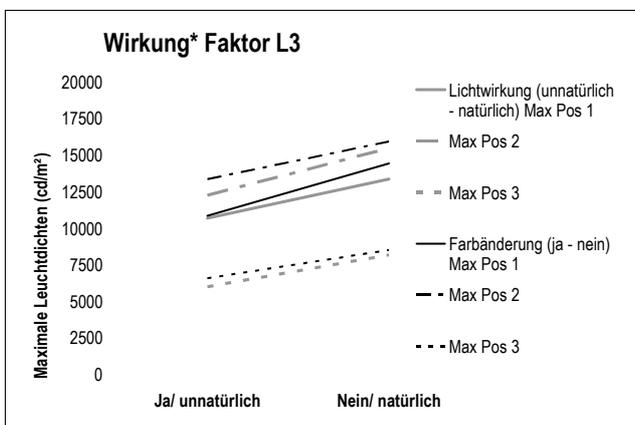


Abbildung 6.2-41: Lichtwirkung bezogen auf Faktor L3

Insgesamt zeigen höhere Werte eher einen „natürlichen“ Raumeindruck, die Farbänderungen werden bei niedrigeren Werten eher wahrgenommen und wirken „eher unnatürlich“. Dies entspricht in der Tendenz dem Faktor L2.

Nach Räumen aufgeschlüsselt zeigen die Maximalwerte der Leuchtdichten sehr unterschiedliche Tendenzen, so dass keine einheitliche Aussage möglich ist. Farbänderungen werden insgesamt bei höheren Werten (Faktor L3) weniger wahrgenommen, im Einzelfall stellt sich dies in Raum 1, 3 und 5 jedoch genau umgekehrt dar. Gerade die beiden Sonnenschutzsysteme verzeichnen bei höherer Strahlung deutlichere Farbänderungen.

Nur sehr geringfügige Abhängigkeiten weisen die Farbfaktoren auf. Faktor F1 ist signifikant bei der Frage „Gesamturteil: Verfremdet“. Abbildung 6.2-42 zeigt das Ergebnis im Bezug auf den Farbwiedergabewert an der Nutzerposition. Je besser die Farbwiedergabe desto weniger „verfremdet“ erscheint ein Raum.

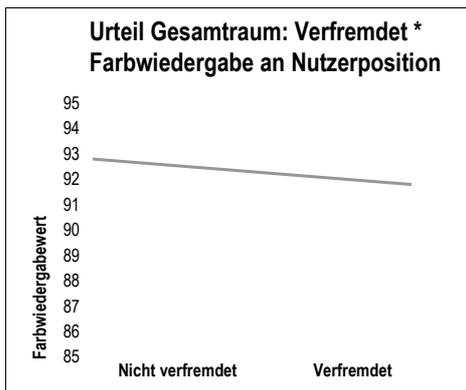


Abbildung 6.2-42: Zusammenfassung des Faktors F1 im Bezug zum Gesamturteil verfremdet

Um etwas genauer Aufschluss über diese Frage zu bekommen, zeigt Abbildung 6.2-43 (links) das Urteil „verfremdet“ aufgetragen in Verbindung mit den gemessenen Farbtemperaturen, die alle positiv abhängig sind, je höher also die Farbtemperaturen, also je „kälter“, desto eher wirkt ein Raum „verfremdet“. Raumabhängig betrachtet zeigt sich ein ähnliches Bild mit Ausnahme von Raum 6, in dem sich eine gegensätzliche Tendenz zeigt, und Raum 5, in dem die Werte (da immer aktiv geschaltet) tatsächlich neutral waren (Abbildung 6.2-43 rechts). Da jedoch nur wenige Messungen durchgeführt werden konnten, muss dieser tendenzielle Zusammenhang in weiteren Messreihen überprüft werden.

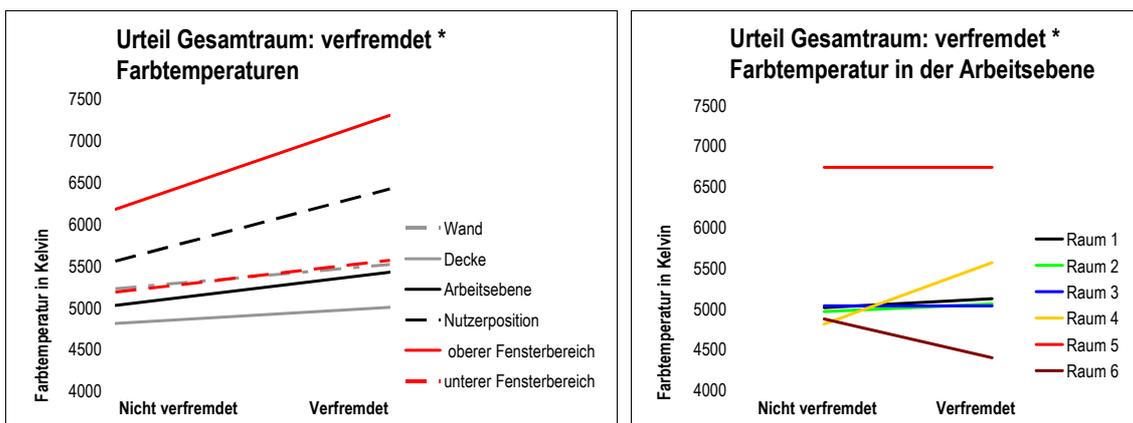


Abbildung 6.2-43: Links: Zusammenfassung der Farbtemperaturen im Bezug zum Gesamturteil verfremdet; rechts: Raumana-lyse bezogen auf die Farbtemperatur in der Arbeitsebene

Zusätzlich angestellte (nicht signifikante) Analysen bezogen auf die Farbtemperaturen zeigen alle eine positive Tendenz, das heißt je höher die Farbtemperatur desto „unangenehmer“, „unnatürlicher“ etc wirkt ein Raum.

Faktor F2 (vorwiegend bestehend aus den Farbtemperaturen) ist signifikant für die Wahrnehmung einer möglicherweise störenden Farbänderung. Abbildung 6.2-44 zeigt für alle Farbtemperaturen positive Abhängigkeiten, das heißt, je höher die Farbtemperatur desto eher wird die Wahrnehmung derselben als „eher störend“ empfunden. Nach Räumen getrennt betrachtet, verhält es sich in Raum 2 umgekehrt.

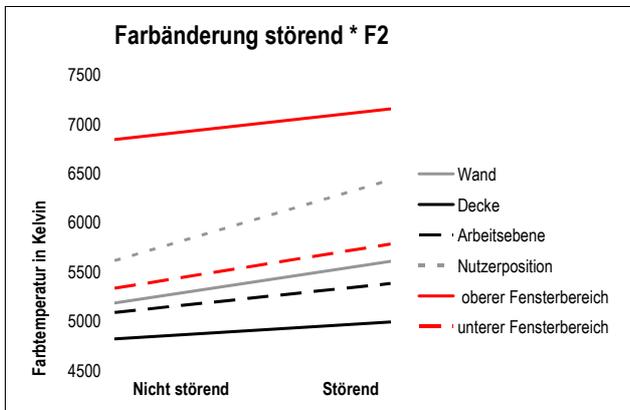


Abbildung 6.2-44: Faktor F2 im Bezug zur Bewertung der wahrgenommenen Farbänderung durch die geschlossenen Systeme

Ingesamt zeigt diese Analyse deutliche Abhängigkeiten, die jedoch aufgrund einer geringen Anzahl an Messungen nur Tendenzen geben können. Hier scheint zusätzlich die Frage interessant, ob es unterschiedliche Urteile bei gleichen Lichtfarben gegeben hat, diese Analysen sind jedoch aufgrund einer zu geringen Anzahl an Messungen nicht durchführbar.

6.3 Schwellwertanalyse

6.3.1 Vorgehensweise

Auf Basis der zeitgleich aufgenommenen Befragungen und Messungen wurde eine Schwellwertanalyse für bestimmte Themengebiete durchgeführt. Die statistische Grundlage wurde in Kapitel (Kapitel 4.4.2) ausführlich beschrieben. Aufgrund der Systemabhängigkeiten war eine Schwellwertdefinition nur in wenigen Fällen möglich. Zum Teil sind die Zahlen statistisch gesehen zwar relevant, in der Praxis jedoch kaum realistisch. Hierzu könnte eine größere Zahl an Befragungen und Messungen zu jeweils einem System klare Aussagen bringen. Die Schwellwertanalyse wurde für auf der Faktorenanalyse basierenden relevante Fragen und einzelne Messgrößen durchgeführt.

6.3.2 Arbeitsplatz

Für die Schwellwertanalyse wurden die jeweils prägnantesten Fragen mit den deutlichsten Antworten jeder Kategorie ausgewählt, im Falle des Arbeitsplatzes ist dies das „Urteil Gesamtraum: offen“. Untersucht wurden die aus der Faktorenanalyse signifikanten Messgrößen im Zusammenhang mit den Antworten, hier die Leuchtdichteminimalwerte aus Messposition 2, die sich für die Praxis jedoch kaum relevant zeigen, und die Maximalwerte aus Messposition 2 und 3. Die Maximalwerte liefern kein Ergebnis, da die Vorhersagewahrscheinlichkeit zu niedrig ist; die mittleren Leuchtdichten waren in der Faktorenanalyse für diese Frage nicht signifikant.

6.3.3 Temperatur

Innerhalb der Kategorie Temperatur konnten zum Teil Schwellwerte ermittelt werden, und zwar für die Innenraumtemperatur, die Beleuchtungsstärke an Messpunkt D2 an der Decke und die fensternahe Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene.

Für die Innenraumtemperatur kann mit 80%iger Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden, dass 31°C und darüber als „zu hoch“ beurteilt werden. Aufgrund der hohen Außen- und vor allem Innenraumtemperaturen, die zum Teil während der Sommerbefragungen aufgetreten sind, ist dies ein logisches, für die Praxis aber eher irrelevantes Ergebnis, da Arbeitsräume diese Temperaturen nicht erreichen sollten.

Für den Messpunkt 2 an der Decke wurden 16 Lux als Minimum für die Beurteilung Raumtemperatur „zu hoch“ mit einer Wahrscheinlichkeit von 66,9% getestet. Auch dieser Wert scheint in der Praxis eher irrelevant, da er eher die Funktion der Systeme beinhaltet und keine Rückschlüsse auf die Beurteilung der Innenraumtemperatur zulässt. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 80,2% kann gesagt werden, dass bei Beleuchtungsstärken von über 2843 Lux am fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene die Raumtemperatur als „zu hoch“ empfunden wird; Räume mit höhere Beleuchtungsstärken wurden allerdings aus anderen Gründen, u.a. der Oberflächentemperaturen oder direkte Einstrahlung schlechter bewertet.

Insgesamt sind die Ergebnisse der Schwellwertermittlung in dieser Kategorie für die Praxis eher nicht von Bedeutung. Aus den Fragestellungen des Kapitels heraus müsste man weitere Untersuchungen mit jeweils einem fixen Parameter durchführen, um genauere Aussagen machen zu können. Dabei spielt die thermische Trennung von Räumen, die innerhalb dieser Studie nicht durchgeführt werden konnte, eine wichtige Rolle.

6.3.4 Ausblick

Für die Schwellwertanalyse wurden Fragen herangezogen, bei denen eine Störung vorhergesagt werden könnte. Aufgrund der manchmal sehr diversen Ergebnisse in den einzelnen Räumen konnten hier jedoch nur vereinzelt Schwellwerte, das heißt zu 80% vorhersagbare Ergebnisse, definiert werden (Tabelle 6.3-1).

Tabelle 6.3-1: Schwellwertdefinition für Kategorie Ausblick

	Messpunkt D1	Messpunkt A1	LMK MW Pos. 2	LMK MW Pos. 3	LMK MW während
Verminderung des Ausblicks: positiv/ negativ	X	X			
Einschränkung des Tageslichtes: störend			1121 cd/m ²	141 cd/m ²	80 cd/m ²

Für die Bewertung der „Verminderung des Ausblicks“ konnten keine Schwellwerte definiert werden. Die Schwellwerte für die „störende“ Einschränkung des Tageslichtes sagen aus, dass ab einem Wert von 1121 cd/m² (Leuchtdichtemittelwerte aus Messposition 2) davon ausgegangen werden kann, dass die Einschränkung des Tageslichtes mit einer Wahrscheinlichkeit von 85% „nicht störend“ ist. Der Mittelwert aus Messposition 3 lag mit 141cd/m² und einer Wahrscheinlichkeit von 78% etwas darunter. Für die Messposition 3 aus dem hinteren Teil des Raumes gelten 89 cd/m² mit einer Wahrscheinlichkeit von 80%.

6.3.5 Blendung

Die Schwellwertanalyse für die Kategorie Blendung unterliegt besonderer Schwierigkeiten aufgrund der geringen Fallzahl an negativen Antworten zum Thema (Kapitel 5.3.5.2). Definiert werden konnten Schwellwerte für die Beurteilungen von hellen Flächen (nicht wahrnehmbar bis unakzeptabel) und für die Frage nach direkter Blendung (Momentan geblendet: Ja oder nein) (Tabelle 6.3-2).

Tabelle 6.3-2: Schwellwerte Kategorie Blendung

	Messpunkt vertikal am Auge	LMK MW Pos. 2	LMK Max Pos. 2
Helle Flächen: Wahrnehmbar - unkomfortabel/ unakzeptabel		1121 cd/m ²	
Momentan geblendet?	3169 Lux		29750 cd/m ²

Helle Flächen wurden mit 82,6%iger Wahrscheinlichkeit bei über 1121 cd/m² Leuchtdichtemittelwert aus Messposition 2 heraus als „eher unkomfortabel bis unakzeptabel“ bewertet. Dies würde in etwa den gängigen Regelwerten entsprechen. Für alle anderen untersuchten Werte konnten keine Schwellen definiert werden. Die Blendung während der Befragungen kann mit 79,8%iger Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden, wenn die vertikale Beleuchtungsstärke in Augenhöhe in Richtung Fenster 3169 Lux und mehr beträgt (der dazugehörige Median liegt bei etwa 1200 cd/m²), dieser zu Blendung führt. Bei dem Maximalwert der Leuchtdichte aus Messposition 2 heraus sind es gar 29750 cd/m² mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 70,4% (Median bei um 25.000 cd/m²).

Dies zeigt deutlich die Schwierigkeit, Schwellwerte für das Thema Blendung zu definieren. Der Grund liegt in der sehr großen Spannweite an subjektiven Urteilen und in der insgesamt sehr geringen Störung durch Blendung im Falle der hier untersuchten Systeme. In diesem Fall waren die Fallzahlen für „Momentan geblendet: Ja“ zu gering, um deutliche Aussagen zu bekommen, da die Gesamtzahl an Antworten „Ja“ bei unter 20% aller Befragungen lag.

6.3.6 Funktion

Schwellwerte wurden definiert für die Frage nach Beurteilung der Schutzfunktion und nach möglicherweise zusätzlich benötigtem Schutz sowie für die Störung durch starre Systeme (Tabelle 6.3-3).

Tabelle 6.3-3: Schwellwerte Kategorie Funktion

	Messpunkt A1	Messpunkt vertikal in Aughöhe
Sonnenschutz momentan gut?	4274 Lux	3169 Lux
Weiterer Schutz notwendig?	X	3797 Lux

Für den fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene wurde mit 80,8%iger Wahrscheinlichkeit ein Schwellwert von 4274 Lux berechnet, oberhalb dessen der Sonnenschutz als ungenügend definiert wird. Der vertikale Messpunkt in Augenhöhe wird mit 3169 Lux und einer Wahrscheinlichkeit von 82,7% berechnet. Ähnlich für die Notwendigkeit einer zusätzlichen Schutzeinrichtung, hier lag die Schwelle für den Messpunkt am Auge bei 3797 Lux (75,5% Wahrscheinlichkeit). Für alle anderen untersuchten Messgrößen konnten keine Schwellen definiert werden.

Insgesamt zeigt sich hier, dass die Schwellwerte sehr hoch liegen, also entweder die Systeme sehr gut waren oder aber die Kurzzeitbefragungen hier in ihrer Auswirkung nicht den entsprechenden Einfluss hatten, wie es an tatsächlichen Arbeitsplätzen der Fall gewesen wäre. Ein weiterer Grund könnte die Erwartungshaltung der Probanden bei besonnener Fassade sein, die in diesem Fall hohe Innenbeleuchtungsstärken fordern.

6.3.7 Raumhelligkeit

In der Kategorie Helligkeit konnten verschiedene Schwellwerte aus den Faktoren heraus ermittelt werden. Die Einflüsse der einzelnen Räume sind zum Teil deutlich zu erkennen. Daher können diese Schwellwerte nur zum Teil

allgemein gültige Aussagen liefern. Eine solche Befragung müsste man, um sicher zu gehen, an jeweils einem Systemen und unterschiedlichen Raumhelligkeiten durchführen.

Die folgenden Bereiche wurden für diese Analyse stellvertretend ausgewählt: „Zuschalten Kunstlicht erwünscht“, die „Wirkung des Tageslichtes“, das „ausreichende Tageslicht Arbeitsplatz“ und die „Störung durch die Verminderung des Tageslichtes“ (hierfür konnten leider keine Schwellwerte ermittelt werden). Tabelle 6.3-4 zeigt der Ergebnisse der Schwellwertanalyse für die Kategorie Helligkeit in der Zusammenfassung.

Tabelle 6.3-4: Zusammenfassung der Schwellwerte für die Kategorie Helligkeit

	Messpunkt A1	Messpunkt D2	Messpunkt vertikal in Aughöhe	Außen Global	Außen vertikal	LMK MW Pos 2	LMK Max Pos 3	LMK MW während
Zuschalten Kunstlicht gewünscht: ja	X	X	X	5581 Lux	12316 Lux	X	X	
Wirkung Tageslicht: Eher hell	3393 Lux	1024 Lux	3797 Lux	X	X			59 cd/m ²
Tageslicht ausreichend am Arbeitsplatz: eher schon	4442 Lux	829 Lux	3169 Lux		40039 Lux	X		72 cd/m ²

Für den Wunsch nach Zuschalten des Kunstlichtes konnte für die globale Außenbeleuchtungsstärke ein Schwellwert von 5581 Lux mit einer Vorhersagewahrscheinlichkeit von 79,4% ermittelt werden, das heißt, bei diesem Wert und darunter ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Zuschalten von Kunstlicht gewünscht wird, nahe bei 80%. Für den vertikal vor der Fassade gemessenen Wert gilt eine Wahrscheinlichkeit von 79% für den Schwellwert 12316 Lux und darunter. Für alle anderen relevanten Größen konnten keine Schwellwerte ermittelt werden.

Bezogen auf die Wirkung des Tageslichtes „dunkel – hell“ konnten vier Schwellwerte ermittelt werden. Der mittlere Messpunkt an der Decke ist relevant bei 1024 Lux und darüber mit einer Wahrscheinlichkeit von 83%, dass das Urteil „eher hell“ gefällt wird; hier zeichnet sich System 2 (Lichtlenkglas) deutlich relevant. Für den fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene gilt mit einer Wahrscheinlichkeit von 78,4% ein Schwellwert von 3393 Lux für die Aussage „hell“. Dieser liegt auf die Realität bezogen sehr hoch, zeigt jedoch sehr deutlich, dass 500 Lux sicher nicht die ausreichenden Werte darstellen. Der Einfluss des Systems 2 ist hier ebenfalls deutlich zu erkennen. Für die vertikale Beleuchtungsstärke in Augenhöhe in Richtung des Fensters gemessen gilt bei einer Wahrscheinlichkeit von 76,2% das Urteil „hell“ ab einem Wert von 3797 Lux. Für den Mittelwert der Leuchtdichten während der Befragungen gemessen (Messposition von der rückwärtigen Wand) gilt, ab einem Wert von 59 cd/m² und darüber wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 84% ein Raum als „hell“ bezeichnet.

Das „notwendige“ bzw. „ausreichende“ Tageslicht wird wie folgt beurteilt: Für den mittlern Messpunkt an der Decke gilt eine Schwelle von 829 Lux bei einer Vorhersagewahrscheinlichkeit von 79,2%, für Messpunkt A1 gelten 4442 Lux bei 77,6% Wahrscheinlichkeit, dass das Tageslicht als „eher ausreichend“ gewertet wird. Für die vertikale Beleuchtungsstärke auf der Fassade gemessen gilt ein Schwellwert von 40039 Lux (bei 72,2%). Der vertikal gemessene Wert am Auge zeigt 3169 Lux mit einer Wahrscheinlichkeit von 78,5% und die mittlere Leuchtdichte während der Befragungen 72 cd/m² bei 80,2% Wahrscheinlichkeit (eher ausreichendes Tageslicht).

In dieser Kategorie wurden für die Beleuchtungsstärke am Messpunkt A1 zusätzliche statistische Berechnungen angestellt, und zwar jeweils für festgesetzte Schwellwerte, die nach geltenden Regeln ausgewählt wurden, so 300 Lux als Mindestwert für einen fensternahen Arbeitsplatz, 500 Lux für einen Arbeitsplatz und 1000 Lux für eine den geltenden Regeln gegenüber deutlich verbesserten Beleuchtung (Tabelle 6.3-5).

Tabelle 6.3-5: Zusammenfassung der Voraussagewahrscheinlichkeit für festgesetzte Schwellwerte

	Schwellwert 300 Lux	Schwellwert 500 Lux	Schwellwert 1000 Lux
Zuschalten Kunstlicht gewünscht: ja	56.4%	54.2%	51.2%
Wirkung Tageslicht: Eher hell	56.7%	60.4%	65.5%
Tageslicht ausreichend am Arbeitsplatz: eher schon	44.7%	46.5%	50.8%

Das Zuschalten des Kunstlichtes wird bei 300 Lux mit 56,4% Wahrscheinlichkeit gewünscht, bei 1000 Lux sinkt der Wert auf 51,2%. Bei dem Schwellwert von bis 300 Lux in der Arbeitsebene werten Probanden mit 56,7%iger Wahrscheinlichkeit die Raumwirkung als „eher hell“, bis 500 Lux sind es 60,4%, bei bis zu 1000 Lux sind es immerhin schon 65,5% der Probanden, die einen Raum mit diesen Werten als „eher hell“ bezeichnen würden. Die zusätzlichen festen Schwellwerte für den Messpunkt A1 zeigen für das „ausreichende Tageslicht“ bei bis zu 300 Lux eine 44,7%ige, bei bis 500 Lux eine 46,5%ige und bei bis zu 1000 Lux immerhin schon eine 50,8%ige Wahrscheinlichkeit an.

Beispielhaft zeigt Abbildung 6.3-1 für die Frage nach möglichem Zuschalten von Kunstlicht die bewerteten Beleuchtungsstärken in der Arbeitsebene. Deutlich zeigt sich, dass ein Zuschalten des Kunstlichtes nur bei Beleuchtungsstärken über 500lx nicht gewünscht wird, Werte unter 500 lx werden als zu gering eingestuft, Werte um die 800 lx im Median werden als ausreichend empfunden. Die Werte vertikal am Auge gemessen zeigen ein ähnliches Bild, bei dem ab 800lx aufwärts ein Raum als „hell“ empfunden wird (nicht dargestellt).

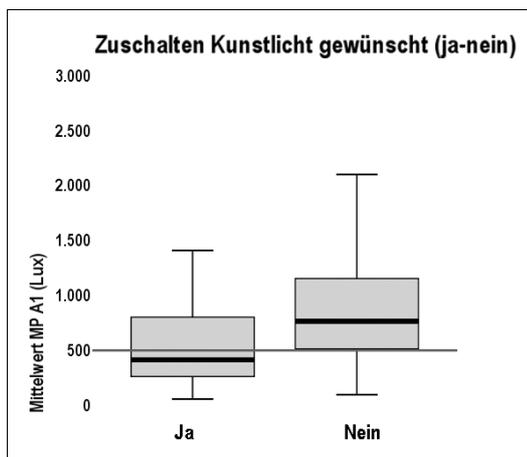


Abbildung 6.3-1: Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene über dem Wunsch nach zusätzlichem Kunstlicht

Da die Schwellwerte auf Basis aller Räume ermittelt wurden, in Raum 2 jedoch überdurchschnittlich hohe Werte gemessen und ein entsprechend hohes Bewertungsniveau bei den Probanden festgestellt wurde, scheinen diese Schwellen im Bezug auf die Realität in Bürogebäuden ein sehr hohes Beurteilungsniveau widerzuspiegeln. Diese Untersuchung zeigt jedoch deutlich, dass für eine helle Raumwirkung, ausreichendes Tageslicht und dem Wunsch nach zusätzlichem Kunstlicht, die geltenden Regeln in Frage gestellt werden müssen.

6.3.8 Farb- und Raumwirkung

Innerhalb der Kategorie Raumwirkung sind die Fragen nach der „angenehmen“ oder „natürlichen“ bis „unangenehmen“ oder „unnatürlichen“ Wirkung des Tageslichtes untersucht worden, außerdem das Gesamturteil „verfremdet“ und mögliche Störungen durch wahrgenommene Farbänderungen (Tabelle 6.3-6).

Tabelle 6.3-6: Schwellwerte der Kategorie Wirkung

	Farb- temperatur- abweichung	Farb- temperatur Arbeitsebene	Farb- temperatur entlang der Wand	Farb- temperatur Nutzer- position
Wirkung Tageslicht: Angenehm - unangenehm	x	x	x	x
Wirkung Tageslicht: Natürlich - Unnatürlich	x	x	x	x
Urteil Gesamtraum: Verfremdet	32 Mired	6745 Kelvin	10024 Kelvin	
Farbänderung: Störend - Nicht störend	x	x	x	10024 Kelvin

Die Farbabweichung wurde mit 76%iger Vorhersagewahrscheinlichkeit eines Wertes ab 32 Mired und mehr als „verfremdet“ klassifiziert. Die Farbtemperatur in der Arbeitsebene wird ab einem Wert von 6745 Kelvin mit 72,7%iger Wahrscheinlichkeit als „verfremdet“ beurteilt, die Farbtemperatur entlang der Wand mit 10024 Kelvin und einer Vorhersagewahrscheinlichkeit von 79,8%. Die Bewertung in Raum 5 zeichnet sich hier deutlich ab. Für die Wahrnehmung der Farbänderungen gibt es keine Schwellwerte, sehr wohl jedoch für eine mögliche Störung. Die Farbtemperatur in der Nutzerposition wird mit einer 83,1%igen Wahrscheinlichkeit bei 10024 Kelvin und darüber als „eher störend“ empfunden.

Die Schwellwertanalyse kann in diesem Fall bezogen auf die Farbwerte nur Tendenzen liefern, da zu wenige Farbmessungen tatsächlich durchgeführt wurden. Dies erklärt auch die hohen Werte im Bezug auf die Farbtemperaturschwellwerte.

7 Entwicklung und Anwendung eines Bewertungsverfahrens

7.1 Hintergrund

Bautypologie, Grundriss- und Fassadengestaltung sowie die Auswahl der notwendigen Tageslichtsysteme beeinflussen die Tageslichtqualität in Innenräumen erheblich. Die in den letzten Jahren hinzugewonnenen Kenntnisse über die Wirkung des Tageslichtes auf den Menschen (Kapitel 1.3) sowie die Komplexität der in den letzten Jahren entwickelten Tageslicht- und Lichtlenksysteme (Kapitel 1.4.3.3) verlangt nach einer überarbeiteten Bewertungsstruktur für den Einsatz in der Planungspraxis. Zudem fließt die Nutzerakzeptanz, also die Gewichtung, die ein Nutzer unbewusst im Umgang mit seinem Arbeitsumfeld und damit mit der Raumbeleuchtung vornimmt, in die in Kapitel 1.5.4.10 beschriebenen Tageslichtsignaturen nicht mit ein. Der Blendwert UGR (Unified Glare Rating) sowie andere Formeln (Kapitel 1.5.4.7) wurden für Kunstlichtquellen entwickelt und gelten für Blendung durch Tageslicht nicht. Bei der Überprüfung innerhalb dieser Studie konnte der DGI (Daylight Glare Index), für große uniforme Blendquellen durch entwickelt, keinen Aufschluss über Blendung durch Tageslicht geben. Blendung durch Tageslichtsysteme benötigen also einen anderen Bewertungsansatz; insbesondere aufgrund der Tatsache, dass Blendung durch Tageslicht höhere Leuchtdichten akzeptiert werden als dies bei Kunstlicht der Fall ist. Dazu kommt, dass bisher der Sonnenschutz hinsichtlich der Tageslichtnutzung meist nicht in aktivem, also geschlossenem Zustand bewertet wurde. Im Gesamtzusammenhang für einen Büroarbeitsplatz und dem daraus resultierenden Energieverbrauch für Beleuchtung und Kühlung spielen jedoch sowohl das Tageslicht bei bedecktem Himmel mit offenen, nicht aktiven Systemen als auch die aktiven Systeme bei besonnter Fassade eine Rolle.

Die Befragungen innerhalb der hier vorgestellten Studie konnten Aufschluss geben über die Akzeptanz und Bewertung von Sonnenschutz- und Lichtlenksystemen (subjektive Bewertungen) bzw. der resultierenden Raumbeleuchtung (objektive lichttechnische Messungen). Entsprechend konnten abhängige Messgrößen herausgefiltert und so in eine Bewertungsmethode integriert werden. Das hier vorgestellte Verfahren bietet einen ersten übergreifenden Bewertungsansatz, insbesondere sonnige Himmelszustände und damit aktive Sonnenschutzsysteme und subjektive Bewertungskriterien in eine in der Planungspraxis einsetzbare Matrix einzuschließen.

7.2 Entwicklung des Verfahrens

7.2.1 Vorgehensweise

Dem zu entwickelnden Bewertungsschema werden Messwerte zu Grunde gelegt, die innerhalb der Studie zeitgleich mit Befragungen aufgenommen wurden. Ein direkter Vergleich sehr unterschiedlicher Systeme unter genau gleichen Bedingungen konnte auf diese Weise angestellt werden. Dadurch wurde eine direkte Korrelation subjektiver und objektiver Bewertungskriterien möglich (Kapitel 6.2). Nur wenige Werte konnten aufgrund des Messprogramms während der Befragungen nicht direkt gemessen werden (z.B. der Tageslichtquotient, da überwiegend bei besonnter Fassade getestet wurde), hier können Ergebnisse des Verbundforschungsprojektes „Licht in Büroräumen“ [MÜL b] zusätzlich verwendet werden. Die Messungen können zukünftig in der Planungsphase ersatzweise durch entsprechende Berechnungen, z.B. mit der Lichtberechnungssoftware Radiance [RAD], nachgewiesen oder aber in Modellräumen (Kapitel 1.5.3) unter realen Bedingungen aufgenommen werden.

Die Auswahl der Fragen für das Bewertungsschema basiert auf einer Untersuchung der Ergebnisse im Hinblick auf vorhandene signifikante Zusammenhänge zwischen Messwerten und Befragungen. Folgende Randbedingungen sollten dabei erfüllt werden:

- Signifikante Unterschiede aus den Ergebnissen der subjektiven Befragungen in den Einzelräumen (Kapitel 5.3)
 - > Begründung: Nur so lässt sich eine systembezogene Charakterisierung erreichen.
- Vorhandensein mindestens einer aus der Faktorenanalyse herausgefilterten signifikanten Messgröße (Kapitel 6.2)
 - > Begründung: Wenn keine Befragungen möglich sind, können durch gemessene oder berechnete Werte entsprechende Tendenzen festgelegt werden.
- In allen Räumen gleiche Tendenz der signifikanten Messgröße (Kapitel 6.2)
 - > Begründung: Viele subjektive Urteile sind abhängig davon, ob es sich um ein reines Sonnenschutzsystem oder aber ein Lichtlenksystem handelt. Um die Bewertungsmatrix allgemein gültig zu entwickeln müssen Abhängigkeiten die gleiche, positive oder negative, Tendenz aufweisen.

Auf Basis der genannten Kriterien wurde eine Auswahl der im Fragebogen integrierten Fragen getroffen. Im Ergebnis konnten jeweils zwei bis drei Fragen bzw. Messgrößen pro Kategorie in das Bewertungsschema mit einfließen. Die Kategorien Farb- und Raumwirkung, Privatheit, Arbeitsplatz und Ästhetik konnten diese Kriterien nicht erfüllen, daher werden hierzu nur die subjektiven Urteile genutzt. Eine Übersicht über die in der Matrix verwendeten Fragen pro Kategorie findet sich im Anhang (Kapitel 12.5, Tabelle 12.5-1).

Für die Entwicklung des Bewertungsschemas wurden die aus den Befragungen erhaltenen Antworten unterschiedlicher Fragearten und Skalen (Kapitel 4.3.3) umgerechnet auf eine Skala von 1 (schlechteste Bewertung) bis 6 (beste Bewertung), um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Da es sich insgesamt um qualitativ eher hochwertige Systeme handelt, die in jedem Fall besser sind als kein oder ein konventioneller Sonnenschutz, wurde die Skala im Gegensatz zu vorangegangenen Bewertungsmatrizen [DIA] auf sechs Skalenpunkte erweitert, wie auch in anderen Beispielen schon gezeigt [SIC a]. Die Umrechnung erfolgt auf Basis einer linearen Transformation, je nach Frageart in umgekehrter direkter Korrelation (bei den Fragen, die mit Noten beantwortet wurden), über die Prozentanteile der Antworten (bei den Fragen, die mit Ja oder Nein beantwortet wurden) oder aber über die Umrechnung von sieben Skalenpunkten der bipolaren Skalen auf die sechs Skalenpunkte der Benotung. Einige exemplarische Beispiele der Umrechnung finden sich in Tabelle 7.2-1.

Tabelle 7.2-1: Beispielhafte Umrechnung der Befragungsergebnisse

Frage	Art der Antwort	Schritte	Rechenweg	Ergebnis pro Raum						
				Raum 1	Raum 2	Raum 3	Raum 4	Raum 5	Raum 6	alle Räume
Temperatur im Raum	Zu niedrig - richtig - zu hoch	Ergebnis von: zu hoch	Anteile Ergebnis in %	35,3%	51,0%	28,8%	32,7%	21,6%	19,6%	31,5%
		Umkehrung auf "nicht zu hoch"	100% - Wert	64,7%	49,0%	71,2%	67,3%	78,4%	80,4%	68,5%
		Umrechnung auf Skalenpunkte mit Faktor	Skalenpunkt 6 / 100%	3,9	2,9	4,3	4,0	4,7	4,8	4,1
Wirkung Tageslicht	1 Dunkel - 7 Hell	Ergebnis Mittelwert		4,9	5,4	4,4	3,8	3,5	4,2	4,4
		Umrechnung auf Skalenpunkte mit Faktor	Skalenpunkt 6 / 7 Punkte der bipolaren Skala = Faktor und Ergebnis * Faktor	4,2	4,6	3,8	3,3	3,0	3,6	3,7

Die aus der Faktorenanalyse hervorgegangenen Ergebnisse der Messungen wurden analog durch lineare Transformation auf eine Sechserskala umgerechnet. Dabei wurde der in den Befragungen jeweils am besten bewertete

Mittelwert im Raum je auf den Skalenpunkt 6 gesetzt, umgekehrt der am schlechtesten bewertete auf Skalenpunkt 1. Eine beispielhafte Umrechnung findet sich in Tabelle 7.2-2.

Tabelle 7.2-2: Beispielhafte Umrechnung der Messergebnisse

Messgröße	Einheit	Schritte	Rechenweg	Ergebnis pro Raum						
				Raum 1	Raum 2	Raum 3	Raum 4	Raum 5	Raum 6	alle Räume
Mittlere Leuchtdichte	cd/m ²			207	424	214	157	109	204	220
		Umrechnung auf Skalenpunkte, höchster Wert entspricht Skalenpunkt 6	Skalenpunkt 6 / höchster Wert = Faktor * Wert	2,9	6,0	3,0	2,2	1,5	2,9	3,1

In der Praxis werden hier sinnvollerweise Schwellwerte oder aber feste Messgrößen eingesetzt, anhand derer man die Bewertung vornehmen kann. Dies war jedoch nicht Ziel dieser Arbeit.

7.2.2 Anwendung auf Ergebnisse der Befragungen

Zunächst wurden alle Fragen in die Zusammenstellung integriert, die eine direkte Bewertung der Systeme beinhalten, sich systemabhängig zeigten, und aufgrund einer ausreichender Zahl an Antworten sinnvolle Ergebnisse lieferten. Darüber hinaus galten für die Auswahl der Fragen die in Kapitel 7.2 beschriebenen Kriterien. Für jede Kategorie wurde aus den relevanten Einzelfragen ein Mittelwert auf der Punkteskala gebildet. Tabelle 7.2-3 zeigt die Ergebnisse der Befragungen je Kategorie und Raum in tabellarischer Zusammenfassung, die höchste Punktzahl und damit die jeweils beste Bewertung ist grau markiert. Raum 2 (Lichtlenkglas) bekommt bei den meisten Kategorien beste Bewertungen, Raum 1 (konzentrierende Hologramme und Blendschutz) bekommt insgesamt den niedrigsten Wert von 3,3 auf der Punkteskala (was einer mittleren Bewertung entspricht).

Tabelle 7.2-3: Zusammenstellung der Punktebewertung aus den Befragungen tabellarisch

Zusammenstellung Befragungen							
	Raum 1	Raum 2	Raum 3	Raum 4	Raum 5	Raum 6	Alle Räume
TEMPERATUR	3,9	2,9	4,3	4,0	4,7	4,8	4,1
AUSSICHT	3,5	2,0	1,6	1,7	3,3	1,7	2,0
BLENDUNG	3,8	4,6	3,7	4,2	4,6	4,0	4,3
FUNKTION	3,3	4,8	3,9	4,6	3,8	4,2	4,0
HELLIGKEIT	4,1	4,7	3,7	3,5	3,3	3,5	3,8
LICHTLENKUNG	2,0	4,9	4,3	4,5	2,3	5,2	3,9
WIRKUNG	2,5	4,3	4,2	3,6	3,0	3,8	3,7
PRIVATHEIT	1,9	4,9	5,0	4,8	2,8	4,8	4,0
ARBEITSPLATZ	3,8	1,7	1,0	1,1	3,5	1,4	2,6
ÄSTHETIK	4,2	3,0	2,7	2,6	3,5	2,5	3,1
Mittelwert aller Kategorien	3,3	3,8	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6

Bezieht man für die Sonnenschutzsysteme in Raum 1 und Raum 5 die Kategorie Lichtlenkung nicht mit ein, da diese Systeme andere Funktionen aufweisen, so ändert sich nur der Wert in Raum 5 um einen zehntel Skalenpunkt nach oben. Die Bewertung für Raum 1 ändert sich hierdurch nicht.

Eine grafische Darstellung der Ergebnisse (in Anlehnung an die vorhandenen Tageslichtsignaturen) zu den analysierten Kategorien findet sich in Abbildung 7.2-1, getrennt nach reinen Sonnenschutzsystemen (Raum 1 und 5) und Lichtlenkssystemen (Raum 2, 3, 4 6). Die gestrichelte Linie beider Grafiken bildet den Mittelwert aus allen Kategorien und über alle Systeme hinweg, so dass Abweichungen nach oben und unten leicht erkennbar sind.

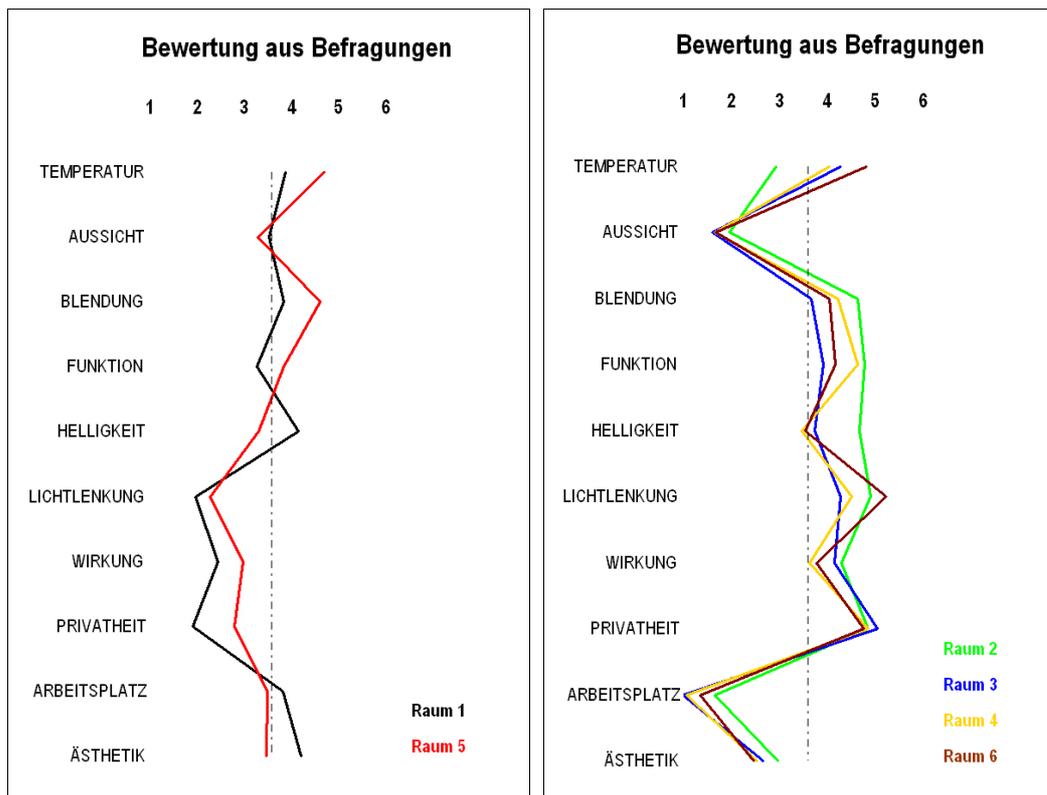


Abbildung 7.2-1: Bewertung aus den Befragungen: Links: Sonnenschutzsysteme; rechts: Lichtlenksysteme

Die Grafik zeigt deutlich die Unterschiede der subjektiven Beurteilungen von reinen Sonnenschutz- im Vergleich zu den Lichtlenksystemen auf; insbesondere in den Kategorien Aussicht, Helligkeit und Farbe/ Wirkung. Betrachtet man den Bezug zum Außenraum, so schneiden die beiden Sonnenschutzsysteme (in Raum 1 und 5) besser ab als die Jalousiesysteme; schaut man hingegen auf die Helligkeit, so erreicht das Lichtlenkglas in Raum 2 die höchste Punktzahl. Bei der Raumwirkung schneiden alle Jalousiesysteme mit höheren Punktzahlen ab als die reinen Sonnenschutzsysteme, da hier meist die Farbänderungen gegenüber dem Außenraum geringer ausfallen.

Einen Vergleich der Ergebnisse mit der in Kapitel 1.5.4.10 beschriebenen Bewertung des Diane Projektes [DIA] zeigt Abbildung 7.2-2. Deutlich wird die stärkere Differenzierung durch die innerhalb dieser Studie enthaltenen Kategorien und die Erweiterung auf sechs Skalenpunkte analog der Tageslichtsignatur von Sick [SIC a]. Zusätzlich ist die Gesamtnote der Probanden aus den Befragungen in die Grafik integriert.

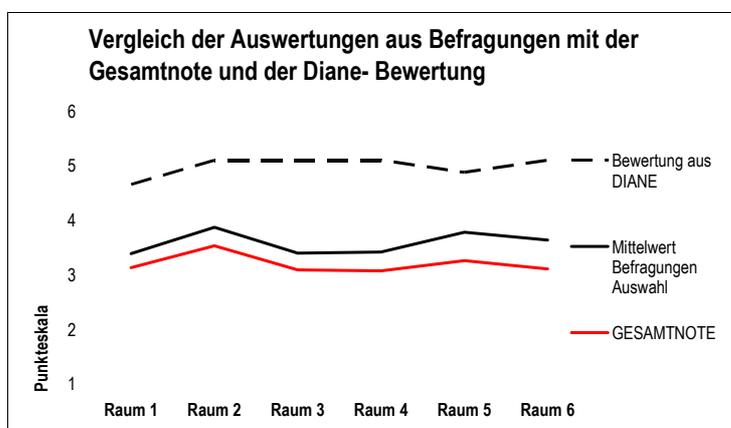


Abbildung 7.2-2: Vergleich der Befragungen dieser Studie mit den entsprechenden Ergebnissen der DIANE Skala [DIA]

Grundsätzlich kann für die einzelnen Kategorien eine Gewichtung einzelner Kriterien, beispielsweise der Raumhelligkeit auf Basis subjektiver Wünsche erfolgen; diese bekommt entsprechend einen höheren prozentualen Anteil an

der Gesamtbewertung zugewiesen. Beispielhaft zeigt Abbildung 7.2-3 verschiedene, von der Autorin beispielhaft frei gewählte Gewichtungen im Vergleich.

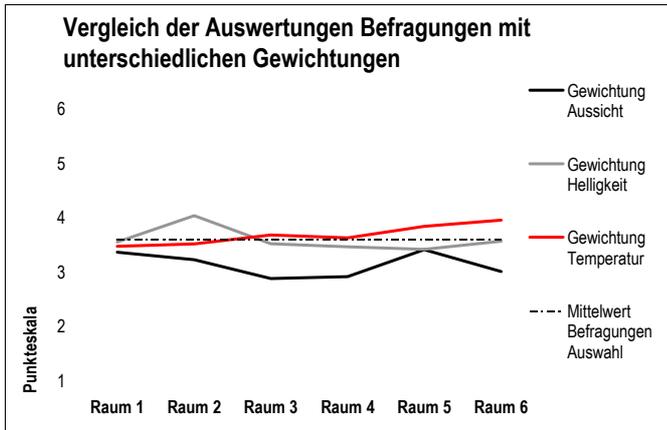


Abbildung 7.2-3: Vergleich unterschiedlicher Gewichtungen innerhalb der Punktebewertung aus den Befragungen

Dabei wurden jeweils für die Kategorien Aussicht, Helligkeit und Temperatur der Anteil an der Gesamtnote, die aus den zehn vorhandenen Kategorien gebildet wird, auf 37% gesetzt, die der jeweils anderen Kategorien auf 7%, so dass sich insgesamt 100% ergeben. Die größten Bandbreiten entstehen bei den Jalousiesystemen (Raum 2, 3, 4, und 6), die in ihren Gesamtpunkten bei einer höheren Gewichtung der Aussicht sinken. Nur geringe Unterschiede zeigt dagegen der Einfluss der reinen Sonnenschutzsysteme auf (Raum 1 und 5). Hier spiegeln sich einmal mehr die Auswirkungen der Qualität des Außenbezuges wieder. Am deutlichsten ist der Einfluss der Gewichtung „Helligkeit“ zu erkennen. Hier steigt die Punktzahl in Raum 2 gegenüber der Gewichtung „Aussicht“ deutlich an.

Diese Vorgehensweise erlaubt es, auf unterschiedliche Wünsche und Bedürfnisse eines Bauherren bzw. Nutzers eines Gebäudes einzugehen. Insgesamt zeigt die Anwendung des Verfahrens auf die Ergebnisse der Befragungen die Unterschiede der Beurteilung in den Räumen mit unterschiedlichen Systemen deutlich auf.

7.2.3 Anwendung auf Ergebnisse der Messungen

Die Messergebnisse wurden zunächst anhand der signifikanten und in den Räumen konsistenten Faktoren zu den Kategorien zugeordnet, das heißt, jede Kategorie (mit Ausnahme der Kategorien Privatheit, Gesamtbewertung und Ästhetik, für die keine Faktorenanalyse durchgeführt wurde) wird repräsentiert durch eine oder mehrere Messgrößen, die je nach Abhängigkeit (positiv oder negativ) auf die Punkteskala umgerechnet wurden (Kapitel 7.2). Tabelle 7.2-4 zeigt die Zusammenfassung tabellarisch mit den jeweils höchsten Punktzahlen, also den besten Bewertungen, grau hinterlegt. Angegeben wurden außerdem die jeweils in die Matrix integrierten Messgrößen (auf Basis der möglichst in allen Räumen konsistenten, also in gleicher Richtung auftretenden, Abhängigkeit) genannt.

Tabelle 7.2-4: Zusammenstellung der Punktebewertung aus den Messungen bezogen auf die Kategorien tabellarisch

Zusammenstellung Messungen							
	Raum 1	Raum 2	Raum 3	Raum 4	Raum 5	Raum 6	Alle Räume
TEMPERATUR: tempi	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
AUSSICHT: L2: MW Pos 2	2,9	6,0	3,0	2,2	1,5	2,9	3,1
BLENDUNG: L3: Max Pos 2	3,5	2,8	1,1	1,4	4,7	1,0	2,4
FUNKTION: MP Aug, SQ Aug	2,5	3,5	3,7	3,5	3,2	3,4	3,3
HELLIGKEIT: Mp Aug, SQ Aug, SQ A1, MW Pos 3	3,9	4,8	4,2	4,2	2,2	4,1	3,9
LICHTLENKUNG: D1, Imkdur2	2,1	6,0	2,4	2,0	1,3	2,6	2,7
WIRKUNG: Farbwiedergabe Nutzerpos	5,7	5,6	6,0	5,9	5,8	6,0	5,8
Mittelwert aller Kategorien	3,8	5,0	3,8	3,6	3,5	3,7	3,9

Wie bei der subjektiven Bewertung aus den Befragungen erhält Raum 2, ausgestattet mit dem Lichtlenkglas, die höchste Punktzahl. Im Bezug auf die Innenraumtemperatur konnten innerhalb dieser Studie thermische Werte in den Räumen nicht getrennt gemessen werden, sondern nur einmal für alle Räume. Da die subjektive Bewertung jedoch sehr unterschiedlich ausfällt, wird die Innenraumtemperatur trotzdem in die Bewertung eingegliedert.

Abbildung 7.2-4 zeigt den Vergleich der Punktebewertung aller Systeme über den Kategorien für jeden Raum auf. Deutlich ist der Unterschied der Ausschläge im Vergleich zu den Befragungsergebnissen zu erkennen. Möglicherweise bietet hier die Integration von Schwellwerten oder aber festen Definitionen von Messgrößen hier Optimierungspotential. Dies konnte jedoch im Rahmen dieser Dissertation nicht durchgeführt werden. Die Auswertungen zeigen beispielsweise bei der Aussicht eine deutliche Diskrepanz zu den Befragungsergebnissen, obwohl die dazugehörige Messgröße (Leuchtdichtemittelwert) in der Faktorenanalyse signifikant abhängig war. Stärkere Unterschiede als bei den Befragungen zeigen sich auch zwischen den beiden Sonnenschutzsystemen (Abbildung 7.2-4 links) oder im Bezug auf Raum 2 (Abbildung 7.2-4 rechts).

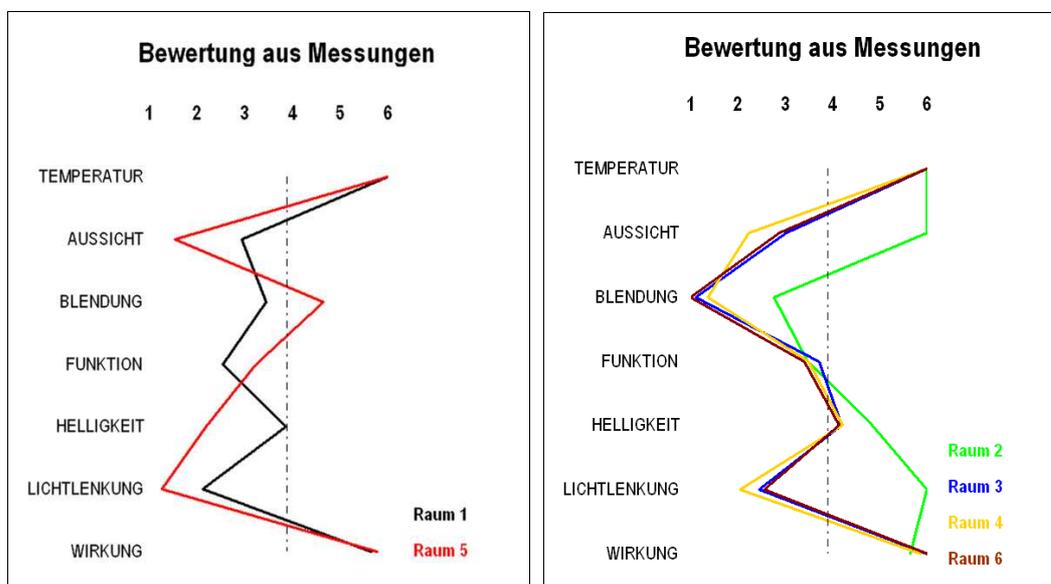


Abbildung 7.2-4: Bewertung aus den Messungen: Links: Sonnenschutzsysteme; rechts: Lichtlenkssysteme

Darüber hinaus wurden, entsprechend der Befragungen (Kapitel 7.2.2), Gewichtungen zu den Themen Aussicht, Helligkeit und Temperatur durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Prioritäten deutlich zu machen. Die Höhe und Auswahl der Gewichtung ist dabei von der Autorin frei gewählt. Je einer dieser Kategorien kommt in der Gesamtbewertung mehr Priorität zu (34% zu 11%). Die Ergebnisse lassen sich in Abbildung 7.2-5 ablesen.

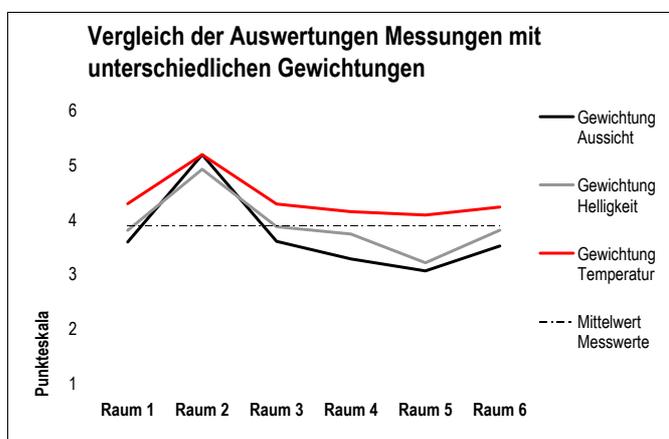


Abbildung 7.2-5: Vergleich unterschiedlicher Gewichtungen innerhalb der Punktebewertung aus den Messungen

Bei der Gewichtung "Helligkeit" im Bezug auf die gemessenen Werte fällt der Unterschied im Gegensatz zu den Ergebnissen der Befragungen (Abbildung 7.2-3) nicht so deutlich aus, da in Raum 2 sehr viel höhere Werte gemessen wurden. Berücksichtigt man in diesem Zusammenhang, dass die Raumhelligkeit einen direkten Einfluss auf den Stromverbrauch durch künstliche Beleuchtung, den Kühlenergieverbrauch und damit auf Kosten hat (Kapitel 1.4.4), so muss diesem Thema sicher einige Priorität eingeräumt werden. Dazu kommt der noch nicht vollständig geklärte Einfluss auf Produktivität und Gesundheit des Nutzers (Kapitel 1.3.9).

Wichtig für eine Bewertungsskala ist der Bezug zu gemessenen Werten, da aufgrund des hohen Aufwandes nicht immer Befragungen durchgeführt werden können. Grundsätzlich können die Systeme durch die ausgewählten Messgrößen gut charakterisiert werden, wie Abbildung 7.2-6 an einem Vergleich der Punktbewertungen aus den ausgewählten Befragungsergebnissen und den dazugehörigen Messgrößen zeigt.

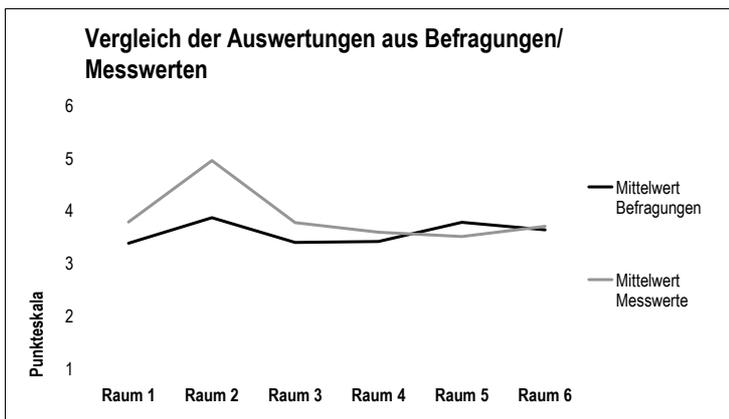


Abbildung 7.2-6: Vergleich der Ergebnisse aus der Punktematrix bezogen auf die Ergebnisse der Befragungen und Messungen

Die leicht unterschiedlichen Durchschnittswerte für ein jedes System im Raum begründen sich in der Art und Weise, wie Ergebnisse aus Messungen auf Skalenpunkte umgerechnet wurden. Die Bewertungen aus den Messwerten sind nach objektiven Kriterien in Raum 2 sehr viel höher, werden aber subjektiv zwar hoch, jedoch nicht ganz so extrem bewertet. Umgekehrt ist es bei Raum 5, in dem die Messwerte und somit auch die Punkte in der Matrix geringer ausfallen, dafür die subjektive Betrachtung ein wenig besser, was in der verbesserten Aussicht zu begründen ist. Hier ist noch Optimierungspotential vorhanden, welches eine genauere Charakterisierung möglich macht. So könnten zum Beispiel anstelle von absoluten Messwerten Schwellwerte in die Matrix integriert werden, die auch etwa „zu hohe“ Beleuchtungsstärken entsprechend bewerten könnte. Auf diese Weise könnten für bestimmte Messgrößen feste Bereiche mit festen Punktzahlen festgelegt werden, etwa für die zu erreichende Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene.

7.3 Eine Signatur für komplexe Tageslichtsysteme

Um eine in der Praxis anwendbare Signatur zu erhalten wird nun aus vorhandenen und ergänzten Werten eine erweiterte Bewertungsmatrix aufgestellt. Dabei werden zusätzliche Messgrößen und subjektive Kriterien integriert, die, wie in Kapitel 7.2 beschrieben, eine objektive Messung für das Ergebnis subjektiver Eindrücke zulassen.

Tabelle 7.3-1 zeigt eine Zusammenfassung der auf Basis der vorhandenen Tageslichtsignaturen zusätzlich vorgeschlagenen Bewertungskriterien im Vergleich.

Dabei bezieht sich die Einfachheit auf die Montage vor Ort und die Aufwendungen für die Wartung von Systemen und damit unmittelbar auf die Kosten. Die Aussicht kann auf Basis einer Sichtprüfung erfolgen und sorgt für Zufriedenheit und Produktivität (Kapitel 2.2.6).

Tabelle 7.3-1: Vorschlag der Autorin zur Erweiterung vorhandener Tageslichtsignaturen

Bewertungskriterien	Messgrößen bzw. Art der Bewertung	Daten von/ Auswirkung auf	repräsentierte Kategorie
Einfachheit	Sicht	Hersteller / Funktion und Kosten	[DIA]
Aussicht/ Außenbezug	Sicht/ Befragungen	Hersteller / Zufriedenheit	Ausblick
Steuerung/ Regelung	Sicht/ Befragungen	Hersteller / Kosten	Funktion
Sonnenschutzfunktion	g-Wert geschlossen	Hersteller/ Innenraumtemperatur	Temperatur
	vertikale Beleuchtungsstärke am Auge, Sonnenlichtquotient am Auge	Messungen / Innenraumtemperatur	Temperatur, Funktion
Blendschutzfunktion	Maximale Leuchtdichte Nutzerposition, vertikale Beleuchtungsstärke am Auge	Messungen / Zufriedenheit, Produktivität	Blendung
	Sonnenlichtquotient Arbeitsebene fensternah und in 4m Raumtiefe	Messungen / Zufriedenheit, Produktivität, Lichtverteilung	Helligkeit
Raumhelligkeit	Leuchtdichtemittelwert des Gesamtraumes mit Sonnenschutz	Messungen / Zufriedenheit, Produktivität, Lichtverteilung	Helligkeit
	Tageslichtquotient mittel und Tageslichtquotient 4m Raumtiefe	Messungen, Berechnungen / bedeckter Himmel	[SIC]
	bei Lichtlenksystemen Leuchtdichtemittelwert aus Nutzerposition	Messungen / Zufriedenheit, Produktivität, Lichtverteilung	Lichtlenkung
Lichtfarben	Farbwiedergabewert an Nutzerposition	Messung / Raumwirkung	Farbe/ Raumwirkung
Tageslichtautonomie	Berechnung	Berechnungen / Energieverbrauch, Kosten	[SIC]
Ästhetik/ Privatheit	Sicht/ Befragungen	Hersteller / Zufriedenheit, Repräsentation	Ästhetik/ Privatheit

Steuerung und Regelung sollten so einfach wie möglich sein, teilweise automatisiert, aber in jedem Fall durch den Nutzer individuell einstellbar (Kapitel 1.4.3.4 und 2.2.2). Die Sonnenschutzfunktion kann mit dem in der Praxis genutzten g- Wert beschrieben werden. Aus dieser Studie sind außerdem für die subjektive Beurteilung der Sonnenschutzfunktion die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge sowie der dazugehörige Sonnenlichtquotient als repräsentativ hervorgegangen. Die Blendschutzfunktion müsste idealerweise auf Basis von Grenzwerten erfolgen. Innerhalb dieser Arbeit konnten die maximale Leuchtdichte aus der Nutzerposition sowie die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge ebenfalls signifikante Hinweise auf Blendung liefern; diese liegen wesentlich höher als in geltenden Regelwerken (1000 cd/m^2) (Kapitel 6.2.5).

Für die Beurteilung der Raumhelligkeit sind unterschiedliche Kriterien je nach Fragestellung wichtig (Kapitel 2.2.4 und 6.2.7). Wenn die Schwelle des Kunstlichtes eine Rolle spielt, so hat sich der Sonnenlichtquotient am fensternahen Arbeitsplatz als Messgröße gezeigt, bei einer hellen Raumwirkung spielt die Deckenbeleuchtungsstärke eine Rolle, nicht aber diejenige am Arbeitsplatz, besser geeignet ist hier die vertikale Beleuchtungsstärke an der rückwärtigen Wand oder aber die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge und der dazugehörige Sonnenlichtquotient; dieser zeigt sich auch bei der Bewertung der "ausreichenden Helligkeit" signifikant. Der Leuchtdichtemittelwert des Gesamtraumes, also von der rückwärtigen Wand aus, kann bezogen auf die Kategorie Helligkeit ebenfalls entsprechende Aussagen liefern. Bei Lichtlenksystemen hat sich zusätzlich der Leuchtdichtemittelwert aus Nutzerposition als signifikant ausgezeichnet, da er am besten das Blickfeld bzw. Umfeld des Nutzers reflektiert. Dagegen ist der Tageslichtquotient eine gängige Größe, die bei bedecktem Himmel eine wichtige Rolle spielt.

Neu integriert wurde die Bewertung der Lichtfarbe, die anhand des Farbwiedergabewertes angegeben werden kann. Absolute Farbtemperaturen wären vermutlich ebenfalls eine gute Größe, die jedoch innerhalb dieser Studie aufgrund einer zu geringen Anzahl an Messungen statistisch nicht nachgewiesen werden konnte (Kapitel 6.2.9). Die Tageslichtautonomie repräsentiert die Wirtschaftlichkeit bezogen auf den Kunstlichteinsatz und kann durch Berechnungen erfolgen (Kapitel 1.5.4.6). Ästhetik und Privatheit bilden Kriterien, die für den Nutzer eines Gebäudes von Wichtigkeit sind und einen Einfluss auf die Zufriedenheit haben.

8 Diskussion

8.1 Ergebnisse Messungen

8.1.1 Beleuchtungsstärkemessungen

Messungen der Beleuchtungsstärke wurden am fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene, horizontal an der Decke und vertikal an der rückwärtigen Wand und in Augenhöhe in Richtung Fenster durchgeführt (Kapitel 4.2.1). Die unterschiedlichen Fassadensysteme in aktivem oder geschlossenem Zustand bei besonnter Fassade weisen dabei eine sehr große Bandbreite an resultierenden Messwerten auf (Kapitel 5.2.2). So traten beispielsweise am Arbeitsplatz zwischen 58 Lux und 4442 Lux auf, in Augenhöhe zwischen 91 Lux und 6834 Lux. Diese Werte repräsentieren die unterschiedlichen Funktionsweisen von einer reinen Sonnenschutzwirkung, also der Reduktion der Lichttransmission, bis hin zu einer sehr starken Lichtlenkung an die Decke und damit in die Raumtiefe. Sie repräsentieren auch die unterschiedlichen Tageslichtverhältnisse im Innenraum aufgrund jahreszeitlicher, tageszeitlicher und wetterbedingter Schwankungen.

Bisher werden in den Regelwerken lediglich Mindestwerte für horizontale Beleuchtungsstärken gefordert (Kapitel 1.5.3), die das für die Sehfunktion notwendige Lichtniveau sicherstellen sollen (Kapitel 1.3.1). Aus den im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Messungen ergeben sich beachtenswerte Zusammenhänge im Bezug auf vertikale Beleuchtungsstärken, wie sie etwa für die Synchronisation des biologischen Rhythmus benötigt werden (Kapitel 1.3.9). Abbildung 8.1-1 zeigt die Mittelwerte der gemessenen Beleuchtungsstärken horizontal auf der Arbeitsebene, vertikal in Augenhöhe sowie an der rückwärtigen Wand bei geschlossenen Systemen und sonnigen Verhältnissen im Vergleich auf.

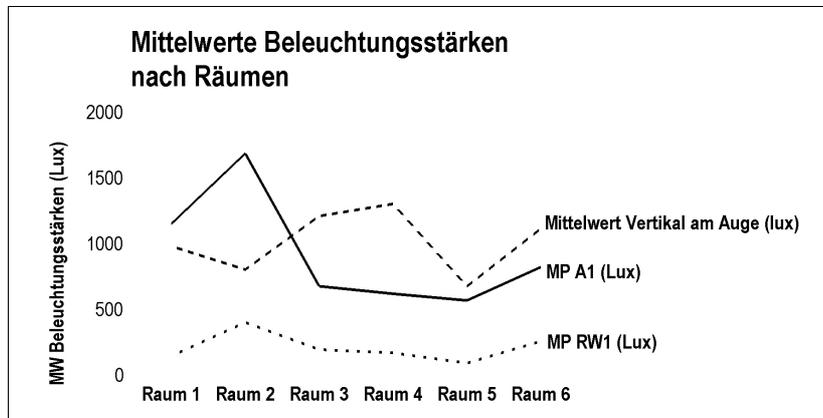


Abbildung 8.1-1: Gegenüberstellung der horizontalen und vertikalen Beleuchtungsstärken nach Räumen getrennt (Mittelwerte)

Deutlich wird, dass ein System, welches eine starke Lichtlenkfunktion aufweist (Lichtlenkglas in Raum 2) und damit auf der Arbeitsebene und in der Raumtiefe ein hohes Lichtniveau erzeugt, nicht unbedingt auch hohe vertikale Beleuchtungsstärken am Auge liefert. Im Gegensatz dazu kann ein anderes System (beispielsweise die Jalousiesysteme in Raum 3, 4 oder 6) dieses Kriterium unter Umständen besser erfüllen. Die höhere Komponente an vertikalen Beleuchtungsstärken durch Tageslicht im Gegensatz zu Kunstlichtquellen, die meist an der Decke eines Raumes angebracht sind, wurde in anderen Studien deutlich hervorgehoben [ARI a und b].

Im Kapitel 2.2.5 wurden einige Studien zitiert, die sich mit den maximal akzeptablen vertikalen Beleuchtungsstärken beschäftigt haben. Dabei wurden Schwellwerte zwischen 1000 Lux [OST] und über 3000 Lux genannt [VEL]. In den hier vorliegenden Auswertungen wurden bei geschlossenen Systemen und besonnter Fassade nur vereinzelt Messwerte über 1500 Lux vertikaler Beleuchtungsstärke in Augenhöhe erreicht. Schwellwerte konnten ebenfalls für

über 3000 Lux vertikaler Beleuchtungsstärke definiert werden (Kapitel 6.3.5). Unter Berücksichtigung der biologischen Aktivierung sollte in Zukunft die vertikale Komponente sowohl für Tageslicht (auch bei geschlossenen Tageslichtsystemen) als auch für Kunstlichtanwendungen in die Gebäudeplanung integriert werden. Dies forderte eine Anpassung der geltenden Mindestwerte sowohl für das Lichtniveau als auch für die Lichtrichtung.

8.1.2 Leuchtdichtemessungen

Leuchtdichtemessungen wurden aus Nutzerpositionen (zum Fenster und zum Bildschirm gerichtet) und von der rückwärtigen Wand aus durchgeführt (Kapitel 4.2.2). Die mittlere Leuchtdichte ist durchgängig in Raum 2 (Lichtlenkglas) am höchsten und in Raum 5 (elektrochromes Glas) am niedrigsten (Kapitel 5.2.3). Auch hier lässt sich die Lichtlenkfunktion deutlich ablesen. Berücksichtigt man, dass helle raumbegrenzende Oberflächen zu einer positiven Beuteilung der Nutzer beiträgt (Kapitel 2.2.4 und 2.2.8), so tragen alle Lichtlenksysteme (Raum 2, 3, 4 und 5) positiv zu diesem Kriterium bei.

Die maximalen Leuchtdichten weisen insgesamt eine sehr große Bandbreite, insbesondere in Raum 1 sowie bei den Jalousiesystemen auf (Kapitel 5.2.3). Das Lichtlenkglas (Raum 2) trägt aus den Nutzerpositionen heraus zu einer Reduzierung der Varianzen bei und verspricht, weniger Blendung zu erzeugen, ebenso das elektrochrome Glas in Raum 5 in eingeschaltetem, also dunklem Zustand. Abbildung 8.1-2 zeigt einen Vergleich der mittleren und maximalen Leuchtdichten während der Befragungen bei geschlossenen Systemen. Deutlich zu erkennen ist, dass ein Raum mit hohen mittleren Leuchtdichten nicht unbedingt auch hohe Maximalwerte aufweisen muss (Raum 2).

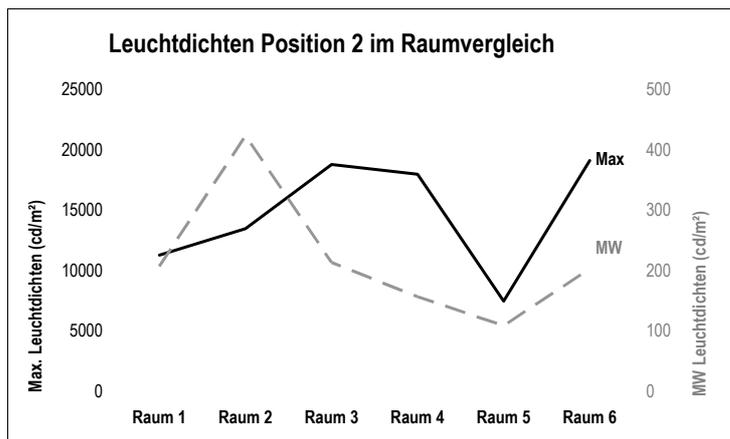


Abbildung 8.1-2: Vergleich der mittleren und maximalen Leuchtdichten in den Messräumen (Mittelwerte)

Bei der Betrachtung einzelner Flächen im visuellen Umfeld (Lichtlenkbereich, Sichtbereich, Arbeitsfläche) zeigen sich insbesondere im Lichtlenkbereich teilweise sehr hohe Werte um bis zu 25 000 cd/m^2 (Kapitel 5.2.3), aber auch der Sichtbereich weist Werte um bis zu 14 000 cd/m^2 auf. In der Praxis geht man davon aus, dass Leuchtdichten bis zu 4000 cd/m^2 bei Tageslicht selbst an Computerarbeitsplätzen unproblematisch sind [NEV a und b]. Hier sind mögliche Blendquellen zu erwarten, die im Bezug zu den Nutzerakzeptanzuntersuchungen detailliert dargestellt wurden (Kapitel 6.2.5). In den Räumen 1, 3 und 6 trat am häufigsten Blendung auf (Kapitel 5.3.5.3), dabei war die Ursache in Reflexen auf den Systemen selbst oder auf der Arbeitsfläche begründet.

8.1.3 Farbmessungen

Farbmessungen wurden an wenigen Tagen bei bedeckten und sonnigen Verhältnissen durchgeführt (Kapitel 4.2.3). Dabei kamen die aus den Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessungen bekannten Messpositionen zum Einsatz (Kapitel 4.2.1). Die fensternahen Messpunkte in der Arbeitsebene und diejenigen in der Nutzerposition repräsentieren diejenigen Positionen, bei denen die größten Abweichungen von den Außenbedingungen aufgetreten

sind. In der Raumtiefe gleichen sich die Farben aufgrund von Reflexion und Absorption an den Raumbooberflächen wieder an. Der Blendschutz hatte kaum einen Einfluss auf die im Innenraum gemessenen Farbwerte und kann daher vernachlässigt werden (Kapitel 5.2.4.3).

Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a (Kapitel 1.5.4.8) im Referenzraum ohne Sonnenschutzsystem liegt an den gemessenen Punkten im Bereich der Stufe 1A (Kapitel 5.2.4.4). Alle Messungen in den Räumen mit geschlossenen Systemen zeigten im Sommer ebenfalls die Farbwiedergabestufe 1A, mit Ausnahme von Raum 4 (ausgestattet mit Weißlichthologrammen), bei dem der Wert im Bereich der Stufe 1B liegt. Im Winter liegt dieser auch in Raum 2 in der Stufe 1B. Ein leicht erhöhter Blauanteil (etwa 7300 Kelvin) gegenüber den gemessenen Außenwerten (etwa 5900 Kelvin) war am fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene auch ohne Sonnenschutzsystem, also nur unter Einfluss der Wärmeschutzverglasung erkennbar.

Wenig Abweichung in den Farbtemperaturen (Kapitel 5.2.4.4) gegenüber dem Referenzraum ohne Sonnenschutz zeigt Raum 1 mit konzentrierenden Hologrammen und Fotovoltaik (etwa 7000 Kelvin), obwohl dieser in Verbindung mit den Nutzerbefragungen mit Farbänderungen in Verbindung stand. Die Ursache liegt in farbigen Reflexen, die durch die lenkenden Hologramme des Systems entstehen können. Raum 2 (Lichtlenkglas) zeigte bei der Betrachtung der Farbtemperaturen Werte um 5500K mit einer relativ gleichmäßigen Verteilung auch in der Raumtiefe. Ähnliche Werte weist Raum 6 auf. Diese beiden Räume liegen mit den gemessenen Farbtemperaturen den Außenwerten am nächsten.

Raum 3 zeigt mit etwa 5000 Kelvin die niedrigsten Farbtemperaturen in der Arbeitsebene bei direkter Sonneneinstrahlung. Die stärksten Farbänderungen gegenüber dem Referenzraum ohne Sonnenschutz verzeichnet Raum 4 (Außenjalousie in Kombination mit Weißlichthologrammen). Durch die verschiedenen Winkelstellungen des Hologramms und durch die Reflektion von Spektralfarben an die Raumbooberflächen ergeben sich bei direktem Sonneneinfall ungleichmäßige Farbtemperaturverläufe (5500 - 8000 Kelvin). Durch das Einschalten des elektrochromen Glases in Raum 5 kühlt die Farbtemperatur im Innenraum stärker ab als in einem Raum ohne System (9000 – 10000 Kelvin in den fensternahen Bereichen). Ein Ausschalten des Systems bewirkt eine leichte Erwärmung.

Insgesamt zeigten sich Farbabweichungen von bis zu 70 Mired (Raum 5, bedeckter Himmel, kälter) und -65 Mired (Raum 3, direkte Sonneneinstrahlung, wärmer). Die Systeme beeinflussen die Lichtfarbe im Innenraum erheblich. In wie weit dies Auswirkungen auf die Nutzerakzeptanz hat, wird in Kapitel 8.2.8 diskutiert.

8.2 Ergebnisse Nutzerbefragungen

8.2.1 Arbeitsplatz

Innerhalb der Kategorie Arbeitsplatz wurden die vorhandenen Raumparameter wie Größe, Entfernung zum Fenster oder aber die Beurteilung der Offenheit eines Arbeitsraumes unter Einfluss der entsprechenden Systeme behandelt. Diese Kriterien, zusammengefasst als Raumzufriedenheit, wurden in früheren Untersuchungen ebenso wie die in Kapitel 2.2.1 diskutierte Raumtemperatur als ein Prädiktor für die Zufriedenheit der sensorischen Befindlichkeit genannt [HMG b].

Objektive und subjektive Kriterien werden von den Probanden bei der Beurteilung des Raumes und des Arbeitsplatzes deutlich unterschieden. Das „momentane Wohlbefinden“ sowie die Urteile über den Arbeitsplatz werden bei etwa 90% der Befragungen als „eher gut“ bewertet und werden ohne signifikante Unterschiede in den Räumen bewertet. Im Gegensatz dazu werden die Kriterien „offen“, „geschlossen“ und „eingeschlossen“ in den Räumen sehr unterschiedlich wahrgenommen (Kapitel 5.3.2). Hier zeigt sich deutlich der Zusammenhang mit den Eigenschaften der geschlossenen bzw. aktiven Systeme und vorhandener oder nicht vorhandener Aussicht, die in der interkatego-

riellen Analyse ausführlich dargestellt wurde (Kapitel 5.4.2). Dies wurde auch durch frühere Untersuchungen (Kapitel 2.2.6) bestätigt [SCHMI, MOO b, LIT]. Die einzige Ausnahme bezüglich der Beurteilung „offen“ wurde in Raum 2 (Lichtlenkglas) festgestellt, der gegenüber den anderen Räumen ohne Aussicht bei geschlossenen Systemen bessere Bewertungen erhält. Hier entsteht die These, dass fehlende Aussicht und damit der „eher geschlossene“ Raumeindruck zum Teil mit höherer Raumhelligkeit kompensiert werden kann. Bezogen auf die Jalousiesysteme in Raum 2, 3, 4 und 6 konnte dies mit statistischer Signifikanz ($p < 0,05$) nachgewiesen werden (Kapitel 5.4.2). Leichte Zusammenhänge scheint es zu geben zwischen dem Wohlbefinden der Probanden und der Beurteilung „eingeschlossen“. Je „eingeschlossener“ desto schlechter das Wohlbefinden und desto kleiner wird der Arbeitsbereich beurteilt. Dies bestätigt die Auswirkungen auf die sensorischen Befindlichkeiten.

Die Faktorenanalyse (Kapitel 6.2.2) zeigt im Bezug auf die Beurteilung der Entfernung des Fensters sowie die Urteile „offen“, „geschlossen“ und „eingeschlossen“ entsprechende Korrelationen mit Messwerten. Das Gesamturteil „offen“ wird bei hohen maximalen Leuchtdichten ausgesprochen, einzig in Raum 2 zeigt sich hier eine leicht gegenläufige Tendenz. Die Leuchtdichtemittelwerte wurden bei diesen Fragen nicht signifikant getestet und konnten keine eindeutige Tendenz mit der Art des Systems (Sonnenschutz- oder Lichtlenksysteme) aufweisen. Das Urteil „Eingeschlossen“ wird insgesamt vermehrt bei höheren Innenraumtemperaturen gefällt (Kapitel 6.2.2). Dieser Zusammenhang ist in den Räumen jedoch sehr unterschiedlich und findet seine Ursache hauptsächlich auf Basis der Ergebnisse in Raum 1, der sich in der subjektiven Beurteilung der Probanden stark abhängig von der Innenraumtemperatur zeigt. Insgesamt zeigt dieser Zusammenhang die Prägnanz der „Sichtbarkeit“ der Sonnenschutzfunktionen, die in Räumen mit Jalousiesystemen eher wahrgenommen wird [LIT].

Eine Schwellwertbestimmung war innerhalb dieser Kategorie nicht möglich (Kapitel 6.3.2).

8.2.2 Temperatur

Ebenso wie die Arbeitsumgebung wird die Innenraumtemperatur für die sensorische Befindlichkeit verantwortlich gemacht [HMG b]. Aber nicht nur die Temperatur im Raum, sondern auch die Außentemperatur sowie die Oberflächentemperaturen von verglasten Flächen spielen eine Rolle (Kapitel 2.2.1). Innerhalb dieser Kategorie wurde deshalb die Empfindung der Raumtemperatur, der Grad an Störung durch zu hohe Temperaturen und die Schutzfunktion der Systeme abgefragt.

Diese Fragen wurden von den Probanden unterschiedlich bewertet, so zeigte sich die niedrigste Schwelle bei der Bewertung der Innenraumtemperatur und die höchste Toleranz bei der Schutzfunktion, die mit 19,2% der Antworten als „nicht ausreichend“ betrachtet wurde (Kapitel 5.3.3.2). Die Bewertung der Innenraumtemperatur sowie der daraus resultierenden Störung und der Schutzfunktion der Systeme lag bei 70% bis 80% positiver Antworten. Unter Berücksichtigung der tatsächlich gemessenen Innenraumtemperaturen von teilweise über 30°C liegt dies in einem akzeptablen Bereich. Die Bewertung des subjektiven Wohlbefindens in Relation zur Temperaturempfindung weist signifikante Zusammenhänge auf ($p < 0,05$); dagegen konnte für die gemessene Raumtemperatur dieser Zusammenhang nicht verzeichnet werden (Kapitel 5.4.3). Das Temperaturempfinden wird also auf einer anderen Bewusstseinsbasis bewertet als dies die Raumtemperatur zeigt.

Obwohl die Räume thermisch nicht getrennt waren und deshalb die gleiche Innenraumtemperatur in allen Räumen gemessen wurde, zeigt die Befragung deutliche Unterschiede in der Bewertung (Kapitel 5.3.3.3). Raum 1 und Raum 2 wurden bei der Empfindung der Raumtemperatur am schlechtesten bewertet, in deutlicher Umkehrfunktion der Bewertung der Schutzfunktion. Der Grund ist in der Funktionsweise zu suchen, die insgesamt mehr „sichtbare“ Strahlung in den Innenraum lässt (Raum 1) bzw. in den höheren Oberflächentemperaturen der Scheiben (Raum 2). Am besten bezüglich der Bewertung der Innenraumtemperaturen schnitten Raum 5 und 6 ab, in der Bewertung der Schutzfunktion war dies Raum 3 mit nur 1,9% an Beschwerden. „Dunkel“ wird hier anscheinend mit „kühl“ assoziiert.

Einen weiteren Grund, die „sichtbare“ Schutzfunktion eines Systems nicht zu vernachlässigen [LIT], bildet die Korrelation der gemessenen Innenraumtemperatur mit der Bewertung der Schutzfunktion. Hier gab es keine signifikante Abhängigkeit. Das heißt, dass der eigentliche Zweck des Sonnenschutzes, nämlich gegen die Erwärmung des Raumes zu schützen, nicht in Abhängigkeit der Raumtemperatur gewertet wird. Dies ist insofern interessant, als dass Regelungs- und Steuerungssysteme meist auf die thermische Belastung reagieren, diese jedoch nicht das Kriterium für den Nutzer darstellt (Kapitel 6.2.3). Weitere relevante Faktoren bilden die Beleuchtungsstärkefaktoren M1 und M2, die die gemessenen Beleuchtungsstärken an der Decke, in der Arbeitsebene und an der rückwärtigen Wand, die Außenbeleuchtungsstärken sowie den Sonnenlichtquotienten am Arbeitsplatz beinhalten. Alle Zusammenhänge bis auf den Sonnenlichtquotienten am fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene zeigten sich insgesamt positiv abhängig. Eine „Behinderung durch Hitze“ wurde mit Ausnahme von Raum 2 bei niedrigen Sonnenlichtquotienten empfunden. Eine höhere Raumhelligkeit dagegen trug bei gleichen Innenraumtemperaturen zu mehr Zufriedenheit bei. Die vertikale Beleuchtungsstärke auf der Fassade konnte keine in den Räumen konsistenten Zusammenhänge liefern, sehr wohl aber die globale Außenbeleuchtungsstärke, je höher diese, desto eher fühlten sich die Probanden, aufgrund der höheren Solareinstrahlung, durch die Hitze gestört.

Die Farbfaktoren zeigten die Tendenz, dass gleiche Innenraumtemperaturen bei höheren Farbtemperaturen, also kühleren Farben, eher besser bewertet werden. Insgesamt sind die Ergebnisse jedoch aufgrund der geringen Anzahl an Messungen eher unklar und statistisch in Frage zu stellen. Die Literatur (Kapitel 2.2) konnte hierzu keine weiteren Hinweise liefern, so bleibt der Zusammenhang nur eine Tendenz, die Anlass gibt für weitere Untersuchungen.

8.2.3 Ausblick

Der Ausblick bildet eines der wichtigsten Kriterien bei der Beurteilung eines Arbeitsplatzes und trägt zur Akzeptanz und zum Wohlbefinden von Arbeitnehmern bei (Kapitel 1.3.4). Mit dem Ausblick in direkter Korrelation steht meist die Tageslichtverfügbarkeit im Innenraum, die dem Kunstlicht üblicherweise deutlich vorgezogen wird und ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf psychologische und physiologische Kriterien hat (Kapitel 1.3.7 und 2.2.6). Wichtig hierbei ist die Information, die mit dem Tageslicht bzw. einem Ausblick einhergeht, so zum Beispiel über das Wetter oder die Tageszeit [LAM].

Die einfache Auszählung (Kapitel 5.3.4) zeigt deutlich auf, dass eine vorhandene Verminderung des Ausblicks mit Sonnenschutz von 93% der Probanden negativ gesehen wird. Die Einschränkung der Tageslichtversorgung wurde mit 54% eher weniger kritisch bewertet. Die reinen Sonnenschutzsysteme (Raum 1 und 5) bieten in aktivem, das heißt geschlossenen Zustand, eine bessere Sichtverbindung nach draußen als die Jalousie- bzw. Lichtlenksysteme (Etwa 15% „Verminderung der Aussicht“ gegen über 80%). Die Positivurteile der Systemeigenschaften mit einer „ausreichenden Sichtverbindung nach draußen“ zeigen jedoch eine im Verhältnis schlechtere Bewertung der Aussicht bei den Sonnenschutzsystemen (Raum 1 und 5; nur etwas mehr als 60% Positivurteile). Hier spiegeln sich die in anderen Untersuchungen festgestellten Beurteilungen der Qualität der Aussicht wieder [INU, LUD, MARK a und b, MOO, SCHMI], die bei diesen Systemen aufgrund des zusätzlich verwendeten innen liegenden Blendschutzes oder aber aus konstruktiven Gründen eingeschränkt wird (Kapitel 2.2.6). Die Empfindung einer Verminderung des Tageslichtes zeigt abweichende Urteile gegenüber der Beurteilung der Sichtverbindung nach draußen. Bei den Lichtlenksystemen fällt die Beurteilung der Tageslichtverfügbarkeit im Verhältnis zur Beurteilung der Aussicht besser aus, bei den Sonnenschutzsystemen verhält es sich genau umgekehrt.

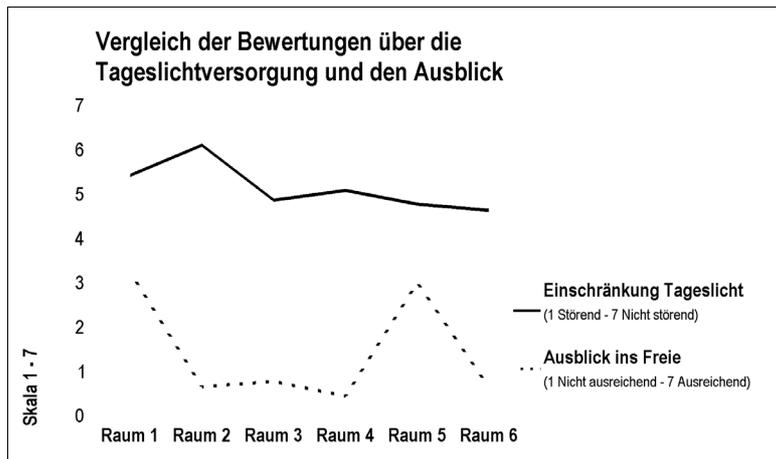


Abbildung 8.2-1: Vergleichende Darstellung der Bewertung der Aussicht und der Tageslichtverfügbarkeit (Mittelwerte)

Bemerkbare Wetterschwankungen gab es für 39% der Probanden, davon waren fast 90% eher nicht störend.

Die interkategoriale Analyse (Kapitel 5.4.5) zeigt in dieser Kategorie eine Abhängigkeit von Aussicht und Raumhelligkeit bei den Jalousiesystemen auf, das heißt, je „heller“, ein Raum empfunden wird, desto weniger stört die „Verminderung des Ausblicks“. Dies gilt in Abhängigkeit von den Außenbeleuchtungsstärken, was die Ergebnisse aus der Literatur bestätigt [BEG, VÖL, JUS], aber nicht für die Sonnenschutzsysteme (Raum 1 und 5). Für die Lichtlenksysteme wurde zusätzlich die Korrelation der Aussicht zur Beurteilung der Lichtlenkung untersucht (Kapitel 5.4.6). Eine wahrnehmbare Lichtlenkung kann demnach zur Kompensation einer fehlenden Aussicht beitragen. Ein Bezug zur Literatur konnte hier nicht gefunden werden, da bisher die Lichtlenkung in Akzeptanzuntersuchungen nicht direkt abgefragt wurde (Kapitel 2.2).

Die Faktorenanalyse zeigte Abhängigkeiten mit den Beleuchtungsstärkefaktoren M1, M3 und vermehrt mit den Leuchtdichtefaktoren. Ob eine Verminderung der Aussicht negativ wahrgenommen wurde, hing meist mit höheren Beleuchtungsstärken in der Arbeitsebene zusammen. Die Ursache lag vermutlich in den Außenbeleuchtungsstärken [BEG, VÖL, JUS], denn die Sonnenlichtquotienten in der Arbeitsebene und am Auge zeigten bei den Jalousie- und Lichtlenksystemen die umgekehrte Beziehung (Raum 2, 3, 4 und 6). Je mehr Licht also im Verhältnis zum Außenraum im Innenraum verfügbar ist, desto weniger stört die geringere Aussicht. Die maximale Leuchtdichte aus dem hinteren Raumbereich heraus zeigte ebenfalls signifikante Abhängigkeiten, je höher die Werte, desto weniger wurde die Verminderung des Ausblicks als negativ angesehen (mit Ausnahme von Raum 2).

Der Ausblick wurde bei höheren vertikalen Beleuchtungsstärken in allen Räumen mit Ausnahme von Raum 2, der im Verhältnis wesentlich geringere vertikale Beleuchtungsstärken aufwies, als „eher ausreichend“ empfunden (Kapitel 5.2.2); der dazugehörige Sonnenlichtquotient zeigte ebenfalls positive Abhängigkeiten bis auf Raum 2 und Raum 6, in denen höhere Sonnenlichtquotienten zu schlechteren Bewertungen führten. Die Leuchtdichten (Mittelwerte aus Messposition 2) lieferten für die Bewertung der Einschränkung des Tageslichtes die schlüssigsten Hinweise. Hier zeigt sich eine positive Abhängigkeit, das heißt, je höher die mittleren Leuchtdichten, desto weniger wurde eine Einschränkung des Tageslichtes empfunden (Ausnahme Raum 1) und „eher störend“ bewertet (alle Räume).

Die Schwellwertbestimmung war für direkte Fragen nach dem Ausblick nicht möglich. Die Frage nach der Störung durch eine Einschränkung des Tageslichtes brachte Schwellwerte für den Leuchtdichtemittelwert aus Nutzerposition 2 heraus; das heißt, mit einer Wahrscheinlichkeit von um die 80% wird bei 1121 cd/m² und darüber die Einschränkung des Tageslichtes durch das System als „nicht störend“ bewertet. Ebenso konnte ein Schwellwert für die mittlere Leuchtdichte aus dem Raumhintergrund definiert werden (141 cd/m²).

Insgesamt zeigte die Betrachtung der Kategorie, dass die Bewertung der Aussicht bzw. der Störung einer nicht vorhandenen Aussicht unter anderem von den vorhandenen Außenbeleuchtungsstärken abhängt, ein Aspekt, welcher bisher nur in Verbindung mit den gewünschten Beleuchtungsstärken untersucht worden war [BEG, VÖL, JUS]. Zusätzlich spielt die Qualität des Ausblicks (in den Räumen mit Sonnenschutzsystemen) eine wichtige Rolle [MARK a und b, LUD, INU, MOO b]. Ein fehlender oder eingeschränkter Ausblick kann nach den hier vorliegenden Untersuchungen in Räumen mit Lichtlenkung zumindest teilweise durch eine größere Raumhelligkeit, also höheren Leuchtdichten kompensiert werden.

8.2.4 Blendung

Blendung durch Tageslicht spielt an Computerarbeitsplätzen eine große Rolle (Kapitel 2.2.5). Wenngleich Blendung durch Tageslicht größere Akzeptanz erfährt als Blendung durch Kunstlicht [CHA, NEV a und b], wurde doch von einer Verschlechterung der Arbeitsleistung um bis zu 21% durch Blendung berichtet [HMG b]. Problematisch ist nach wie vor die Bewertung, denn bekannte Blendformeln (Kapitel 1.5.4.7) können auf komplexe Tageslichtsysteme nicht angewandt werden [IWA, MOO a, WIE c]. Fensterleuchtdichten von bis zu 4000 cd/m² wurden in der Literatur als unkritisch definiert [NEV], was deutlich über den geltenden Regelwerken (Kapitel 1.5.4.7) liegt. Bei Untersuchungen von Osterhaus [OST] wurden vertikale Beleuchtungsstärken von bis zu 3300 Lux ebenfalls als unkritisch gesehen (bei [VEL] 3750 Lux). Die Umfeldleuchtdichte bzw. die Gesamttraumhelligkeit lieferte bei der Bewertung durch den Daylight Glare Index (DGI, Kapitel 1.5.4.7) die besten Korrelationen [NEV a und b, BOU]. Einen interessanten Zusammenhang fand Moosmann [MOO a] bei dem empfundenen Grad der Blendung und der Qualität der Aussicht, die in direkter Beziehung miteinander stehen und bei zufriedenstellender Aussicht einen höheren Grad an Akzeptanz bewirkt.

Zur Blendung wurden Fragen nach der Blendursache, dem Grad der Blendung und zu Reflexblendung bzw. Störung durch auftretende Muster oder Streifen in den Fragebogen integriert. Insgesamt ist die Bewertung der Blendung meist systemabhängig und wurde mit einem Anteil von zwischen 14% (helle Flächen unkomfortabel bis unakzeptabel) und 35% (Störende Spiegelungen) negativ bewertet (Kapitel 5.3.5.2). Blendung oder Störungen traten am häufigsten in Raum 1, 3 und 6 auf (Kapitel 5.3.5.3). Bei den beiden Jalousiesystemen traten am späten Nachmittag häufig Reflexe auf dem System direkt auf, was bei Raum 6 durch eine sonnenstandsabhängige Regelung der Lamellen im oberen Bereich und mit Verringerung des Tageslichtes zu verhindern ist. System 1 ist als reines Sonnenschutzsystem ein wenig ausgenommen, da es nicht für Büroanwendungen entwickelt wurde.

Die häufigste Blendursache war der Sonnenschutz selbst (31,5%), aber auch reflektierende Arbeitsflächen oder helle Wände stellten zum Teil Blendquellen dar (Kapitel 5.3.5.2). Dies deckt sich mit anderen Untersuchungen [IWA]. Der Sonnenschutz bildete auch nach Einzelräumen betrachtet die häufigste Blendursache mit Ausnahme von System 5, in dem fast 90% der auftretenden Blendung ihre Ursache in Reflexblendung über die Arbeitsfläche hatte und System 2, welches auf der Arbeitsfläche 50% der auftretenden Blenderscheinungen verursachte (Kapitel 5.3.5.3). „Störende Muster oder Streifen“ traten mit zwischen 13% (Raum 2) und 35% (Raum 1) auf, während „störende Spiegelungen“ mit zwischen 13% (Raum 5) und 52% (Raum 3) kritischer beurteilt wurden.

„Unkomfortable“ oder „unakzeptable“ helle Flächen waren am unkritischsten mit zwischen 7,7% (Raum 2) und 21,3% (Raum 5). Interessant hierbei ist, dass Raum 2 zwar kaum Störungen durch helle Flächen aufwies, die mittlere Leuchtdichte aber deutlich höher sind als bei anderen Räumen (Kapitel 5.2.3). Hier spielt die Adaptation bzw. der Kontrast im Raum eine große Rolle (Kapitel 1.3.2). Insgesamt beliefen sich die Situationen, in denen sich die Probanden während der Befragungen direkt geblendet fühlten auf zwischen 5,8% (Raum 2) und 29,4% (Raum 6). Als „negative Eigenschaft“ eines Systems wurde „Blendung“ in Raum 1 am häufigsten genannt (52,9%). Die Eigenschaften der Systeme werden also nicht in direkter Abhängigkeit der momentanen Blendung gewertet sondern

drücken eher eine Empfindung aus, die andere Einflusskriterien beinhaltet, so möglicherweise die schon genannte „sichtbare“ Schutzfunktion. Dies würde die Diskrepanz in den Räumen 1 und 6 gut erklären. Raum 2 hatte bei beiden Fragestellungen die wenigsten negativen Urteile zu verzeichnen, obwohl objektiv die höchsten Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken gemessen wurden.

Die Faktorenanalyse zeigte den Faktor M3 (vertikale Beleuchtungsstärke am Auge und der dazugehörige Sonnenlichtquotient) und L3 (Leuchtdichtemaximalwerte) als die wichtigsten und mit den meisten Fragen korrelierenden Messgrößen (Kapitel 6.2.5). Dies korrespondiert mit den Ergebnissen aus der Literatur (Kapitel 2.2.5). Eine Korrelation mit der Innenraumtemperatur konnte bei der Bewertung von Mustern oder Streifen gefunden werden, die bei höheren Temperaturen kritischer bewertet wurden; gleiches gilt für die vertikale Beleuchtungsstärke auf der Fassade. Die momentane Blendung während der Befragungen zeigte diesen Zusammenhang nicht.

Signifikant ist der Zusammenhang der Beleuchtungsstärke vertikal von der Rückwand aus gemessen mit der Beurteilung der hellen Flächen im Raum; hier zeigt sich die Tendenz, dass geringere Werte einen höheren Grad an Störung in allen Räumen verursachen, auch hier scheint die Adaptation eine Rolle zu spielen. Die Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene zeigt diese Tendenz nicht in allen Räumen konsistent; das Lichtlenkglas (Raum 2) verzeichnet hier eine Abhängigkeit, was sich mit der Bewertung der Blendung durch die Arbeitsfläche deckt.

Eine deutliche Abhängigkeit konnte bei fast allen Fragen zur Blendung mit der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge gefunden werden, die jedoch in den Räumen nicht immer konsistent in ihren Ausschlägen waren. Raum 2 wich dabei meistens ab, und wurde, wenn niedrigere Beleuchtungsstärken gemessen wurden, kritischer bewertet, allerdings lag hier das Niveau der vertikalen Beleuchtungsstärken von vornherein niedriger (Kapitel 5.2.2). Der Vergleich verschiedener Beleuchtungsstärken und der Prozentsatz an Probanden, die sich zum Zeitpunkt der Befragungen geblendet fühlten, zeigt diese Tendenz deutlich auf; ein Schwellwert konnte hier für einen Wert von 3169 Lux vertikal definiert werden mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 80% (Kapitel 6.3.5). Das entspricht in etwa den Werten aus der Literatur [OST, VEL]. Einen weiteren deutlichen Zusammenhang zeigt die maximale Leuchtdichte, die in allen Räumen für die momentan empfundene Blendung und die Blendquelle Sonnenschutz verantwortlich war (Schwellwert bei 29750 cd/m²). Bei der Beurteilung der hellen Flächen gab es diesen in den Räumen konsistenten Zusammenhang nicht; der Schwellwert für den Leuchtdichtemittelwert beträgt hier 1121 cd/m² (Messposition 2).

Gesamtaussagen zum Thema Blendung und maximale Leuchtdichten wurden anhand von Leuchtdichteüberschreitungen und der Frage nach Blendung zum Zeitpunkt der Befragungen durchgeführt. Die Verteilung der Beurteilungen „Momentan geblendet: Ja“ über die Messwerte zeigt, dass nur 3,8% unter einer maximalen Leuchtdichte von 4000 cd/m² auftraten, 11,5% bis zu einem Wert von 6000 cd/m² und die häufigsten Nennungen erst in einem Bereich ab 24 000 cd/m² zu finden waren (Kapitel 6.2.5). Die kritische Grenze von etwa 5% unzufriedenen Probanden (auf alle Befragten bezogen), von denen man in fast allen Fällen ausgehen muss, lag bei Werten ab etwa 8000 cd/m². Diese Auswertungen zeigen, dass die Akzeptanz deutlich höher liegt als für Bildschirmarbeitsplätze vorgeschrieben und verstärkt die allgemein bekannte Vermutung, dass Kunstlicht wesentlich kritischer bewertet wird als Tageslicht [CHA, NEV a, b] (Kapitel 1.3.7).

8.2.5 Funktion

Die Auswertungskategorie Funktion beruht auf dem in Kapitel 1.4.3.4 und 2.2.2 dargestellten Hintergrund, dass die Eingriffsmöglichkeiten für den Nutzer ein wichtiges Kriterium für Zufriedenheit bilden [VIN, VEL, NEV a, b]. Von Kramer wurde auch das „Verstehen“ der im Gebäude genutzten Systeme als wichtiger Parameter genannt [KRA a]. So sind Fragen zur Funktion des Sonnenschutzes und eines möglicherweise zusätzlich notwendigen Schutzes, zur Flexibilität und zu den Eingriffsmöglichkeiten in den Fragebogen mit eingeflossen. Außerdem wurden die Ästhetik der Systeme und die mögliche Funktion als Statussymbol integriert. Nicht untersucht werden konnte die automati-

sche Steuerung, da innerhalb dieser Studie Kurzzeitbefragungen durchgeführt wurden (Kapitel 4.3.4). Am Ende einer jeden Befragungsrunde wurde eine individuelle Einstellung der Systeme durch die Probanden aufgezeichnet, um Diskrepanzen zu einer auf thermischen Bedingungen ausgerichteten Steuerung zu erfassen.

Insgesamt wird die Sonnenschutzfunktion der Systeme mit fast 90% aller Antworten als „gut“ bewertet; einen „zusätzlichen Schutz“ wünschen sich dennoch knapp über 20% (Kapitel 5.3.6.2). Dies ist hauptsächlich bei System 1 der Fall, dessen „sichtbare“ Schutzfunktion gegenüber den anderen geringer ausfällt (Kapitel 5.3.6.3). Die geringste Forderung nach „zusätzlichem Schutz“ gibt es in Raum 2 (Lichtlenkglas), in dem auch die geringste Störung durch Blendung, aber auch eine schlechtere Bewertung der Innenraumtemperatur auftritt. Bezogen auf die Rolle eines Statussymbols liegt System 1 aufgrund seines Designs ganz vorne; die Ästhetik wird bei System 1, 2, und 5 am besten beurteilt. Fast 90% aller Probanden finden die Eingriffsmöglichkeit „wichtig“, das entspricht in etwa den Untersuchungen von Vine [VIN] und Velds [VEL] sowie Nevoigt [NEV a und b], und ein starres System mit über 45% als „eher störend“. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen auftretender Blendung (Kapitel 5.4.7) und der Wichtigkeit der Eingriffsmöglichkeit konnte nicht gefunden werden, jedoch eine Tendenz dazu. Der Wunsch nach einer „zusätzlichen Schutzfunktion“ dagegen steht in signifikanten Zusammenhang mit der Blendung durch „störende Spiegelungen“ (Kapitel 5.4.8).

In der Faktorenanalyse war die Innenraumtemperatur nicht signifikant abhängig, da die Beurteilung unabhängig von der Beurteilung der „Schutzfunktion“ durch die Systeme gefällt wurde (Kapitel 6.2.6). Der direkte Schluss aus dem Zusammenhang zwischen dem „Schutz gegen Wärmeeinstrahlung“ und der Raumtemperatur wird demnach von den Probanden nicht gezogen. Der Beleuchtungsstärkefaktor M1 (Messpunkte an der Decke, in der Arbeitsebene und der rückwärtigen Wand) zeigt zwar signifikante Zusammenhänge, diese jedoch sind in den Räumen unterschiedlich und können daher nicht als allgemeines Bewertungskriterium gelten. Grundsätzlich führten höhere Beleuchtungsstärken (an der Decke und der rückwärtigen Wand) zu einem geringeren Wunsch nach Eingriffsmöglichkeiten, und umgekehrt höhere Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz eher dazu, dass Eingriffsmöglichkeiten als „wichtig“ erachtet werden. Dagegen zeigt der nicht signifikante, aber zusätzlich untersuchte Faktor M3 (vertikale Beleuchtungsstärken am Auge und Sonnenlichtquotient am Auge) in den Räumen ein relativ konstantes Bild; bei höheren Werten wird ein „zusätzlicher Schutz“ gefordert. Hier konnte ein Schwellwert von 3169 Lux mit einer Wahrscheinlichkeit von über 80% für eine ungenügende Schutzfunktion definiert werden. Bei der maximalen Leuchtdichte aus Nutzerposition 2 (Kapitel 4.2.2) ist dies ähnlich mit Ausnahme von Raum 1 und 5, also den reinen Sonnenschutzsystemen, die auch bei niedrigeren Leuchtdichten „zusätzlichen Schutz“ benötigen. Dies hat seine Ursache in niedrigeren Sonnenständen am Nachmittag, die von Jalousiesystemen besser aufgefangen werden.

Freie persönliche Einstellungen der Systeme am Ende der Befragungen erlaubten es, die Präferenzen der Probanden hinsichtlich der Systemeinstellungen (Sonnenschutz und Blendschutz) abzuprüfen (Kapitel 4.3.4). Dabei ließen insgesamt 46% die Einstellungen des Sonnenschutzes (komplett geschlossen bzw. Lichtlenkstellung je nach Sonnenstand) und 20% die Einstellungen des Blendschutzes unverändert (geschlossen bei den Sonnenschutzsystemen und offen bei den Lichtlenksystemen) (Kapitel 5.3.6.2). Nach Räumen, vor allem aber nach Funktion der Systeme getrennt betrachtet (Kapitel 5.3.6.3), wurde in Raum 3 der Sonnenschutz zu über 50% unverändert gelassen, der Blendschutz zu 45% halb oder ganz geschlossen. In Raum 6 wurde der Sonnenschutz mit über 70% waagrecht gestellt oder halb hochgezogen und dafür der Blendschutz zu über 50% halb oder ganz geschlossen. Die Einstellungen des Blendschutzes in den Räumen mit „starrten“ Systemen (Sonnenschutz) wurden zu 40% nicht verändert und zu ebenfalls fast 40% geöffnet. Insgesamt zeigt die Analyse, dass die persönlichen Einstellungen sehr häufig zugunsten einer Aussicht verändert wurden und dafür der Sonnenschutz geöffnet und der Blendschutz geschlossen wurde. Dies bestätigt Untersuchungen von Reinhard [REIN], bei dem der automatisch, aber manuell zu überschreibende Sonnenschutz ebenfalls zugunsten der Aussicht verändert wurde.

Zusammenfassend bildet die „sichtbare“ Schutzfunktion eine wichtige Größe zur Bewertung von Tageslichtsystemen. Dies entspricht den Ausführungen von Littlefair [LIT]. Ebenso konnte die Wichtigkeit der Eingriffsmöglichkeiten [VIN, VEL, HEU, NEV a und b] und die Rolle der vertikalen Beleuchtungsstärke [OST, VEL, WIE c] im Bezug zu anderen Studien bestätigt werden. Keinen Zusammenhang gab es mit der Innenraumtemperatur. Die Nutzung der individuellen Einstellmöglichkeiten scheint weniger von der Raumwirkung bzw. der Qualität des Tageslichtes als vielmehr vom Ausblick und dem notwendigen Tageslicht abhängig zu sein. Dies ist bei dem realen Einsatz von Sonnenschutzsystemen an Arbeitsplätzen zu beachten, denn alles deutet darauf hin, dass der Ausblick, neben der notwendigen Raumhelligkeit, ein entscheidendes Kriterium für die Nutzung und Bedienung von installierten Systemen darstellt. Andersherum argumentiert, ein hellerer Raum führt dazu, dass weniger persönlicher Eingriff auf ein System notwendig wird. Anzumerken ist hier jedoch die Tatsache, dass die Probanden in dieser Untersuchung zwar die freie Einstellung genutzt haben, sich jedoch nicht mit den Auswirkungen beschäftigt haben, beispielsweise einer höheren Raumtemperatur.

8.2.6 Raumhelligkeit

Die Auswertung der Literatur zum Thema Lichtniveau (Kapitel 2.2.4) zeigt insgesamt einen Bedarf nach höheren Beleuchtungsstärken als in den Regelwerken für Kunstlicht vorgeschrieben (Kapitel 1.5.3). Dabei wurden nur wenige Befragungen bei Tageslicht durchgeführt und keine bei unterschiedlichen geschlossenen Systemen im Vergleich. Dennoch gab es Übereinstimmungen über die Einflussgrößen auf die Empfindung der Lichtumgebung, bei der die indirekte Beleuchtung, also die Beleuchtung der Raumboflächen, als wichtigster Parameter dargestellt wurde [FLY]. Bei Tageslicht zeichneten sich die Wetterbedingungen [BEG], der geschlossene Sonnenschutz sowie die Tageszeit [VÖL, VIN, FLE a] als Einflussgröße auf die Bewertung des Lichtniveaus aus. Außerdem wurde tendenziell bei Langzeituntersuchungen ein höheres Lichtniveau gefordert als bei Kurzzeituntersuchungen [VÖL]. Die in dieser Arbeit integrierten Fragen beinhalteten deshalb die Bewertung des Tageslichtangebotes, des Wunsches nach zusätzlichem Kunstlicht und des subjektiven Eindruckes der Raumhelligkeit. Nicht geprüft werden konnte die zeitliche Abhängigkeit, da Kurzzeitbefragungen nur am Nachmittag durchgeführt werden konnten.

Die Quantität des Tageslichtes wird von den Probanden insgesamt anders beurteilt als die Raumwirkung, das heißt, es wird klar unterschieden zwischen objektivem Tageslichtangebot und dem subjektiven Eindruck der Lichtwirkung (Kapitel 5.3.7.2). Ebenso deutlich wird unterschieden zwischen dem notwendigen oder ausreichenden Tageslicht und der Raumwirkung. Die notwendige Beleuchtung liegt dabei insgesamt auf einem niedrigeren Niveau als die subjektive Empfindung von Helligkeit (76% gegenüber 50% positiver Aussagen); der Wunsch nach zusätzlichem Kunstlicht wird wiederum auf einer anderen Ebene beurteilt (87% positiver Aussagen). Mit anderen Worten heißt empfundene „Dunkelheit“ nicht unbedingt gleich Kunstlicht an. Abbildung 8.2-2 stellt diesen Zusammenhang an einem Vergleich der Fragen zur Beurteilung des ausreichenden Tageslichtes am Arbeitsplatz und der Raumwirkung dar. Insgesamt ergibt sich eine Differenz von etwa 20% zwischen quantitativer und qualitativer Beurteilung, in Raum 5 sind es gar um 30%, in Raum 1, 2 und 6 sind es nur 15%. Hier spielt die Art und Weise der Lichtverteilung im Raum gelangt eine große Rolle.

Raum 2 mit dem Lichtlenkglas weist die geringsten Differenzen zwischen den drei Beurteilungsebenen auf und wird insgesamt mit nur zwischen 4% und 6% negativer Aussagen über das Lichtniveau, also die Helligkeit, am besten beurteilt; am schlechtesten wird die Raumwirkung in Raum 5 (elektrochromes Glas) mit 52% negativer Aussagen bewertet (Kapitel 5.3.7.3), dieser weist auch objektiv die niedrigsten Werte auf (Kapitel 5.2.2).

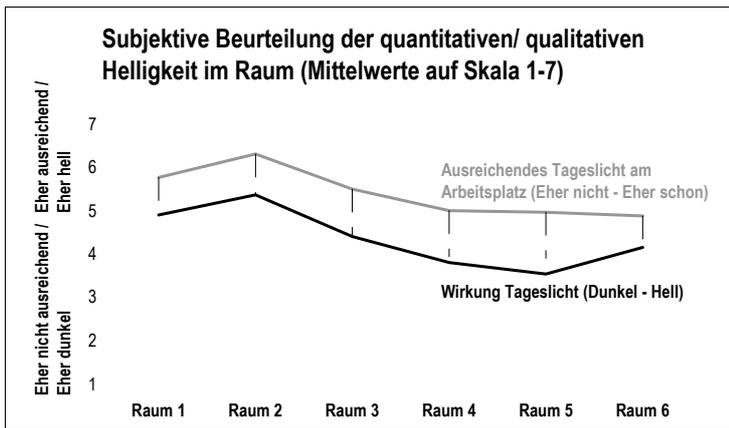


Abbildung 8.2-2: Vergleich der quantitativen (ausreichend – nicht ausreichendes Tageslicht) und qualitativen (hell - dunkel) Bewertung der Raumhelligkeit bei geschlossenen Systemen

Die Störung durch eine „Verminderung des Tageslichtes“ mit geschlossenen Systemen wirkt sich in Raum 2 am geringsten aus, am stärksten bei allen anderen Jalousiesystemen. System 1 scheint hier wieder eine Kompensation durch den besseren Ausblick zu erfahren, denn die objektiven Werte sind nicht grundsätzlich höher als bei den anderen Systemen (Kapitel 5.2.2).

Die Faktorenanalyse zeigt positive Abhängigkeiten der Wahrnehmung von Helligkeit im Vergleich zu den entsprechenden gemessenen Werten, das heißt je höher die Messwerte desto „eher hell“, „eher ausreichend“ etc. wird der Raum bzw. das Tageslichtangebot bewertet (Kapitel 6.2.7). Sehr deutlich zeigt sich dies am vertikalen Messpunkt in Augenhöhe; andere Studien fanden diese Korrelationen im Bezug zur vertikalen oder aber zur zylindrischen Beleuchtungsstärke [NEV a und b, MOO]. Die einzige Ausnahme hierbei bildet die Frage nach der Verminderung des Tageslichtes durch das geschlossene Sonnenschutzsystem im Falle der Abhängigkeit mit dem Beleuchtungsstärkefaktor M2 (Globalstrahlung und vertikal auf die Fassade gemessen) und bezogen auf die Bewertung des Raumeindrucks (hell – dunkel). Der Grund hierfür dürfte in der Erwartungshaltung der Probanden liegen, die, wie auch in anderen Untersuchungen, das Lichtniveau in Abhängigkeit der Außenverhältnisse beurteilen [BEG, VAN, JUS]. Eine Störung durch die Verminderung des Tageslichtangebotes wird bei höheren globalen Außenbeleuchtungsstärken weniger empfunden; in Raum 1 verhält sich dies aufgrund des direkten Bezugs nach außen umgekehrt (Kapitel 5.3.5.3). Abhängigkeiten mit der subjektiven Beurteilung der Raumhelligkeit wurden am deutlichsten und in allen Räumen konsistent in Verbindung mit dem vertikalen Messpunkt in Augenhöhe gefunden, nicht jedoch für die Beleuchtungsstärken in der Arbeitsebene (Kapitel 1.5.4.3) oder die mittleren Leuchtdichten (im Gegensatz zu Flynn [FLY]). Die Schwelle für das Einschalten des Kunstlichtes wurde am besten repräsentiert durch die mittlere Leuchtdichte aus dem Raumhintergrund, die Beurteilung des ausreichenden Tageslichtes durch die Außenbeleuchtungsstärken, also in Abhängigkeit von den Außenbedingungen.

Die Schwellwertanalyse (Kapitel 6.3.7) zeigt in dieser Kategorie einmal mehr die unterschiedlichen Beurteilungsebenen von Quantität und Qualität auf. So wurden für die Beurteilung der „Helligkeit im Raum“ für die Arbeitsebene und die mittleren Leuchtdichten aus der rückwärtigen Zone im Raum niedrigere Schwellen definiert als für die des „ausreichenden Tageslichtes“ (3393 Lux/ 59 cd/m² im Gegensatz zu 4442 Lux/ 72 cd/m²). Anders am vertikalen Messpunkt am Auge, hier waren die Schwellwerte für die Quantität (3169 Lux) niedriger als für die Qualität (3797 Lux). Dieser Zusammenhang definiert deutlich die Bezugsebenen für die Bewertung der Raumhelligkeit und repräsentiert die Wichtigkeit der vertikalen Beleuchtungsstärke für den Menschen. Die zusätzliche Überprüfung festgelegter Schwellen (300, 500 und 1000 Lux in der Arbeitsebene) ergab zudem eine hohe Unzufriedenheitsquote mit dem vorgegebenen Beleuchtungsniveau von teilweise über 50%. Im Umkehrschluss heißt dies, dass geltende Regelwerke, die auf die visuelle Funktion ausgerichtet sind (Kapitel 1.3.1), nicht die subjektive Beurteilung der Raumhellig-

keit, also die Wahrnehmung (Kapitel 1.3.3), wiedergeben können und für unterschiedliche Arten der Beurteilung unterschiedliche Messgrößen relevant sind, das Niveau für eine positive Beurteilung immer aber höher liegt als in den Regelwerken vorgeschrieben.

Zusammenfassend zeigt sich, dass zwischen notwendiger Beleuchtung (ausreichendes Tageslicht am Arbeitsplatz) und Raumwirkung (Hell - Dunkel) ein Unterschied besteht und dass diese auf Basis unterschiedlicher objektiver Werte (horizontal, vertikal) und abhängig von den Außenbedingungen beurteilt werden.

8.2.7 Lichtlenkung

In den letzten Jahren sind vermehrt Tageslichtsysteme auf den Markt gekommen, die einfallendes Tageslicht über die Decke in die Raumtiefe umlenken. Keine der untersuchten Studien beschäftigte sich mit der Akzeptanz derselben (Kapitel 2.2). Aus diesem Grund wurde dieser Aspekt mit in die Befragungen aufgenommen.

Eine Lichtlenkung wird, wenn vorhanden, insgesamt positiv beurteilt (Kapitel 5.3.8.2). In den Räumen 2 (Lichtlenkglas) und 6 (Tageslichtoptimierte Jalousie) war dies zu 100% der Fall (Kapitel 5.3.8.3). Die Gründe für eine geringere positive Bewertung in den Räumen 3 und 4 mag in der geringeren Helligkeit (Kapitel 5.2.2 und 5.2.3) oder aber an Blendungserscheinungen liegen (Kapitel 5.3.5.2). Der interkategoriale Vergleich zeigt einen gewissen Grad an Kompensation einer eingeschränkten Aussicht mittels effektiver Lichtlenkung (Kapitel 5.4.11). In der Faktorenanalyse (Kapitel 6.2.8) zeigten sich die mittleren und maximalen Leuchtdichten positiv abhängig für die Wahrnehmung der Lichtlenkfunktion, mit Ausnahme des Raumes 4 (Weißlichthologramme), hier wurde die Lichtlenkung bei höheren Werten weniger wahrgenommen. Die subjektiv positive Beurteilung einer vorhandenen Lichtlenkung wurde bei niedrigeren mittleren Leuchtdichten gefällt.

Insgesamt wird die Lichtlenkung von den Probanden aufgrund der höheren Raumhelligkeit positiv aufgenommen.

8.2.8 Farb- und Raumwirkung

Tageslicht wird dem Kunstlicht in allen Fällen der Auswertung der Literatur vorgezogen (Kapitel 2.2.8). Dabei zeigte sich, dass eine indirekte Beleuchtung mehr zum Helligkeitseindruck beiträgt als eine direkte Beleuchtung [BOD, POL, BOY c] und besser angenommen wird. Ein direkter Anteil jedoch hat einen günstigen Einfluss auf das Wohlbefinden [POL] und die Wachheit [FLE b]. Insgesamt wichtig ist die Veränderung der Lichtumgebung über den Tag [TEN, BEG]. Von der Präferenz warmer Lichtfarben, die eine positive Auswirkung auf die Beurteilung der „Natürlichkeit“ hatten, berichteten unterschiedliche Studien [DAV, KÜL c]. Nicht einheitlich wurde die Lichtfarbe im Bezug zum Lichtniveau bewertet (Kapitel 2.2.10), das höhere Lichtniveau jedoch hatte immer einen positiven Effekt auf die Wachheit [KÜL a, FLE b] und die Produktivität [BOM a, b, BEL, JUS, REI, GUT, FIG]. Fragen zur Beurteilung der Farb- und Raumwirkung wurden aus diesem Grund in den Fragebogen integriert.

Im Bezug auf die Lichtfarbe und die resultierende Raumwirkung zeigte die einfache Auszählung insgesamt eine positive Tendenz (Kapitel 5.3.9.2). Über 70% der Probanden bewerteten das Lichtklima als „eher angenehm“, fast 60% als „eher natürlich“, 45% als „eher warm“. Die bipolare Skala „kalt - warm“ wurde mit einem relativ hohen Anteil von 36% neutraler Antworten beurteilt. Negative Bewertungen lagen zwischen 11% (eher unangenehm) und 25% (eher unnatürlich). Von 46% wahrgenommenen Farbänderungen durch die Systeme waren weit über 70% „nicht störend“ für die Probanden.

Deutliche Unterschiede gab es bei der Systemabhängigkeit (Kapitel 5.3.9.3), wie auch bei den Farbmessungen schon erkennbar (Kapitel 5.2.4). In Raum 2 wurde die Lichtfarbe bzw. Raumwirkung zu über 90% als „eher angenehm“ und zu 77% als „eher natürlich“ bezeichnet. Am schlechtesten schnitten hier die beiden Sonnenschutzsysteme ab (System 1 mit konzentrierenden Hologrammen und System 5 mit elektrochromem Glas) mit um 60% Bewer-

tungen „eher angenehm“ und nur 12% bzw. 19% „eher natürlich“. Dies entspricht der Aussage vorangegangener Untersuchungen, die die Verteilung des Lichtes im Raum als ausschlaggebend für die Beurteilung sehen [FLE, BOD]. Die Ausschläge der Beurteilungen „unangenehm“ und „verfremdet“ zeigten sich ähnlich, deutlich davon abweichend die Beurteilung „kalt - warm“, wobei Raum 1 am „wärmsten“ und Raum 5 am „kältesten“ beurteilt wurde. Die Weißlichthologramme in Raum 4 zeigen im Gegensatz zur Referenz (Raum 3) schlechtere Bewertungen hinsichtlich der Lichtwirkung. Die Ergebnisse bestätigen die Aussagen anderer Studien.

Die Faktorenanalyse (Kapitel 6.2.9) zeigt bei den Beleuchtungsstärken nur Faktor M2 im Bezug auf mögliche Störungen durch eine Wahrnehmung von Farbänderungen durch das geschlossene Sonnenschutzsystem als signifikant an. Bei höheren Werten ist eine Farbänderung „eher wahrnehmbar“, diese jedoch „eher nicht störend“. Höhere mittlere Leuchtdichten hinterlassen eher einen „natürlichen“, „angenehmen“ und durch Farbänderungen „nicht störenden“ Eindruck. Dies deckt sich in etwa mit Untersuchungen von Davis [DAV]. In Raum 4 werden geringere Leuchtdichten als „eher natürlich“ empfunden. Die Farbfaktoren zeigen insgesamt wenig signifikante Zusammenhänge mit den subjektiven Urteilen und in den Räumen sehr unterschiedliche Tendenzen, so dass allgemeingültige Aussagen aufgrund der geringen Anzahl an Messungen (Kapitel 4.2.3) schwer zu treffen sind. Das Urteil „verfremdet“ wird insgesamt eher bei höheren gemessenen Farbtemperaturen gefällt. Farbänderungen wirken sich ebenfalls „eher störend“ aus bei höheren Farbtemperaturen, mit Ausnahme des Lichtlenkglases in Raum 2. Eine gute Farbwiedergabe zeichnete sich in allen Fällen positiv aus. Eine eindeutige Präferenz von Lichtfarben bezogen auf das Helligkeitsniveau konnte nicht festgestellt werden.

Die Schwellwertuntersuchung (Kapitel 6.3.8) muss aufgrund der geringen Anzahl an Messungen kritisch betrachtet werden. Eine Farbabweichung von 32 Mired und mehr zieht das Urteil „verfremdet“ mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nach sich. Insgesamt wirken sich wahrgenommene Farbänderung zu einem großen Teil nicht störend aus.

8.2.9 Privatheit

Das Gefühl der Privatheit muss in Arbeitsräumen gewährleistet sein [LUD]. Dies umso mehr als ein Schließen von Sonnenschutzsystemen aufgrund unerwünschter Einblicke zugunsten der Tageslichtversorgung zu vermeiden ist. Die Kategorie Privatheit wurde deshalb genutzt, um mögliche Störungen durch zu viel Einblick in den Innenraum zu erkennen. Es ist stark abhängig vom jeweiligen eingesetzten System (Kapitel 5.3.10.2 und 5.3.10.3). Diejenigen Systeme, die einen Ausblick bieten (Raum 1 und 5) werden entsprechend mit einem Einblick in den Raum in Verbindung gebracht. Die Jalousiesysteme (Raum 2, 3, 4 und 6) erwecken nicht den Eindruck, dass man in den Raum hineinblicken kann und sorgen so für mehr Gefühl an Privatheit.

8.2.10 Gesamtnoten

Insgesamt wurden die Systeme ohne signifikante Unterschiede zu 96,8% für „sehr gut“ bis „ausreichend“ erklärt mit einem geringen Anteil an unzufriedenen Probanden (Kapitel 5.3.11.2 und 5.3.11.3). Bei der freien Einstellung wurde meist der Blendschutz verändert (Kapitel 5.3.6). Die überwiegende Zahl nutzte den Blendschutz zur Verringerung des Lichteinfalls. Bezogen auf den Sonnenschutz wurde meist zugunsten besseren Tageslichtes bzw. eines besseren Ausblicks entschieden. Zu beachten ist, dass alle in diesem Rahmen getesteten Systeme im Gegensatz zu einer Standardjalousie einen hohen Standard aufweisen. Außerdem durchliefen die Probanden mit ihren persönlichen Einstellungen keinen weiteren Fragebogen, so dass die Auswirkungen, wie zum Beispiel eine steigende Innenraumtemperatur aufgrund des verminderten Sonnenschutzes nicht getestet werden konnten, ebenso wenig wie die veränderten Lichtbedingungen. Die Gesamtnoten repräsentieren die Kompensation einiger weniger negativer Eigenschaften mit anderen positiven Eigenschaften.

8.3 Überprüfung der in Kapitel 3 aufgestellten Thesen

These 1: Das Fassadensystem hat einen Einfluss auf die Akzeptanz der Raumbeleuchtung und das Wohlbefinden des Nutzers.

Das Wohlbefinden und die Akzeptanz am Arbeitsplatz hängt meist mit einer guten Tageslichtversorgung und einem entsprechenden Ausblick zusammen (Kapitel 2.2.1, 2.2.6, 2.2.7). Wie jedoch verhält sich dies mit den in den letzten Jahren zahlreich auf den Markt gekommenen Tageslichtsystemen?

Ein Einfluss des Fassadensystems auf das Wohlbefinden konnte innerhalb dieser Studie so nicht bestätigt werden, denn das Wohlbefinden wurde unabhängig von den Räumen von fast 90% der Befragten als „eher gut“ angesehen (Kapitel 5.3.2.3). Allerdings wurden innerhalb dieser Studien nur Kurzzeitbefragungen durchgeführt, hier können Langzeitbefragungen über mehrere Tage oder Wochen genauere Ergebnisse liefern. Das System hat bei gleichen Raumtemperaturen einen Einfluss auf das Temperaturempfinden (Kapitel 5.3.3.3), hier spielt die Oberflächentemperatur oder aber die „sichtbare“ Schutzfunktion der Systeme eine Rolle (Kapitel 5.3.6.3). Auch die Bewertung der Raumbeleuchtung unterliegt dem Systemeinfluss, so zeigt sich dies bei der Bewertung der Blendung (Kapitel 5.3.5.3), des Helligkeitseindrucks (Kapitel 5.3.7.3), die Bewertung der Lichtlenkung (Kapitel 5.3.8.3), der Raumwirkung (Kapitel 5.3.9.3) sowie der Privatheit (Kapitel 5.3.10.3) und bei der Bewertung des Arbeitsplatzes („offen“, „geschlossen“). Dagegen konnte kein Unterschied in der Bewertung des Gesamteindrucks gefunden werden (Kapitel 5.3.11.3).

Die These kann im Bezug zur Raumbeleuchtung als bestätigt gelten, nicht jedoch im Bezug zum Wohlbefinden.

These 2: Größere Helligkeit schafft mehr Zufriedenheit; 500 Lux in der Arbeitsebene sind für einen „hellen Raumeindruck“ nicht ausreichend.

Aus der Literatur geht hervor, dass das gewünschte Beleuchtungsniveau meist über dem in den Regelwerken als Mindestwerte vorgegebenem Niveau liegt, und dass eine hellere Lichtumgebung mehr Zufriedenheit und Produktivität verspricht (Kapitel 2.2.4 und 2.2.7). Die Abweichung von der gewünschten Beleuchtungsstärke konnte als Indikator für Zufriedenheit gelten [NEW].

Diese These kann durch die vorliegenden Untersuchungen eindeutig bestätigt werden. Positiv abhängig zeigten sich hier alle Beleuchtungsstärkemesswerte, zum Teil auch die Leuchtdichtemittelwerte (Kapitel 6.2.7). Wichtig hierbei sind die unterschiedlichen Bewertungsebenen für das Zuschalten von Kunstlicht und des ausreichenden Tageslichtes sowie der Raumwirkung; letztere fordert deutlich höhere Werte. Abbildung 8.3-1 zeigt die Ergebnisse für die drei relevanten Fragen in der Darstellung als Boxplot- Diagramm für den fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene im Vergleich.

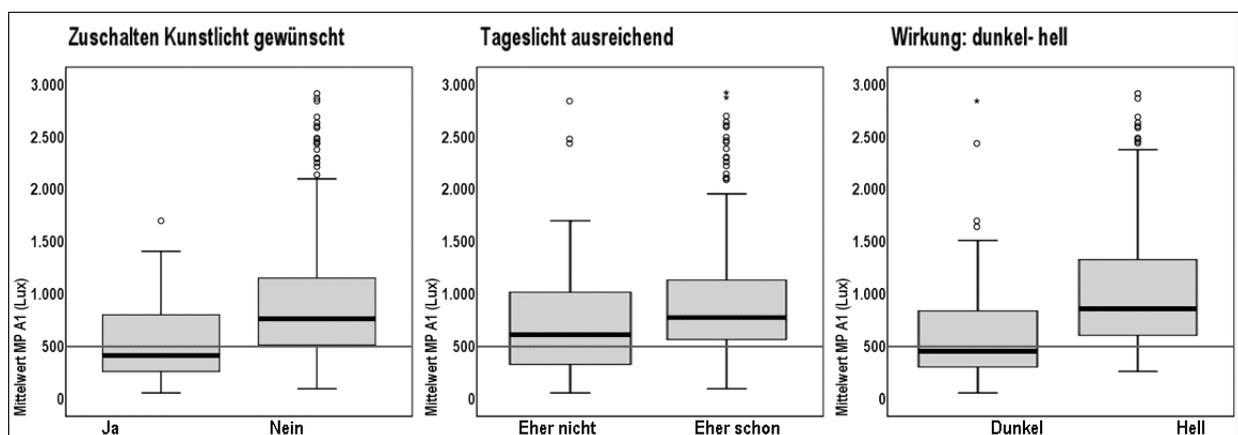


Abbildung 8.3-1: Ergebnisse der Fragen zur Raumhelligkeit am Beispiel der Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene

Zu den drei Befragungsebenen des Kunstlichtbedarfs, der Raumwirkung und des ausreichenden Tageslichtes konnten Schwellwerte definiert werden (Kapitel 6.3.7):

- Zuschalten Kunstlicht: Globale und vertikale Außenbeleuchtungsstärke vor der Fassade
- Wirkung Tageslicht „eher hell“: Beleuchtungsstärken am fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene, an der Decke in Raummitte und vertikal in Augenhöhe sowie mittlere Leuchtdichte aus dem Raumhintergrund
- Ausreichendes Tageslicht: Beleuchtungsstärken am fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene, an der Decke in Raummitte und vertikal in Augenhöhe und vertikale Außenbeleuchtungsstärke vor der Fassade sowie mittlere Leuchtdichte aus dem Raumhintergrund

Die Schwellwertanalyse zeigte außerdem sogar bei 1000 Lux am Arbeitsplatz nur Zufriedenheitsquoten von bis maximal 66%. Ein höheres Lichtniveau könnte die Zufriedenheit somit deutlich steigern.

These 3: Die Beurteilung der Qualität des Tageslichtes im Büroraum korreliert nicht zwingend mit lichttechnischen Messgrößen, z.B. den horizontalen Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz.

Die These begründet sich in der Tatsache, dass in der Literatur (Kapitel 2.2.8) die Zufriedenheit mit der Beleuchtungssituation meist unter Kunstlichtbedingungen getestet wurde. Es stellte sich die Frage, welche objektiven Messgrößen für die Beurteilung der Raumwirkung bei Tageslicht herangezogen werden können.

Die Beurteilung der Probanden, ob das einfallende Tageslicht „ausreichend“ ist oder nicht wurde zwar durch die statistische Analyse signifikant getestet, zeigt jedoch im Bezug zum fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene abweichende Aussagen in Raum 6 (Kapitel 6.2.7). Ebenso ist dies der Fall bei der Beurteilung der Lichtlenkung, diese wird insgesamt als positiv angesehen (Kapitel 5.3.8.2), in Verbindung mit gemessenen Werten jedoch unterschiedlich beurteilt (Kapitel 6.2.8).

Die subjektive Beurteilung der Raumwirkung (Kapitel 6.2.9) zeigt die größten Diskrepanzen bezogen auf gemessene Beleuchtungsstärken, Leuchtdichten oder Farbtemperaturen. Die Beleuchtungsstärken können hier, außer bei der Frage nach Farbänderungen, keinerlei signifikante Aussage liefern. Der häufig signifikant getestete Faktor L2 (Leuchtdichtemittelwerte, Maximalwert aus Position 3 und die Uniformität) im Bezug auf eine angenehme oder unangenehme Lichtwirkung zeigt in den Einzelräumen ein so diverses Bild, dass hier ebenfalls keine allgemeingültige Aussagen möglich sind, ebenso wenig wie bei der Beurteilung der Natürlichkeit des Lichtes. Die Farbmessungen konnten nur in einer geringen Anzahl durchgeführt werden. Auch hier sind schwer allgemeingültige Aussagen möglich, Farbtemperaturen zwischen 4500 und 5500 Kelvin scheinen am wenigsten „verfremdet“ zu wirken.

Insgesamt zeigt sich, dass die unterschiedlichen Funktionsweise der Systeme eine Rolle bei der Bewertung spielen und häufig schwer durch einen einzigen Wert zu fassen sind. Im Laufe der Untersuchungen konnten unterschiedliche Bezugsebenen für die subjektive Beurteilung gefunden werden, die durch unterschiedliche gemessene Werte repräsentiert werden können (z.B. Kapitel 6.2.7 und 6.3.7).

Die These kann also bestätigt werden. Um die subjektive Wahrnehmung in die Gebäudeplanung zu integrieren, müssen unterschiedliche objektive Messgrößen herangezogen werden.

These 4: Der geschlossene Sonnenschutz und damit der fehlende Ausblick wird akzeptiert, wenn die Helligkeit im Raum ausreichend ist bzw. die Raumdecke durch ein Lichtlenksystem aufgehellt wird.

Der Ausblick gilt als ein wichtiges Kriterium für die Zufriedenheit am Arbeitsplatz (Kapitel 2.2.6). Eine zu hohe Sonneneinstrahlung verlangt nach Sonnenschutzsystemen, die die thermische Belastung in Innenräumen reduzieren und Blendung vermeiden, dies jedoch meist unter Verringerung oder Ausschluss der Sichtverbindung nach außen. Wie wird dies von Nutzern angenommen und welche Möglichkeiten gibt es, die fehlende Aussicht zu kompensieren?

Die Verminderung des Ausblicks wird innerhalb dieser Studie von 93% der Probanden als negativ angesehen (Kapitel 5.3.4.2). Die beiden Sonnenschutzsysteme zeigen bei der Bewertung negativer Eigenschaften der Systeme, also einer „nicht ausreichenden Sichtverbindung“, bessere Ergebnisse (System 1: 37%, System 5: 50%) als die Jalousiesysteme (96% bis 100%). Prägnant ist jedoch, dass die Sichtverbindung in den Räumen 1 und 5 noch relativ häufig als „nicht ausreichend“ bewertet wird (Kapitel 5.3.4.3). Hier spielt die Qualität derselben eine Rolle, denn durch den zusätzlich notwendigen Blendschutz wird diese bei beiden Systemen vermindert. In Raum 5 wird zusätzlich die geringere Raumhelligkeit dafür verantwortlich gemacht (Kapitel 6.2.4), ebenso wie bei der verbesserten Bewertung von Raum 2 höhere Raumhelligkeiten und die effiziente Lichtlenkung eine Rolle spielen. Dies wurde in der interkategorialen Analyse überprüft (Kapitel 5.4.5 und 5.4.6), wodurch ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Beurteilung der Verminderung des Ausblicks (Negativ) und der Beurteilung des Raumes als „hell“ bezogen auf die Jalousiesysteme gefunden werden konnte (Kapitel 5.4.5); außerdem der Zusammenhang zwischen geringerer Störung durch einen verminderten Ausblick und der Wahrnehmung bzw. der Beurteilung der Lichtlenkung (Kapitel 5.4.6). Zusätzlich ist die Beurteilung der „Offenheit“ eines Raumes abhängig von der Aussicht, aber auch von der Raumhelligkeit; auch hier wird Raum 2 besser beurteilt als andere Jalousiesysteme (Kapitel 5.4.2).

Die hier aufgestellte These kann in sofern bestätigt werden, als dass eine bessere Ausleuchtung des Raumes zwar keine vollständige Kompensation für eine fehlende Aussicht bringen kann, die negative Wahrnehmung jedoch eindeutig reduzieren kann.

These 5: Blendung durch Tageslicht wird über die in den Regularien genannten Grenzwerten hinaus akzeptiert.

In den geltenden Regelwerken [EN 12464] werden zurzeit maximale Leuchtdichten von bis zu 1000 cd/m² als akzeptabel für die Bildschirmarbeit definiert (Kapitel 1.5.3). Die Auswertung der Literaturstudie (Kapitel 2.2.5) zeigte höhere Werte bis zu 4000 cd/m², die durch Tageslicht für die meisten Probanden akzeptabel sind [NEV a und b]. Vertikale Beleuchtungsstärken wurden mit bis zu 3300 Lux (Schwelle zwischen störender und inakzeptabler Blendung) [OST] und 3750 Lux [VEL] in der Literatur angegeben.

Bei den innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Befragungen wurden sowohl die Leuchtdichtewerte als auch die Beleuchtungsstärken im Bezug auf eine auftretende Blendung mittels der Faktorenanalyse untersucht (Kapitel 6.2.5). Die maximale Leuchtdichte aus der Nutzerposition 2 heraus zeigte dabei, dass nur 3,8% der Probanden (derer, die sich zum Zeitpunkt der Befragungen geblendet fühlten) bei Werten bis zu 4000 cd/m² Blendung empfinden. Dies korrespondiert mit den Untersuchungen von Nevoigt [NEV a und b]; bei bis zu 6000 cd/m² waren es noch unter 10% der Probanden, auf alle Antworten bezogen (geblendet und nicht geblendet) liegt die 5% Grenze etwa bei 8000 cd/m². Die Schwellwertanalyse (Kapitel 6.3.5) ergab einen Wert von 3169 Lux vertikaler Beleuchtungsstärke am Auge, oberhalb dessen eine Blendung mit 80%iger Wahrscheinlichkeit auftritt. Für die Leuchtdichte waren dies über 29000 cd/m², allerdings zeigt sich hier eine sehr große Spannweite von etwa 8000 cd/m² bis zu über 25 000 cd/m².

Insgesamt fallen die für die Probanden akzeptablen Werte deutlich höher aus als in den Regelwerken als Begrenzung angegeben. Die These kann damit bestätigt werden.

These 6: Die Veränderung der Lichtfarbe durch Fassadensysteme hat einen entscheidenden Einfluss auf die Akzeptanz bzw. die Bewertung der Raumwirkung.

Die Auswirkungen verschiedener Lichtfarben bei Kunstlicht wurde in der Literatur untersucht (Kapitel 2.2.10), nicht aber die Auswirkung bei Tageslicht bzw. bei Einsatz von Tageslichtsystemen. Hier konnten jedoch aus den Messungen heraus deutliche Unterschiede aufgezeigt werden (Kapitel 5.2.4).

Die Lichtfarbe hat keinen Einfluss auf die Gesamtbewertung der Systeme (Kapitel 5.3.11.3). Bezogen auf die Raumwirkung konnten Tendenzen festgestellt werden, die aber in den Räumen sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern (Kapitel 6.2.9). Die Schwellwertanalyse zeigte, dass Farbabweichungen von mehr als 32 Mired das Urteil „verfremdet“ folgen lassen, ebenso wie Farbtemperaturen von 6745 Kelvin und darüber. Es zeigt sich jedoch die Tendenz, dass die durch Fassadensysteme veränderten Lichtfarben einen Einfluss auf die Raumwirkung haben (Kapitel 5.3.9.3). Die schlechteste Bewertung bezogen auf eine „natürliche“ Lichtwirkung gab es in Raum 1 (konzentrierende Hologramme mit 40% positiver Antworten), obwohl dieser bei sonnigen Verhältnisse am ehesten dem Referenzraum ohne Sonnenschutz entsprach, die beste in Raum 2 (Lichtlenkglas mit 77% positiver Antworten); hier wurden die dem Tageslicht am ähnlichsten Farbtemperaturen gemessen. Raum 5 (elektrochromes Glas) wurde mit fast 40% als „eher kalt“ bewertet, was sich durch die Messungen bestätigt, Raum 1 mit 63% als „eher warm“, nicht bestätigt durch die Farbmessungen. Hier zeigt sich eher die „sichtbare“ Farbe durch die Hologramme verantwortlich.

Aufgrund der geringen Anzahl an Messungen (Kapitel 4.2.3) können schwer allgemeingültige Aussagen gemacht werden. Die Tendenz jedoch spricht für die hier aufgestellte These. Eine dem Tageslicht ähnliche Lichtfarbe hat einen positiven Einfluss auf die Bewertung. Langzeitstudien können hier mehr Information über die Auswirkungen auf beispielsweise die Produktivität und das Wohlbefinden liefern.

These 7: Die Akzeptanz von Lichtbedingungen können mit einer Akzeptanzwahrscheinlichkeit am besten beschrieben werden.

Diese These begründet sich in der Tatsache, dass unterschiedliche Systeme sehr unterschiedliche Wirkungsweisen aufweisen, die aber in den Beurteilungen durch die Probanden nicht eindeutig Messwerten zugeordnet werden können, das heißt, es treten in der Realität große Bandbreiten an objektiven Werten auf, die nicht eindeutig einer Präferenz zugeordnet werden können. Dies wurde auch von Jödecke schon dokumentiert, der die Mittelwertbildung aufgrund der sehr unterschiedlichen Wahrnehmungsweisen in Frage stellt [JÖD].

Aus diesem Grund wurde innerhalb dieser Arbeit für die Schwellwertanalyse (Kapitel 6.3) die Wahrscheinlichkeit von um 80% zugrunde gelegt, für die die jeweilige Aussage gilt. Auf Basis dieser Analysen konnten Schwellwerte für Themenbereiche definiert werden, die bisher kaum möglich waren. So zum Beispiel die Einschränkung des Tageslichtes, die bei einem Leuchtdichtemittelwert über 1120 cd/m^2 aus der Nutzerposition 2 heraus mit einer hohen Wahrscheinlichkeit als nicht störend bewertet wird, unabhängig davon, welches System eingesetzt wird. Mittelwerte lägen in diesem Fall deutlich niedriger, da einzelne sehr niedrige Werte mit einer positiven Beurteilung im Mittelwert voll angerechnet würden. Die These kann somit bestätigt werden.

These 8: Das Temperaturempfinden ist weitgehend unabhängig von der Helligkeit im Raum und wird vom System selbst nicht beeinflusst.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Bewertung der Lichtumgebung anderen Bewertungsmustern unterliegt als andere raumklimatische Kriterien wie beispielsweise die Belüftung oder die Raumtemperatur (Kapitel 2.2.1). Hier sollte untersucht werden, in wie weit dies zutrifft, wenn gleiche Innenraumtemperaturen vorliegen, aber unterschiedliche Systeme und Lichtbedingungen vorliegen.

Das Temperaturempfinden hing bei den hier durchgeführten Befragungen signifikant mit dem Wohlbefinden zusammen, jedoch nicht die objektive gemessenen Temperaturen (Kapitel 5.4.3). Die subjektive Beurteilung der Innenraumtemperaturen zeigte sich signifikant systemabhängig (Kapitel 5.3.3.3). Am deutlichsten war dies bei System

1 und 2. Die konzentrierenden Hologramme in Raum 1 bieten eine schlechtere „sichtbare“ Schutzfunktion, in Messraum 2 wurden höhere Scheibentemperaturen für die abweichenden Ergebnisse verantwortlich gemacht. Das System also beeinflusst bei gleichen Raumtemperaturen das Temperaturempfinden.

Die Frage, ob die Helligkeit im Raum das Temperaturempfinden beeinflusst, kann ebenfalls positiv beantwortet werden. In der Faktorenanalyse wurden hierzu Auswertungen gleicher Raumtemperaturen durchgeführt, die zeigten, dass höhere Beleuchtungsstärken in der Arbeitsebene schlechtere Bewertungen der Innenraumtemperaturen nach sich zogen (Kapitel 6.2.3).

Insgesamt führt die „sichtbare“ Sonnenschutzfunktion zu mehr Zufriedenheit als die nicht sichtbare. Die These kann widerlegt werden.

These 9: Die Bewertung der Innenraumbelichtung ist abhängig von der vorhandenen Außenbeleuchtung.

Die auf Basis der Literatur (Kapitel 2.2.4 und 2.2.8) aufgestellte These der Beurteilung der Innenraumbelichtung im Verhältnis zu den Außenbedingungen warf die Frage auf, wie sich dies bei reiner Tageslichtversorgung darstellt.

Deutlich wird die abhängige Beurteilung auch bei Tageslichtversorgung durch die Auswertung der Kategorie Helligkeit (Kapitel 6.2.7). Die Faktorenanalyse zeigt einen signifikanten Zusammenhang der Bewertung der Helligkeit mit dem Faktor M2, der die globale und die vertikal gemessene Außenbeleuchtungsstärke beinhaltet. Je höher die Außenbeleuchtungsstärke, desto eher empfinden die Probanden den Raum als „hell“ und das Tageslicht als „ausreichend“, da gleichzeitig die Innenbeleuchtungsstärken ansteigen. Aber die „Verminderung des Tageslichtes“ durch das System wird bei höheren Außenwerten deutlicher empfunden. Eine Tendenz zu einem höheren Grad an Störung, der durch die Verminderung des Tageslichtangebotes im Innenraum auftritt, wird wiederum eher empfunden, wenn außen geringere Einstrahlung vorhanden ist.

Die These kann, entsprechend anderer Studien [BEG, VÖL, VAN, JUS], auch für reine Tageslichtbedingungen und geschlossene Sonnenschutzsysteme belegt werden.

These 10: Studien zur Akzeptanz geben neue Hinweise auf mögliche Schwachpunkte und zu Grenzwerten bezogen auf Tageslicht und (neue) Sonnenschutzsysteme.

Der Grund für diese These liegt in der Diskrepanz von objektiven Werten und subjektiven Aussagen, da diese über die Komplexität der Wahrnehmung zum Teil nicht eindeutig vorhersehbar sind (Kapitel 1.3.3) und geltende Mindestwerte (Kapitel 1.5.3) für beispielsweise Beleuchtungsstärken in der Arbeitsebene häufig nicht mit den Wünschen der Nutzer übereinstimmen (Kapitel 1.5.4.3).

Insbesondere die Kategorie Helligkeit zeigt deutlich, dass in realen Räumen befragte Probanden klar zwischen Raumwirkung und notwendiger Beleuchtung unterscheiden (Kapitel 5.3.7 und 6.2.7). Aus diesen Fragen heraus ist die Aufstellung von Mindestwerten und Werten, die den subjektiven Wunsch repräsentieren und das Wohlbefinden beeinflussen können, möglich. Dies wurde insbesondere durch die Schwellwertanalyse deutlich (Kapitel 6.3.7). Die These kann somit bestätigt werden.

8.4 Bewertungsmatrix

Bisher gibt es nur wenige Ansätze, die einen Vergleich unterschiedlicher Tageslichtsysteme auf Basis unterschiedlicher Kriterien möglich machen. Zwei dieser Ansätze wurden in Kapitel 1.5.4.10 erläutert [DIA, SIC a, d]. Problematisch ist bisher, dass nur die Beleuchtung durch Tageslicht bei bedecktem Himmel mit in solch ein Bewertungsschema mit eingeflossen ist, nicht aber die Situation bei aktiven oder geschlossenen Systemen. Außerdem sind

bisher rein objektive Kriterien ohne Bezug zur Nutzerakzeptanz verwendet worden, was die Bewertung für die Praxis ungenau macht.

Aus diesem Grund wurde in Kapitel 7 ein neues Bewertungsschema erarbeitet, welches sowohl die Bewertung bei geschlossenen Systemen und sonnigem Himmels als auch die aus den Nutzerakzeptanzstudien hervorgegangenen subjektiven Bewertungen integriert (Kapitel 7.2). Dabei wurde der Messdatensatz ebenso wie die Befragungen auf eine Punkteskala umgerechnet, und Ergebnisse beispielhaft grafisch dargestellt. Die gemessenen Werte können dabei in der Planungsphase durch Simulationen beigesteuert werden. Die Integration der subjektiven Bewertungen erfolgte auf der Basis einer Auswahl nach den Kriterien der Systemabhängigkeit, dem Vorhandensein mindestens einer signifikanten Messgröße und der in allen Räumen gleichen Tendenz der signifikanten Messgröße. Beispielhafte Anwendungen finden sich in Kapitel 7.2.2 und 7.2.3. Hier zeigen die aus den Einzelfragen zusammengefassten Themenkategorie zum Beispiel für die Bewertung der Aussicht die besten Ergebnisse für System 1, der Raumhelligkeit für System 2 und der Innenraumtemperatur für System 6. Das gleiche Prinzip erfolgte für die Messwerte. Hier bekam für die Helligkeit ebenfalls Raum 2 die meisten Punkte, bei der Raumwirkung beispielsweise war dies Raum 3. Anhand von Gewichtungen, also der Zuweisung einer größeren prozentualen Priorität für einzelne Kategorien an der Gesamtbewertung, zum Beispiel der Temperatur oder aber der Helligkeit, können diese Ergebnisse den Bedürfnissen der jeweiligen Bauaufgabe angepasst werden.

Ein Vergleich der Ergebnisse von subjektiven und objektiven Kriterien zeigte eine gute Übereinstimmung. In Raum 2 liegen die Messwerte über denen der Befragungen. Grund hierfür ist die deutlich höhere Raumhelligkeit. Bei den Befragungen wird Raum 5 leicht besser bewertet als dies die Messungen zeigen. Dies mag zurückzuführen sein auf die bessere Aussicht und die geringere Blendung.

Zum Abschluss wurden Kriterien für eine Bewertungsmatrix definiert, wie sie in der Praxis, auch ohne Befragungen vor Ort durchzuführen, für den Vergleich unterschiedlicher Systeme eingesetzt werden kann (Kapitel 7.3). Dabei wurden nur eindeutige abhängige Messgrößen für die unterschiedlichen Anforderungen integriert, so zum Beispiel der Sonnenlichtquotient für die Beurteilung der Raumhelligkeit in Abhängigkeit der Außenbedingungen.

9 Zusammenfassung

9.1 Aufgabe und Ziel

Der Mensch verbringt heute die meiste Zeit des Tages in geschlossenen Räumen. Die Lichtbedingungen am Arbeitsplatz haben nachweislich einen Einfluss auf Gesundheit, Wohlbefinden und Produktivität, aber auch auf den Energieverbrauch und damit auf die Kosten eines Gebäudes.

Der Einfluss von Licht auf den Menschen durch das visuelle System, also das Sehen, ist weitgehend bekannt. Nach diesen Kriterien richten sich die in den Regelwerken genannten Mindestbeleuchtungsstärken für Büroarbeitsplätze; die Qualität wird dadurch meist durch die Quantität definiert. Aussagen über die Qualität der Raumbelichtung durch Tageslicht werden kaum gegeben und Grenzwerte, wie sie beispielsweise für Blendung existieren, können bei Tageslichtbeleuchtung nach bereits durchgeführten Studien meist deutlich überschritten werden. Die Akzeptanz von Lichtbedingungen am Arbeitsplatz unterliegt, neben den visuellen und circadianen Kriterien, auch der Wahrnehmung, die individuelle Erfahrung und vor allem Information über das Gesehene beinhaltet. Dies ist ein Grund, warum Kunstlichtszenarien meist kritischer bewertet werden als durch Tageslicht beleuchtete Räume. Güteermere wie der Bezug zur Außenwelt, die Orientierung im Raum, die Kommunikation mit Mitmenschen, die Arbeitsbedingungen und nicht zuletzt das Verstehen der Situation und der Zusammenhänge spielen neben den objektiven Kriterien wie der Raumhelligkeit für die Zufriedenheit am Arbeitsplatz eine große Rolle und machen die Komplexität der Wahrnehmung von Lichtbedingungen aus.

Die Nutzung des Tageslichtes am Arbeitsplatz birgt auch Konflikte in sich. Diese entstehen aufgrund unterschiedlicher Ansprüche wie Sonnenschutz zur Vermeidung von Überhitzung und Blendschutz auf der einen Seite und dem Bedürfnis nach Außenkontakt und nach Tageslicht auf der anderen Seite. Die in den letzten Jahren von der Industrie entwickelten komplexeren Sonnenschutz- und Lichtlenksysteme nutzen einen Teil der verglasten Fläche, um Tageslicht in den Innenraum zu lenken, während der größere Teil zur Vermeidung von Blendung und Überhitzung verschattet wird. Die Bewertung solcher tageslichtbeleuchteter Räume ist offen, ein Vergleich mit Bedingungen unter Kunstlicht kaum möglich.

Das Ziel dieser Studie war deshalb, Aussagen über die Qualität der Tageslichtbeleuchtung in Büroräumen bei geschlossenen oder aktiven Sonnenschutz- und Lichtlenksystemen und besonderer Fassade zu erfassen, objektive Kriterien für die subjektive Bewertung von Nutzern zu erarbeiten, und ein Bewertungsverfahren für den Einsatz in der Planungspraxis zu entwickeln.

9.2 Methode

Um das Ziel der Akzeptanzermittlung an unterschiedlichen Fassadensystemen zu erreichen, wurde zunächst eine Literaturstudie durchgeführt, deren Auswertung einige Themenbereiche aufzeigte, die bisher meist bei Kunstlichtbedingungen oder aber bei Tageslicht, jedoch unter Ausschluss von aktiven Sonnenschutzsystemen, untersucht worden waren. Auf Basis dieser Untersuchungen konnten Defizite formuliert und so die Fragestellungen für diese Arbeit erarbeitet werden.

Zur Erfüllung der Aufgabe wurden Messungen und Befragungen in sechs nahezu identischen Arbeitsräumen an unterschiedlichen Systemen über ein Jahr durchgeführt. Dabei kamen zum einen reine Sonnenschutzsysteme zum Einsatz und zum anderen Systeme, die den oberen Bereich der Fassaden für die Lenkung des Sonnenlichtes in den Innenraum nutzen. Die Erfassung lichttechnischer Daten wie der horizontalen (Arbeitsebene und Decke) und verti-

kalen Beleuchtungsstärken (rückwärtige Wand und Augenhöhe) sowie der flächenhaften Leuchtdichten (aus zwei Nutzerpositionen und dem Raumhintergrund) zeitgleich mit den Befragungen wurde ergänzt durch Farbmessungen. Für die Entwicklung von Fragebögen wurde auf existierende Fragebögen zurückgegriffen und diese den abweichenden Rahmenbedingungen angepasst. Die in einer Datenbank erfassten Ergebnisse aus Messungen und Befragungen wurden zur Auswertung in zehn verschiedenen Themenblöcken, u.a. „Helligkeit“, „Farb- und Raumwirkung“, „Blendung“ oder „Aussicht“ gefasst, anhand derer die Ergebnisse in vier Auswertungsschritten statistisch analysiert werden konnten. Über eine einfache Auszählung des Gesamtdatensatzes von Messungen und Befragungen hinausgehend wurde die Systemabhängigkeit untersucht, um den Einfluss verschiedener Fassaden auf die Beurteilung der Innenraumbelichtung zu erfassen. Bezüge zwischen den Themenbereichen, wie zum Beispiel der Zusammenhang zwischen Ausblick und Helligkeit im Innenraum, wurden herausgearbeitet. Die statistische Korrelation der Ergebnisse aus den Befragungen zu lichttechnischen Messwerten diente der Ermittlung der wichtigsten Messgrößen für die subjektiven Bewertungen. Ein vierter Schritt der Analyse machte die Bestimmung von Grenzwerten möglich, bei denen die Aussagen der Probanden mit einer großen Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden können.

Um die Ergebnisse für die Praxis verwertbar zu gestalten wurde auf Basis vorhandener Tageslichtsignaturen ein erweitertes Bewertungsverfahren entwickelt, welches sowohl gemessene Werte als auch die Beurteilung durch den Nutzer integriert. Dabei wurden die erhaltenen Daten in eine Skala von sechs Punkten umgerechnet, um eine einfache Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

9.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der lichttechnischen Messungen dokumentieren deutlich die Funktionsweisen der unterschiedlichen Systeme und deren Einfluss auf die Innenraumbelichtung, beispielsweise die Lichtverteilung oder die Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz.

Die einfache Auszählung der Ergebnisse zeigte einige Kriterien, die unabhängig von den eingesetzten Systemen bewertet wurden (Anhang, Tabelle 12.5-2). Dazu zählen das allgemeine Wohlbefinden am Arbeitsplatz sowie eine Behinderung durch zu hohe Raumtemperaturen. Darüber hinaus ist die Bewertung von störenden Spiegelungen, die durch direkte Sonneneinstrahlung und Reflexen an Systemen auf Raumflächen entstehen können, unabhängig vom eingesetzten System, nicht jedoch die Häufigkeit dieser Erscheinungen. Ebenso stellt sich die Störung durch ein starres System sowie die Wichtigkeit von Eingriffsmöglichkeiten systemunabhängig dar.

Deutlich systemabhängig (Anhang, Tabelle 12.5-3) wurden subjektive Bewertungen vorgenommen, die die Offenheit oder Geschlossenheit des Raumeindrucks repräsentieren. Die Empfindung der Rauminnentemperatur zeigte sich systemabhängig, ebenso wie die empfundene Schutzfunktion. Die Aussicht bei geschlossenen Systemen sowie der Eindruck von Privatheit im Innenraum, die Häufigkeit von Blendung, nicht jedoch der Grad an Störung, waren abhängig von den eingesetzten Systemen. Deutliche Unterschiede verzeichnete auch eine Frage nach der Ästhetik und der Funktion als Statussymbol. Bei der Helligkeit im Raum wurde die Raumwirkung (hell – dunkel) und die Bewertung der Quantität (ausreichend oder nicht) entsprechend der Ausstattung bewertet, ebenso wie die Beurteilung einer Lichtlenkung, wenn vorhanden. Eine angenehme, natürliche und kalte oder warme Licht- und Raumwirkung sowie die Wahrnehmung von Farbänderungen zeichneten sich ebenfalls systemabhängig.

Es zeigte darüber hinaus, dass auch zwischen den Themenbereichen Abhängigkeiten auftraten, so zum Beispiel zwischen Ausblick und Raumbelichtung. Die negative Bewertung eines fehlenden Ausblicks kann nach den vorliegenden Ergebnissen durch Lichtlenkung und damit helleren Raumbooberflächen teilweise kompensiert werden, ebenso wie der Eindruck der Offenheit eines Raumes. Die Forderung nach zusätzlichen Schutzeinrichtungen, also über die installierten Systeme hinausgehenden Einrichtungen, wird in Abhängigkeit der Blendung, jedoch unabhän-

gig von der Innenraumtemperatur gefordert. Außerdem besteht ein Zusammenhang zwischen dem Wunsch nach Ausblick und der individuellen Einstellung von Systemen, die, wenn möglich, zugunsten des Ausblicks geöffnet werden, auch wenn lichttechnisch und wärmetechnisch gesehen, das Resultat ein schlechteres ist.

Für jede Fragenkategorie konnten im Rahmen der Faktorenanalyse signifikant abhängige Messgrößen ermittelt werden (Anhang, Tabelle 12.5-1), die häufig von den in den Regelwerken genannten abweichen. Bei der Bewertung der Schutzfunktion eines Systems beispielsweise spielen ausschließlich die vertikalen Beleuchtungsstärken eine Rolle, ebenso für die Bewertung des „ausreichenden“ Tageslichtes am Arbeitsplatz. Diese sind neben den Außen- und Deckenbeleuchtungsstärken sowie dem vertikalen Sonnenlichtquotienten auch für die Beurteilung der Raumwirkung „hell – dunkel“ ausschlaggebend. Die mittleren Leuchtdichten sind relevant für die Bewertung einer Einschränkung der Tageslichtversorgung, der Lichtlenkung und der Störung durch verminderten Tageslichteinfluss. Maximale Leuchtdichten hingegen zeigen sich signifikant für das Thema Blendung. Darüber hinaus wurde deutlich, dass die meist auf thermischen Kriterien beruhende Regelung und Steuerung von Systemen nicht die für den Nutzer ausschlaggebenden Kriterien widerspiegeln, das Verständnis über Ursache und Auswirkung von Sonnenschutzsystemen also nicht immer gewährleistet wird.

Schwellwerte konnten für die Themenbereiche Blendung, Helligkeit, Ausblick und Funktion sowie für die Raumwirkung definiert werden. Dabei heißt Schwellwert, dass das jeweilige Ergebnis mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von um 80% vorausgesagt werden kann (Anhang, Tabelle 12.5-4). Für die Blendung im Innenraum zeichneten sich die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge, die mittlere Leuchtdichte sowie die maximale Leuchtdichte jeweils aus einer Nutzerposition signifikant. Insbesondere der Schwellwert von über 3000 Lux der vertikale Beleuchtungsstärke in Augenhöhe Richtung Fenster gemessen deckt sich auch mit anderen Untersuchungen [OST, VEL]. Deutliche Zusammenhänge zeigten sich in der Beurteilung der Raumhelligkeit. Das Zuschalten des Kunstlichtes zeigte sich abhängig von den Außenbedingungen, im Gegensatz dazu wurde die ausreichende Tageslichtversorgung am Arbeitsplatz sowie die Raumwirkung (hell – dunkel) auf Basis der Innenbeleuchtung beurteilt. Für eine positive Beurteilung der Wirkung, also dem Kommentar „eher heller“ Raumeindruck, wurden durchweg höhere Schwellwerte definiert als für das „ausreichende“ Tageslicht am Arbeitsplatz. Hier spielen die vertikale Beleuchtungsstärke in Augenhöhe sowie die Deckenbeleuchtungsstärke eine große Rolle, die durch Lichtlenksysteme erhöht werden kann. Die Beurteilung der Funktion eines Sonnenschutzes wird ebenfalls eher auf Basis von vertikalen Beleuchtungsstärken in Augenhöhe getroffen. Ein zusätzlicher Schutz wurde hier bei fast 3800 Lux mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 80% gefordert.

Über die Analyse der Themenkategorien hinausgehend wurden in Kapitel 3.2.2 Thesen bzw. Fragestellungen auf Basis der Literaturlauswertung formuliert, die am Ende anhand der Ergebnisse überprüft werden konnten. Sie beinhalten die Annahme, dass die Beurteilung von Innenräumen stark von den eingesetzten Fassadensystemen abhängig ist. Dabei lag das Hauptinteresse darin, wie sich die Wahrnehmung bei unterschiedlichen geschlossenen Systemen verhält, auch gegenüber Kunstlichtszenarien, wie sie in der Literatur häufig untersucht worden sind. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die Thesen weitgehend. Eine Zusammenfassung zeigt Tabelle 9.3-1.

Die Wahrnehmung von Raum und Licht ist abhängig davon, welche Funktionsweisen die Systeme aufweisen und welche Lichtumgebung sie schaffen. Dabei konnten in den Bereichen Helligkeit und Blendung abweichende Ergebnisse gegenüber den Regelwerken festgestellt werden. Außerdem konnte die Abhängigkeit der Bewertung von den Außenbedingungen, wie in anderen Untersuchungen bereits dokumentiert, ebenfalls nachgewiesen werden. Deutlich wurde bei der Überprüfung der Thesen noch einmal, dass für die subjektive Beurteilung von Lichtszenarien andere, nicht in Regelwerken enthaltene Größen, wie z.B. die horizontale Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene, wichtig sind.

Tabelle 9.3-1: Tabellarische Zusammenfassung der Thesen

Thesen	Erfüllt?
1 Einfluss des Fassadensystems auf Akzeptanz der Raumbeleuchtung und Wohlbefinden des Nutzers	JA, im Bezug zur Raumbeleuchtung, nicht aber im direkten Bezug zum Wohlbefinden
2 Größere Helligkeit schafft mehr Zufriedenheit; 500 Lux in der Arbeitsebene sind für einen „hellen Raumeindruck“ nicht ausreichend	JA
3 Fehlende Korrelation der Beurteilung der Qualität des Tageslichtes mit lichttechnischen Messwerten (horizontalen Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz)	JA, unterschiedliche Fragen verlangen nach unterschiedlichen Messgrößen zur Beurteilung
4 Akzeptanz des geschlossenen Sonnenschutzes bei ausreichender Helligkeit oder Lichtlenkung	JA, keine vollständige Kompensation, aber Verringerung negativer Wahrnehmung
5 Höhere Akzeptanz von Blendung durch Tageslicht als in Regelwerken	JA
6 Einfluss der veränderten Lichtfarbe durch Fassadensysteme auf die Bewertung der Raumwirkung.	JA, allerdings nur tendenziell, da wenig Messungen vorlagen
7 Beschreibung der Akzeptanz von Lichtbedingungen am besten mit Akzeptanzwahrscheinlichkeit	JA
8 Von System und Helligkeit unbeeinflusstes Temperaturempfinden	NEIN
9 Von der Außenbeleuchtung abhängige Bewertung der Innenraumbeleuchtung	JA
10 Hinweise durch Akzeptanzstudien auf mögliche Fehlerquellen und zu Grenzwerten bezogen auf Tageslicht und (neue) Sonnenschutzsysteme	JA

9.4 Anwendbarkeit für die Praxis

Auf Basis der Messungen und Befragungen wurde eine gegenüber früheren Tageslichtsignaturen erweiterte Bewertungsmatrix aufgestellt (Kapitel 7). Die Entwicklung dieses Verfahrens unter Integration subjektiver Bewertungskriterien und die exemplarische Anwendung auf die in der vorliegenden Studie untersuchten Systeme zeigt die Machbarkeit einer solchen Vorgehensweise auf. Wenn auch das Verfahren Matrix Erweiterungspotenzial bietet, so zum Beispiel die Integration der circadianen Wirkungsfunktion, so zeigt sie dennoch in ihrem jetzigen Umfang bereits den möglichen Einfluss auf die Entscheidungen in der Planung zugunsten einer größeren Nutzerzufriedenheit am Arbeitsplatz auf.

10 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Arbeit hatte zum Ziel, die Akzeptanz der Beleuchtung in Arbeitsräumen bei besonnener Fassade und geschlossenen Sonnenschutzsystemen zu erfassen. Die Ergebnisse konnten Aufschluss geben über die von der Wahrnehmung der Probanden beeinflussten Bewertungskriterien. Häufig entsprachen sie nicht den in den Regelwerken genannten Messgrößen sondern basierten vielmehr auf vertikalen Beleuchtungsstärken oder Leuchtdichten.

Die Studie wurde anhand von Nutzerbefragungen sowie lichttechnischen Messungen an unterschiedlichen Systemen und gleich ausgestatteten Räumen durchgeführt. Die Befragungsergebnisse zeigen eine gute Konsistenz und deutliche Ergebnisse im Bezug auf die eingesetzten Systeme. Die Akzeptanzuntersuchungen führen zu dem Schluss, dass das Fassadensystem insgesamt einen entscheidenden Einfluss nicht nur auf die resultierende Tageslichtbeleuchtung sondern auch auf die Bewertung durch den Nutzer hat. Die Auswertung der Messergebnisse zeigte deutlich die Unterschiede lichttechnischer Kriterien bei den Systemen und ihren Funktionsweisen auf.

Die Vorgehensweise in dieser Arbeit hat sich insgesamt als sinnvoll herausgestellt, um die gestellte Aufgabe zu erfüllen. Dennoch sei an dieser Stelle genannt, dass die Ergebnisse der Kurzzeitbefragungen, wie sie hier durchgeführt wurden, in Langzeitversuchen leichte Abweichungen zeigen und in diesem Rahmen keine Aussagen zur Auswirkung auf Gesundheit und den biologischen Rhythmus gemacht werden könne. Darüber hinaus wird in der Literatur die unterschiedliche Bewertung des Beleuchtungsniveaus in Langzeit- und Kurzzeitstudien ebenfalls genannt.

Bei der Auswertung der Literatur wurden im Ergebnis meist wesentlich höhere Beleuchtungsstärken von den Nutzern gewünscht, als in geltenden Regelwerken und damit in der Praxis realisiert. In den zitierten Labor- und Feldversuchen sind unterschiedliche Werte für die Zufriedenheit mit der Raumbelichtung am Arbeitsplatz festgestellt worden. Hierzu konnten Ergebnisse aus dieser Arbeit zum Thema Tageslicht mehr Klarheit liefern. Deutlich dokumentiert werden konnte das erhöhte Bedürfnis nach Licht gegenüber den Regelwerken, die durch die statistische Analyse von Zusammenhängen zwischen Messungen und Befragungen ermittelt wurden. Für den subjektiven Raumeindruck sind weniger horizontale, sondern vertikale Beleuchtungsstärken oder Leuchtdichten relevant.

Die Systemabhängigkeit der Ergebnisse, die sich meist signifikant zeigte, belegt, dass eine Verallgemeinerung der Sonnenschutzfunktion, wie sie in den Regelwerken üblich ist (beispielsweise über den g-Wert), in der Realität nicht praktikabel ist, da sie die Unterschiede der Auswirkungen auf die Innenraumbelichtung nicht erfassen kann.

Manche Zusammenhänge zwischen gemessenen Werten und Befragungsergebnissen zeigten sich statistisch nicht signifikant, obwohl dies der Realität entsprechen würde. Der Grund hierfür kann in einer geringen Anzahl an entsprechenden Antworten oder aber auch in einer großen Streubreite an Ergebnissen liegen. Ein weiterer Grund hierfür kann die unterschiedliche Tendenz in den Einzelräumen sein, das heißt, in manchen Räumen kam es zu positiven, in anderen zu negativen Abhängigkeiten. Zum Teil konnten diese, auf alle Systeme bezogenen, nicht signifikanten Zusammenhänge bei der Betrachtung nach Einzelräumen sehr eindeutige Ergebnisse liefern. Insbesondere der Vergleich sehr unterschiedlicher Systeme, zum einen reiner Sonnenschutzsysteme und zum anderen verschiedener Lichtlenksysteme, konnte Hinweise auf die Akzeptanz und die Kompensation üblicherweise negativ bewerteter Kriterien, beispielsweise bei der Aussicht, durch andere positive Kriterien, zum Beispiel eine hohe Raumhelligkeit, geben. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Funktionsweisen kann darüber hinaus davon ausgegangen werden, dass Ergebnisse, die in allen Räumen mit ähnlicher Tendenz bewertet wurden, auch für andere, hier nicht untersuchte Systeme gelten, eine Verallgemeinerung für die Planungspraxis also möglich ist.

Ein wichtiges Ziel bildet daher die einfache vergleichende Bewertung unterschiedlicher Tageslicht- und Kunstlichtsysteme für die Planungspraxis. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Ansätze für ein Bewertungsverfahren entwickelt.

Für einige Kriterien konnte die Basis geschaffen werden, andere wie etwa die Lichtfarbe oder die circadiane Wirksamkeit müssen in Zukunft noch untersucht und in das Verfahren integriert werden. Weiteres Optimierungspotential ist vorhanden, so zum Beispiel bei der Integration von Messwerten, die durch den Einsatz von Schwellwerten oder Beurteilungsbereichen möglicherweise noch bessere Vorhersagen erlauben würde. Insgesamt konnte deutlich gezeigt werden, dass diese Methode eine Bewertung unterschiedlicher Tageslichtsysteme durch neu integrierte, auf die Wahrnehmung der Nutzer ausgerichtete, lichttechnische Parameter/Messgrößen ermöglicht. Insbesondere auf dem Gebiet der Realisierung werden Argumentationshilfen gegenüber Bauherren und Investoren benötigt. Eine monetäre Betrachtung der Effizienzsteigerung von Mitarbeitern im Hinblick auf die Investition in eine gute (Tageslicht-) Beleuchtung bildet daher eine interessante Forschungsaufgabe.

Aufgaben für die Zukunft sollten daher die Überprüfung geltender Regelwerke hinsichtlich ihrer circadianen Wirksamkeit beinhalten, dabei insbesondere Kunstlichtquellen und Tageslichtsysteme, die die Lichtfarbe im Innenraum erheblich beeinflussen können. Darüber hinaus sollten für eine hohe Akzeptanz am Arbeitsplatz sowohl die Unterschiede bei der Bewertung von Tageslicht und Kunstlicht, aber auch die von den Regelwerken abweichenden subjektiven Beurteilungen bereits bei der Planung mit berücksichtigt werden.

11 English summary

11.1 Task and aim of the study

The human being nowadays spends the largest part of the day in enclosed spaces. The lighting conditions have been proven to have an impact on health, well-being and productivity of people, furthermore on energy consumption and therefore on maintenance costs of a building.

The influence of light on the human being through the visual system is widely known. These are the criteria most of the building regulations are based on, e.g. the horizontal illuminance in the working plane for office spaces. The lighting quality therefore is defined by the quantity of light. Statements about the quality of daylight are rarely given and critical values, for example in terms of glare, mostly are much higher according to different studies when using daylight as a light source. The acceptance of the lighting environment in an office is subject to, apart from visual and circadian criteria, the perception including the individual experience and the information reflected by objects in the visual field. This is one reason for a more critical perception of artificial lighting scenarios in contrast to daylight spaces. Quality criteria such as the contact to the outside, the orientation in a space, the communication with colleagues, the working conditions and the understanding of a situation with its interactions are important for the satisfaction in the working environment. Apart from the objective criteria such as the illumination level they form the complexity of the lighting conditions perception.

The use of daylight in an working environment also creates conflicts, emerging through multiple claims such as shading or solar protection to avoid overheating as well as glare protection on the one hand and the need for contact to the outside as well as daylight on the other hand. The complex shading and light directing elements developed during the past years by the building industry use part of the glazed area to reflect natural light into the interior space. The larger part of the glazed area will be shaded to reduce solar penetration and glare. An evaluation of such spaces does barely exist; a comparison with artificial lighting conditions does not lead to any conclusions.

The aim of the study therefore was to receive statements about the quality of daylight office spaces with closed daylighting and shading systems under sunny conditions and to develop objective criteria for the subjective rating of users. Furthermore a rating scheme to compare different systems based on the user acceptance for the use in the planning reality had to be developed.

11.2 Methodology

To prepare the user acceptance studies with different facade systems first of all a literature review has been carried out. The evaluation showed different topics which so far only have been studied under artificial lighting conditions or under natural lighting conditions but without using active shading or light directing elements. Based on these results deficits could be expressed and therefore questions for this study set.

To fulfil the task of the study a monitoring program as well as questionnaires have been developed and carried out in six nearly identical office spaces over a whole year. The systems included shading devices reducing solar radiation on the one hand and light directing systems using the upper part of a window to direct light onto the ceiling deep into the space on the other hand. The monitoring program included horizontal (working plane and ceiling) and vertical illuminances (back wall and at eye height) as well as luminances taken with CCD- cameras with fish eye lenses (two positions of the user and from the back wall). This program was complemented through occasional colour measurements and was carried out simultaneously with questionnaires based on existing questionnaires and

adapted to the requirements for this study. To carry out the statistical analysis the resulting database of measurements and questionnaires was separated into ten different topics such as “brightness/ lighting levels”, “colour and space perception”, “glare” or “view out”. Four analysing steps included the simple counting of results as well as the analysis of room wise counting to evaluate the influence of different facades on the judgement of the interior lighting conditions. Furthermore relations between the topics such as view out and lighting levels have been investigated. The statistical correlation of the subjective results to objective measured data served the findings of the most important measured quantity for each topic. Limiting values for some of the measured data could be analysed in a fourth step of statistics to predict the subjective perception of users with a high probability.

At the end an extended valuation method, based on existing daylighting signatures and including monitored objective and subjective data, was developed to transfer the findings of this study to a practical level. The intention was to allow a simple comparison of different facades.

11.3 Summary of results

The results of the light technological measurements document clearly the function and performance of the different systems and their influence on the interior lighting conditions, e.g. the light distribution or the illuminances in the horizontal working plane of the space. The simple counting of the database showed some criteria rated independently of the used daylight system. These include the well-being at the working place, the disturbance through high room temperatures, the rating of disturbing reflections, but not their frequency, and last but not least the disturbance through a fixed system as well as the importance of individual control.

Clearly correlated to the installed system were the subjective ratings representing openness or enclosure, the sensation of the indoor temperature and the perception of the protective function of systems, furthermore the view to the outside as well as the feeling of privacy. The frequency of glare but not the grade of disturbance was related to the facade system. Clear differences also could be found in the judgement of aesthetics and the function as a status symbol. In terms of lighting levels the space perception between “bright” and “dim” has been rated according to the systems as well as the lighting quantity (“sufficient” or “not sufficient”). Judgements on light direction are dependent on the facades and the “pleasant”, “natural”, “cool” or “warm” perception of lighting and space as well as colour changes through the closed systems in comparison to the outside.

Correlations between the different topics showed statistical significant results between the view out and the interior lighting conditions. A negative rating of a missing view out or a feeling of enclosure can therefore be partly compensated through effective light direction. The demand for additional protection beyond the installed systems was rated in correlation to glare but not in correlation with the room temperature. Furthermore there is a connection between the request for the contact to the outside and the individual control of the installed systems, which will be opened whenever possible to have a better view out not taking into account the possibly worse conditions in terms of lighting and thermal performance.

The determination of significant correlated measured quantities within an intensive statistical factor analysis of each category showed frequently deviating results in comparison to the building regulations. Regarding the protective function of systems for example only the vertical illuminances were decisive as well as for the question on sufficient daylight. These are, apart from the exterior and ceiling illuminances and the vertical sunlight coefficient, also significant for the perception of brightness (“bright” – “dim”). The mean luminances of the space are relevant for the rating of restriction of the supply with daylight, the light direction and the disturbance through reduced daylight due to the closed systems. Maximum luminances however do influence glare issues. Furthermore the analysis showed that the

mostly on thermal criteria based operation systems do not reflect the user's preferences and therefore do not guarantee the understanding of cause and effect of automatically operated shading devices.

Limiting values could be defined for the topics "glare", "brightness/ lighting levels", "view out", "functionality" and "colour and space perception". They are defined as a result which can be predicted with a probability of about 80%. To assess glare in an office environment under daylit conditions vertical illuminances, mean luminances and maximum luminances could be defined. Above all the limiting value of more than 3000 lux vertical in the position of the eye and in the direction of the window corresponds with other studies [OST, VEL]. Clear connections could be found within the topic of "brightness or lighting levels"; the need for additional artificial lighting depends on the external conditions, in contrast the question of sufficient daylight and the perception of brightness ("bright" - "dim") was rated in relation to the indoor lighting conditions. For a positive rating of the perception of brightness higher limiting values have been found than for the question of sufficient daylight. The vertical eye illuminance and the illuminance at the ceiling were the significant measured quantities here, the latter with the possibility of raise through light directing elements. The protective function of systems also was judged on the base of vertical eye illuminances. An additional protection was requested when illuminance levels exceeded 3800 lux.

Beyond the analysis of the ten different topics the third chapter included the formulation of thesis on the base of the literature review, which could be verified through the results of this study. These issues contain the assumption that the perception of interior spaces is closely related to the installed facade and shading system. The main interest was to investigate the perception when the sun was penetrating the facade and the systems were closed, especially in contrast to studies on artificial lighting environments. The outcoming of this study confirms most of the thesis. A summary is shown in table Table 11.3-1.

Table 11.3-1: Summary of the thesis

Thesis	Confirmed?
1 There is an influence of the facade system on the user's acceptance of the lighting conditions and well being	YES, in relation to the lighting conditions, but not in relation to the well being
2 Higher lighting levels create more satisfaction; 500 Lux in the working plane are not sufficient for the perception of "brightness"	YES
3 The judgement of daylight quality in office spaces does not necessarily correlate with the measured quantity, e.g. horizontal illuminance in working plane given in building regulations	YES, different levels of questions need different measured quantities für the rating
4 The acceptance of closed systems and therefore mostly a restricted view raises when sufficient lighting levels or light direction are provided	YES, not a full compensation but a less negative perception
5 There is a better acceptance of glare in daylit spaces in contrast to building regulations	YES
6 The change of colour in indoor spaces has an impact on the acceptance and the rating of perception of a space	YES, but only as a tendency as the amount of colour measurements was not significant
7 The users acceptance of lighting conditions can be best described with a defined probability of acceptance (in comparison to mean values as widely used)	YES
8 The sensation of indoor temperatures is does not correlate with the lighting conditions and will not be influenced by the shading system	NO
9 The rating of the interior lighting environment depends on the outdoor lighting conditions	YES
10 Studies on the user's acceptance can give hints on possible weakness of systems and on limiting values of daylight conditions and (new) shading and light directing devices	YES

The perception of space and light therefore depends on the functionality of systems and the resulting lighting environment. Particularly within the topics “brightness/ lighting levels” and “glare” the study has shown deviating results in comparison to the building regulations. The outdoor conditions could be found as important criteria for the rating of indoor lighting conditions as found in other studies. Furthermore the results clearly demonstrate that the subjective perception of lighting conditions underlay other quantities which are not included in the building regulations.

11.4 Usability within the planning reality

On the base of existing daylight signatures there has been worked on an extended valuation method including the results of measurements and questionnaires. The integration of this study's database into the valuation method and the exemplary application shows clearly the feasibility of this method; however the method has potential for extension and optimisation. This could be the integration of the circadian efficiency function as an example. But it already shows the possible influence on the decision of architects and planners for an improved user acceptance in working spaces.

11.5 Conclusions

This study aimed to investigate the user's acceptance of lighting conditions in office spaces with closed or activated shading and light directing systems. The results provided information on the valuation criteria influenced by the perception of the human being. Quite frequently these were not based on the widely known measured quantities used in building regulations but based on vertical illuminances or luminances. The study was carried out through questionnaires and a monitoring program in identical rooms with different installed facade systems. The database shows a very good consistency and distinct results. These show the facades decisive influence on the lighting quality and the perception of the user. The measured values show clearly the differences of the systems functionality.

The methods have been proved to be right for the task of the study. However, the results of the short term monitoring and questioning program can show deviations in comparison to long term investigations, which other studies have shown. Furthermore, within these settings, no results on the biological rhythm are possible.

The literature shows mostly higher illuminances requested by users than given as a minimum by building regulations. But within these studies different values have been found for the satisfaction with the illumination of working spaces. In this respect this study could uncover more clear results for daylit spaces under sunny conditions. Especially the necessity of higher illuminances could be statistically proofed. And for the perception of space vertical illuminances or luminances could be found more relevant than horizontal illuminances. The influence of the installed systems proved that the generalisation of e.g. shading coefficients (e.g. g-value) does not give any hints on lighting quality and perception and therefore cannot take into account different shading devices and their function.

Some of the correlations between measured values and the outcome of questionnaires have not been significant, although it was expected. The reason can be found in a limited number or in a wide range of answers. Another reason could be the variation in different rooms with different systems, some of which result in negative correlations, some in positive. Partly, some of the non significant results, given over all systems, could deliver very clear results when looking at the single systems. Especially the comparison of very diverse systems, shading devices on one hand and light directing devices on the other hand, lead to the results of compensation of normally negatively rated criteria, e.g. a missing view out, with other positively rated criteria, e.g. effective light direction or higher brightness. Furthermore, because of the very different systems, results which have been shown consistent correlations in all rooms, are more likely to be used for other systems as well and therefore can be generalised.

An important task is the simple comparative evaluation of different daylighting and artificial lighting systems for the planning reality. Within this study an approach for daylighting systems with the integration of subjective ratings into a valuation method has been developed. For some of the criteria a valuable database could be developed, others, such as the lighting colour and the circadian efficiency need to be explored in more detail in the future. Optimisation, such as the integration of limiting values into the valuation method, is possible to better predict the probability of acceptance. Altogether the method showed the evaluation of different systems based on the newly integrated user acceptance. Particularly for the realisation of buildings well funded arguments and reasons are needed towards clients and investors. A simple monetary calculation of the increased efficiency of employers with regard to the investment in a better lighting environment would therefore be a stunning research task.

Objectives for the future therefore should include the verification of existing building regulations with regard to the circadian efficiency, here especially artificial lighting and shading systems influencing the colour. Furthermore, for a high acceptance of lighting conditions in an office environment the differences between artificial and daylighting should be integrated in planning process, as well as the deviation from building regulations.

12 Anhang

12.1 Literaturverzeichnis

- [ARI a] Aries, M.B.C.; Begemann, S.H.A.; Zonneveldt, L.; Tenner, A.D.: Retinal Illuminance form vertical daylight openings in office spaces. Right Light 5, Nizza, 2002
- [ARI b] Aries, M.B.C.: Human Lighting Demands - Realisation Natural Lighting. IEA Task 31 Symposium Ottawa, Canada, 2002
- [ASR 7/3] Arbeitsstättenrichtlinie Künstliche Beleuchtung, 1993
- [ArbStättV] Verordnung über Arbeitsstätten vom 12. August 2004 – ArbStättV, 2004
- [BAR a] Bartenbach, C: Bauen mit Licht- Überblick über laufende Planungs- und Entwicklungsprojekte im Bartenbach LichtLabor und im Kompetenzzentrum Licht. Zehntes Symposium Innovative Lichttechnik, Staffelstein, 2004
- [BAR b] Bartenbach, C.: Zangerl, H.: Tagesbelichtung von Arbeitsräumen - Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Aspekte. Tagung Licht, Dortmund, 2004
- [BEG] Begemann, S.H.A.: van den Beld, G.J.; Tenner, A.: Daylight, artificial light and people in an office environment, In: Advances in Occupational Ergonomics and Safety I, Vol. 2, S. 192-198, 1996
- [BEL] van den Beld, G.: Gesundes Licht am Arbeitsplatz. Zehntes Symposium Innovative Lichttechnik, Staffelstein, 2004
- [BGI 827] Sonnenschutz im Büro, VBG, 2005
- [BGI 856] Beleuchtung im Büro, VBG, 2005
- [BIN] Systematik zu Tageslichtlenkssystemen. Institut für Licht- und Bautechnik, FH Köln, Überarbeitet durch Informationsdienst BINE, Oktober 2000
- [BIS] Bischof, Wolfgang; Monika Bullinger-Naber; Boris Kruppa; Bernd Hans Müller; Rudolf Schwab: Exposition und gesundheitliche Beeinträchtigung in Bürogebäuden - Ergebnisse des ProKlimA- Projektes. Fraunhofer IRB Verlag, 2003
- [BOD] Bodmann, H.W; Eberbach, K.; Leszczynska, H.: Lichttechnische und ergonomische Gütekriterien der Arbeitsplatzbeleuchtung im Büro. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaften, Bremerhaven, 1995
- [BOM a] van Bommel, W.J.M., van den Beld, G.J., van Ooyen, M.H. F.: "Industrielle Beleuchtung und Produktivität", Tagung Licht, Maastricht, 2002
- [BOM b] van Bommel, Ir W J M; van den Beld, Ir G J: Lighting for Work: Visual and biological Effects. In: Lighting Research and Technology No. 36(4), pp.255-269, Eindhoven, Niederlande, 2004
- [BOU] Boubekri, M.; Boyer, L.L.: Effect of window size and sunlight presence on glare. In: Lighting Research and Technology No. 24, 1992
- [BOY a] Boyce P.R.: Illuminance Selection Based on Visual Performance - and Other Fairy Stories. In: Journal of the Illuminating Engineering Society, 25(2), S. 41-49, 1996

- [BOY b] Boyce, P. C.; Hunter, O.: The Benefits of Daylight through Windows. Literature Review. US Department of Energy, 2003
- [BOY c] Boyce, P.R.; Veith, J.A.; Newsham, G.R., Myer, M., Hunter, C: Lighting Quality and office works: A field simulation study. US Department of Energy, 2003
- [BOY d] Boyce, P.R.: Why daylight? Tagungsbericht Daylighting '98, 1998
- [BRA a] Brainhard, G.C., R.R. Long, J.P. Hanifin, F.L. Ruberg, J.R. Gaddy: Architectural Lighting - Balancing Biological effects with Utility Costs in Holick, Symposium Biological Effects of Light 1993, Basel, Schweiz, 1993
- [BRA b] Brainhard, G.C. u.a.: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, In: Journal of Neuroscience, 21 (2001) 16, S. 6405 – 6412, 2001
- [BRA c] Brainhard, G.C., J. P. Hanifin: Action Spectrum for Melatonin Suppression: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor in the human Eye. In: Biological Effects of Light 2001, Boston Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 2002
- [BÜN] Büntemeyer, R.: Licht und Gesundheit und die Konsequenzen für eine nutzerorientierte Beleuchtungsplanung, die neue Qualitätsmerkmale und Grenzen für eine Visualisierung der geplanten Beleuchtungsanlage aufzeigt. In: Highlight 11/12, 2002
- [CAK] Cakir, A.: Licht und Gesundheit - Gesundheits- und Befindlichkeitsstörungen bei der Büro- und Bildschirmarbeit. Eine Untersuchung zum Stand der Beleuchtungstechnik in deutschen Büros. Ergonomic Institut für Arbeits- und Sozialforschung Forschungsgesellschaft mbH, 1990, 1994, 1998
- [CHA] Chauvel, P; Collins, Dogniaux, Longmore. Glare from windows current view of the problem - Physical, Psychological and architectural aspects. CIE, Proceedings on DAYLIGHT, Seite 294 – 301, 1980
- [CHR] Christoffersen, J.; Petersen, E.; Johnsen, K.; Valbjørn, O.; Hygge: Windows and daylight – a field study in office buildings (in Danish with English summary). SBI Report 318. Danish Building Research Institute, 1999
- [COL] Collins, B.L.: Review of the psychological reaction to windows. In: Lighting Research & Technology, Vol 8 (2), S. 80-88, 1976
- [COO] Cooper, J.R; Wiltshire, T.; Hardy, A.C.: Attitudes toward the use of heat rejecting/low light transmission glasses in office buildings. Proceedings CIE conference, Istanbul, 1973
- [COR] Cornelius, Wolfgang: Untersuchungen zu den Auswirkungen der neuen Musterbauordnung (MBO) hinsichtlich der Versorgung von Innenräumen mit Tageslicht. Elfes Symposium Innovative Lichttechnik, Staffelstein, 2005
- [DAV] Davis, R. G.; Ginther, D. N.: Correlated color temperature, illuminance level, and the KRUIHOF-curve, In: Journal Illuminance Engineering Society 19 - 1, S. 27–38, 1990
- [DIA] DIANE: Projekt Tageslichtnutzung. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1995
- [DIE] Dietrich, U; Holst, S.: Vergleich von Tageslichtsystemen durch dynamische Simulation mit TRNSLUX. Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik, Staffelstein 2000
- [DIN EN 12464-1] DIN EN 12464-1 "Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten", Teil 1 Arbeitssätten in Innenräumen, 2004
- [DIN EN 12665] Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung, 1997

- [DIN 5034] Tageslicht in Innenräumen, Teil 1. 1999-10
- [DIN 5035-7] Beleuchtung mit künstlichem Licht, Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen, 2004
- [EHL b] Ehling, K.: Tageslichtsysteme - Gestalterischer Luxus oder wirtschaftliche Investition? Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik, Staffelstein, 2000
- [EHL a] Ehling, K.: Tageslichtsysteme - Lichttechnische Bewertung und Wirtschaftlichkeit. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1999
- [EME] Emmembolu, A.: Vergleichende Untersuchungen zum Aufbau von innovativen Fassaden im Hinblick auf eine optimierte Tageslichtnutzung in Büroräumen. Diplomarbeit, Universität Dortmund, 2004
- [FAS] Fasano, G.; Zinzi M.: User Response in an office room equipped with manually operated electrochromic windows. IEA Task 27, Performance of solar facade components, IEA, 2003
- [FIG 2002] Figueiro, M. G.; Rea, M. S.: Daylight and productivity - a possible link to circadian regulation. Light and Human Health: EPRI/LRO 5th International Lighting Research Symposium: Palo Alto, CA: The Lighting Research Office of the Electric Power Research Institute, S.185-193, 2002
- [FLE a] Fleischer, S.: Die psychologische Wirkung veränderter Kunstlichtsituationen auf den Menschen, Dissertation auf ETH Zürich, 2001
- [FLE b] Fleischer, S; Krueger, H.; Schierz, C.: Effect of brightness distribution and light colours on office staff. Results of the "Lighting Harmony Project". The 9th European Lighting Conference "Lux Europa" - Reykjavik, 2001
- [FLY] Flynn, J.E.; Spencer, T.J.; Martyniuk, O.; Hendrick, C.: Interim Study of Procedures for Investigating the Effect of Light on Impression and Behavior. Journal of the Engineering Society Vol 3 (2), S. 87-94, 1973
- [FON] Fontoynt, Marc: Occupant preferences with respect to artificial lighting, daylighting and use of glare control techniques. IAE 31 - CIE Symposium, Ottawa, Kanada, 2002
- [FRI] Fritz, H.-J.: Menschen in Büroarbeitsräumen, Heinz Moos Verlag, Gräfelfing, 1982
- [GAL a] Gall, D.; Vandahl, C.; Nevoigt, J.; Wolf, S.: Leuchtdichteanalytik in Räumen mit Tageslicht. Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Staffelstein, 2000
- [GAL b] Gall, D.; Lapuente, V.: Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums. Teil 1: Allgemeine Aspekte bei der Lampenauswahl. Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Lichttechnik, in: LICHT 54 7/8, 2002
- [GAL c] Gall, D.: Die Messung circadianer Strahlungsgrößen. Tagung Licht und Gesundheit, Berlin, 2004
- [GAL d] Gall, D.; Vandahl, C; Bieske, K.; Schmidt, A.; Hermann, R.; Blankenhagen, C.: Die Ermittlung von Licht- und Farbfeldgrößen zur Bestimmung der spektralen Wirkung des Lichtes. Tagung LICHT Dortmund, 2004
- [GAL e] Gall, Dietrich: Grundlagen der Lichttechnik - Kompendium. Richard Pflaum Verlag GmbH & Co KG München, 2004
- [GÖT] Götsche, J.; Hoffschmidt, B.; Jellinghaus, S.: Der vertikale Sonnenlichtquotient: Eine wichtige Kenngröße zur Charakterisierung von Lichtlenksystemen. Tagung Innovative Lichttechnik, Staffelstein, 2005
- [GRÜ] Grünberger, J. et al.: The effect of biologically-active light on the noopsyche and thymopsyche on psychophysiological variables in healthy volunteers. International Journal of Psychophysiology, 1993

- [GUT] Guth, A.; Roennenberg, T.; Ricken, J.; Havel, M.; Merrow, M.: Können gezielte Lichtbedingungen eine Umstellung auf Nachtschicht erleichtern? Tagung Licht, Dortmund, 2004
- [HER] Hertzsch, E.: Systematik von energiesparenden und lichtlenkenden Fassadenkomponenten im Gewerbebau. Dissertation, Universität Stuttgart, 1999
- [HEU] Heuvelink, J.J.W.: Energieverbrauch Tageslicht und gutes Innenraumklima für Mitarbeiter. Zehntes Symposium Innovative Lichttechnik, Staffelstein, 2004
- [HLA a] Hlawna, R.: Der große Mythos. In: Mensch & Büro 3, 2001
- [HLA b] Hlawna, R.: New Work - Vision oder Albtraum. Vortragsmanuskript Designers Saturday, Stuttgart, 2001
- [HMG a] Heschong Mahone Group: Skylighting and retail sales. An investigation into the relationship between daylighting and human performance. Report, Pacific Gas and Electric Company, USA, 1999
- [HMG b] Heschong Mahone Group, Inc.: Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment. Technical Report. P500-03-082-A-9 and P500-03-082-A-10, California Energy Commission, USA, 2003
- [HMG c] Heschong Mahone Group, Inc.: Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment. Technical Report. P500-03-082-A-7, California Energy Commission, USA, 2004
- [HOP] Hopkinson, R.G.: Glare from Windows - Using the Glare Index in daylighting design. In: Construction Research and Development, Journal vol. 3 no. 1
- [HUN] Hunt, D.R.G.: The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy. In: Building & Environment, 14 (1), S. 21-33, 1979
- [IEA a] Atif, M. R.; Love, J.A.; Littlefair, P.: Daylighting Monitoring Protocols & Procedures for Buildings. A report of Task 21 / Annex 29 Daylight in Buildings, 1997
- [IEA b] Daylight in Buildings - A sourcebook on Daylighting Systems and Components. IEA, 2000
- [IEA c] Velds, M.; Christoffersen, J.: Monitoring Procedures for the Assessment of Daylighting Performance of Buildings. IEA, 2001
- [IES] Rea, MS (ed.): IESNA Lighting Handbook: Reference and Application, 9th ed. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000
- [INU] Inui, M.: Views through a window. Proceedings on DAYLIGHT, Physical, Psychological and architectural aspects. CIE, S. 323 – 331, 1980
- [IWA] Iwata, T.; Tokura, M.; Shukuya, M.: Experimental study on discomfort glare caused by windows. In: Journal of Architecture Planning Engineering., AIJ, No. 439, September, 1992
- [JÖD] Jödicke, B.: Alle Menschen sind nicht gleich. Siebtes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Staffelstein, 2001
- [JUS] Juslén, H.; Fassian, M.: Beleuchtung, Produktivität und Wohlbefinden - wissenschaftliche Studien in industrieller Umgebung. Tagung Licht, Dortmund, 2004
- [KRAE] Kraemer, K.: Tendenzen im Bürohausbau - Büroarchitektur der Zukunft. In Licht im Büro, Tagungsbericht LITG Sondertagung, Wirtschaftsverlag NW, 1997

- [KRA a] Kramer, H.: Die 8 Gebote guter Lichtgestaltung - Ein Versuch, die Güteermale guten Lichtes zu definieren. Tagung Licht, 1998
- [KRA b] Kramer, H.: Was bedeutet Lichtqualität in Gebäuden unter besonderer Berücksichtigung von Verwaltungsbauten? Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik Staffelstein, 2000
- [KRÜ] Krüger, H.: Der Büroarbeitsplatz aus ergonomischer Sicht. In: Licht im Büro. Tagungsbericht. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1997
- [KÜL a] Küller, R.: The effects of indoor lighting on wellbeing and the annual rhythm of hormones. CIE. 21st session. Venedig, Vol. 1, No. 601, S. 342 – 345, 1987
- [KÜL b] Küller, R., Lindsten, C. Health and behavior of children in classrooms with and without windows. In: Journal of Environmental Psychology 12, S. 305 – 317, 1992
- [KÜL c] Küller, R., Wetterberg, L., "Melatonin, cortisol, EEG, ECG and subjective comfort in healthy humans: impact of two fluorescent lamp types at two light intensities", In: Lighting Research and Technology, 1993
- [KÜP] Küppers, Harald: Das Grundgesetz der Farbenlehre. Dumont Buchverlag, Köln, 2002
- [LAM] Lam, W.M.C.: Perception and Lighting as formgivers for Architecture. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992
- [LAN] Lange (Hrsg.): Handbuch der Beleuchtung. Ecomed Verlag, 2002
- [LIT] Littlefair, P. J.: Designing with innovative daylighting. BRE Report, Watford, 1996
- [LUD] Ludlow, A.M.: The Function of Windows in Buildings, In: Lighting Research and Technology 8, S.57-68, 1976
- [MAR] Markytán, A.; Gall, D.: Zonale Beleuchtung von Bildschirmarbeitsplätzen. Tagung Licht, Maastricht, S. 82-86, 2002
- [MARK a] Markus, T.A.: The function of windows: a reappraisal. In: Building Science, 2, S. 97-121, 1967
- [MARK b] Markus, T.A.: The significance of sunshine and view for office workers, Sunlight in buildings, Proceedings CIE conference, Roerdam, S. 59-93, 1967
- [MEU a] Meutzner, J.: Tageslicht als Grundbeleuchtung im Büro und in Betriebsstätten... verwendbar, umweltfreundlich, bezahlbar? Tagung Licht, 2000
- [MEU b] Meutzner, J.: Sind Tageslichtsysteme im Büro rentabel? Tagung Licht, Maastricht, 2002
- [MOO a] Moosmann, C.: Studie zur Leuchtdichteverteilung an Bildschirmarbeitsplätzen. Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe, 2003
- [MOO b] Moosmann, C.; Wambsganss, M.: Feldstudie zur Bewertung der Blendung durch Tageslicht am Bildschirmarbeitsplatz. Tagung Licht, Dortmund, 2004
- [MÜL a] Müller, H.F.O.: Neue Entwicklungen im Bereich der Tageslichtlenkung und Sonnenschutz. In: Licht, Architektur, Technik, Sonderheft DBZ, Bau-Verlag, 2002
- [MÜL b] Müller, H.; Schuster, H; Schwarzer, K; Jellinghaus, S.; et al.: Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben: Verbundprojekt Licht in Büroräumen – Sonnenschutz; Vergleich innovativer Fassaden; Elektrochrome Lichtlenkende Fassade, Dortmund, Jülich, 2004
- [MÜL c] Müller, H., Schuster, H., Oetzel, M., Emembolu, A., Soylu, I.: Sonnenschutz und Tageslichtbeleuchtung in Büroräumen. In: Bauphysik-Kalender 2005, Ernst u. Sohn Verlag, 2005

- [NE'E] Ne'eman, E.; Hopkinson, R.G.: Critical minimum acceptable window size, a study of window design and provision of a view. In: Research & Technology, 2, S. 17-27, 1970
- [NEV a] Nevoigt, J.; Gall, D.: Evaluation of lighting conditions and glare caused by daylight in actual working environment, EU- Joule 3 Project JOR-CT96-0010, Ilmenau, 1997
- [NEV b] Nevoigt, J.: Aspekte der Nutzerakzeptanz bei der Tageslichtbewertung im Innenraum. Tagungsband LuxJunior, S 236-244, Ilmenau, 1997
- [NEW] Newsham, G.R.; Veitch, J.A.: Lighting quality recommendations for VDT offices: a new method of derivation. In: International Journal of Lighting Research and Technology, v. 33, no. 2, S. 115-134, 2001
- [OST] Osterhaus, W.K.E.: Brightness as a simple indicator for discomfort glare from large area glare sources. 1st CIE Symposium on Lighting Quality, Ottawa, 1998
- [PAR] Partonen, T., et al.: Bright light improves vitality and alleviates distress in healthy people. In: Journal of Affective disorders, Volume 57, Issues 1-3, S.55-61, 2000
- [PET] Petherbridge, P.; Hopkinson, R.G.: Discomfort Glare and the Lighting of Buildings. Illumination Engineering Society 15 (2), 1950
- [PRO] Probst, Fa. Gertec am 4.6.2003 vor Studenten der Universität Dortmund
- [POL] Polle, D: Der Einfluss der Lichtverteilung im Raum auf die Akzeptanz des modernen Büroarbeitsplatzes. Tagung Licht, Dortmund, 2004
- [RAD] Radiance 2.3, Synthetic Imaging system, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 1996
- [REA a] Rea, M.S.: Window Blind Occlusion: a Pilot Study. In: Building & Environment, Vol. 19, No. 2, S. 133 –137, 1984
- [REA b] Rea, M.S.: Light - Much More Than Vision. Light and Human Health: EPRI/LRO 5th International Lighting Research Symposium: Palo Alto, CA, The Lighting Research Office of the Electric Power Research Institute S. 1-15, 2002
- [REI] Reitmaier, J.: Licht und Gesundheit - Umsetzung in der Praxis. Elfes Symposium Innovative Lichttechnik, Staffelstein, 2005
- [REIN] Reinhart, C.: Daylight Availability and Manual Lighting Control in Office Buildings - Simulation Studies and Analysis of Measurement. Dissertation Universität Karlsruhe, Fraunhofer IRB Verlag, 2001
- [SCHI a] Schierz, C.: Sehen im Lichte der Wahrnehmung. In: architese 6.98. S. 30-35, 1998
- [SCHI b] Schierz, C.: Licht und Wahrnehmung. 4. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs Lux Junior, Dörfeld, 1999
- [SCHI c] Schierz, C.: Wiviel Licht braucht der Mensch? Workshop Ergonomie des Büroarbeitsplatzes DGAUM, Wiesbaden, 1999
- [SCHI d] Schierz, C.: Unspezifische biologische Lichtwirkungen. am Arbeitsplatz. Herbstkonferenz 2002 der GfA e.V. Technische Universität Ilmenau, 2002
- [SCHM a] Schmits, P. W.; Dernhoff, P.: Bürobeleuchtung? Licht im Büro, Tagungsbericht, Wirtschaftsverlag NW, 1997
- [SCHM b] Schmits, Paul W.: Wie viel Licht braucht das Büro? In: Licht + Architektur 2, 1999

- [SCHMI] Schmitz, H. J.: Tageslicht im Atrium - Akzeptanz von Arbeitsplatzbedingungen an Atrien unter besonderer Berücksichtigung der Tageslichtverhältnisse. Dissertation, Universität Dortmund, Tectum Verlag, Marburg, 2003
- [SCHN] Schneider, R.; Gentz, M.: Intelligent Office. Rudolf Müller Verlag, Köln, 1997
- [SCHU a] Oetzel, M.; Schuster, H.: Testing innovative daylight and shading systems. Plea - The 18th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianapolis, Brazil, 2001
- [SCHU b] Schuster, H.; Oetzel, M.: Testfassade für Innovative Tageslicht - und Sonnenschutzsysteme – Vergleichende Feldversuche. Tagung Innovative Lichttechnik, Staffelstein, 2001
- [SCHU c] Schuster, H.; Vandahl, C.: Lichtfarbenänderungen durch Tageslichtsysteme. Tagung Licht 2004, Dortmund, 2004
- [SCHU d] Schuster, H.; Müller, H.; Thiel, D., Kuntschmann, S.; Schießler, F.; Lang, U.: Innovation in der Entwicklung von Fassadensystemen: Brückenschlag zwischen Technologie und individueller Architektur und Fassade plus TGA - planen und bauen mit integrierten Systemen. In: Intelligente Architektur 12, 2004
- [SCHU e] Schuster, H.; Müller, H.: Interdisciplinary Development of a Modular Façade System with Decentralized Building Services. Cisbat, Lausanne, 2005
- [SIC a] Sick, F.: Eine Praxis-Methode zur Bewertung der Tageslichtqualität in Innenräumen. Tagung Licht, 2000
- [SIC b] Sick, F.: Ermittlung integraler Bewertungskriterien mittels statistischer Versuchsplanung und Simulation. Vortrag, Technische Universität Berlin, 2003
- [SIC c] Sick, F.: Einfluss elementarer architektonischer Maßnahmen auf die Tageslichtqualität in Innenräumen. Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät für Architektur, Fraunhofer IRB Verlag, 2003
- [SIC d] Sick, F.: Klimagerechtes Bauen. 4. Beckmannkolloquium, Wismar, 2004
- [SOY] Soylu, I.: Optimierung des thermischen Verhaltens von Büroräumen in Abhängigkeit von der Fassadenkonstruktion mit Hilfe thermischer Simulation. Diplomarbeit, Universität Dortmund, 2004
- [SPS] SPSS 12.0G for Windows. SPSS Inc. 1989 – 2003
- [TEC] Technoteam: Beschreibung der Filterung der circadianen Empfindlichkeit. Fa. Technoteam Ilmenau, 2004
- [TEN] Tenner, A.D., Unpublished data from research reported in: Begemann, S.H.A., Beld, G.J. van den, Tenner, A.D.: Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses. In: International Journal of Industrial Ergonomics, 20 (3), 231-239, 1997
- [THA] Thapan, K.: An action Spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, noncone photoreceptor system in humans. In: Journal of Physiology 535, 1, S. 261, 2001
- [VAN] Vandahl, C.: Zur Festlegung von Güteigenschaften der Einzelplatzbeleuchtung. Dissertation, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 1999
- [VDI 6011] VDI- Richtlinien: Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung - Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2001
- [VEI a] Veitch, J.A.; Newsham, G.R.: Determinants of Lighting Quality I: State of the Science. Annual Conference of the Illumination Engineering Society of North America, Cleveland, 1996
- [VEI b] Veitch, J.A.; Newsham, G.R.: Determinants of Lighting Quality II: Research and Recommendations. 104th Annual Convention of the American Psychological Association Toronto, Ontario, Canada, 1996

- [VEL] Velds, M.: Assessment of lighting quality in office rooms with daylighting systems. Dissertation Technical University Delft, 1999
- [VIN] Vine, E.; Lee, E.; Clear, R.; DiBartolomeo, D.; Selkowitz, S.: Office worker response to an automated venetian blind and electric lighting system: a pilot study. In: Energy and Buildings 28, S. 205-218, 1998
- [VIT] Vitruvius Pollio, Marcus: Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt und erläutert von Jakob Prestel. Verlag Heitz GmbH, Baden-Baden, 1959
- [VOG] Vogel, J.: Lichtfarbenänderung durch Tageslichtsysteme. Diplomarbeit Technische Universität Ilmenau, 2003
- [VÖL] Völker, St.: Eignung von Methoden zur Ermittlung eines notwendigen Beleuchtungsniveaus. Dissertation, TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, 1998
- [WIE] Wienold, J.; Kuhn, T.: Blendungsbewertung von Tageslicht und Büroarbeitsplatz. Elfte Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Staffelstein, 2005
- [WIT a] Witting, W.: Beleuchtung und psycho-visuelle Leistung bei Bildschirmarbeit - Eine Methode zum objektiven und quantitativen Vergleich verschiedener Beleuchtungssysteme. Tagung Licht, 1998
- [WIT b] Witting, W.: Neue Ergebnisse zur objektiven und quantitativen Erfassung und Bewertung der psychophysischen und visuellen Belastung bei Bildschirmarbeit im Vergleich verschiedener Tages- und Kunstlichtsysteme. Tagung Licht, 2000
- [WIT c] Witting, W.: Tageslicht oder Kunstlicht, 8. Symposium "Innovative Lichttechnik in Gebäuden", S. 104 – 109, 2002
- [WOL] Wolfgramm, F.: Untersuchungen zum UGR- Blendbewertungssystem. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1994

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1-1: Elektromagnetische Strahlung auf der Erdoberfläche mit dem sichtbaren Anteil [LAN]	13
Abbildung 1.1-2: Gesamtenergiedurchlassgrad	15
Abbildung 1.2-1: Reflexionseigenschaften nach [LAN]	16
Abbildung 1.2-2: Himmelszustände: Bedeckter Himmel, klarer Himmel, teilweise bewölkter Himmel	16
Abbildung 1.2-3: Sonnenlauf für Dortmund und den Äquator	17
Abbildung 1.2-4: Horizontale Beleuchtungsstärke für das Testreferenzjahr Essen und für Kampese in Afrika (Äquator) [TRY]	17
Abbildung 1.3-1: Links: Das menschliche Auge; rechts: Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ sowie circadianer Empfindlichkeitsgrad $c(\lambda)$	18
Abbildung 1.3-2: Kruithofsche Behaglichkeitskurve [LAN]	20
Abbildung 1.3-3: Spektrale Verteilung von Tageslicht und einer konventionellen Leuchte (Glühlampe) [GAL b]	21
Abbildung 1.4-1: Links: Direkte und indirekte Beleuchtung (Universität Porto, Portugal); rechts: Das Fenster als Bild (Garten der Meister der Netze in Suzhou, China) und Übergang zwischen innen und außen (Bauhaus Dessau) und	23
Abbildung 1.4-2: Links: Mystische Lichtwirkung (Don Bosco Kirche in Brasilia, Brasilien); rechts: Nutzbeleuchtung (Büroraum im Gebäude von Deloitte & Touche, Düsseldorf)	24
Abbildung 1.4-3: Innerstädtisches Gebiet in der chinesischen Stadt Shenzhen, 2001	24
Abbildung 1.4-4: Effekt unterschiedlicher Fensterformate auf die Innenraumbeleuchtung [EME]	25
Abbildung 1.4-5: Funktionen einer Fassade: Sonnen- und Blendschutz, Lichtlenkung	25
Abbildung 1.4-6: Links: Linearer Planungsprozess; rechts: Integraler Planungsprozess	28
Abbildung 1.5-1: Gemittelte Urteile von Beobachtern zur bevorzugten Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz [LAN]	32
Abbildung 2.1-1: Einflussgrößen auf die Akzeptanz des Nutzers in Anlehnung an [SCHM a]	36
Abbildung 2.2-1: Prozentsätze der regelmäßig mäßig bis stark störenden Ursachen nach [CAK]	37
Abbildung 4.1-1: Links: Teststandort Dortmund (51°3' N/ 7°25' E); rechts: Außenansicht der Fassade im Jahr 2002	55
Abbildung 4.1-2: Links: Innenansicht der Testanlage; rechts: Schematischer Grundriss der Messräume mit Möblierung	55
Abbildung 4.1-3: Die Fassadensysteme des Projektes im Überblick	56
Abbildung 4.1-4: Außenaufnahme und Funktionsprinzip der konzentrierenden Hologramme mit Fotovoltaik (System 1)	56
Abbildung 4.1-5: Innenaufnahme, Wirkungsprinzip des Gesamtelementes und des Lichtlenkglases (System 2)	57
Abbildung 4.1-6: Außenansicht und Funktionsprinzip des Systems 3	57
Abbildung 4.1-7: Außenansicht und Funktionsprinzip der Gesamtfassade sowie der Weißlichthologramme	58
Abbildung 4.1-8: Ansicht und Funktionsprinzip des elektrochromen Glases (System 5)	58
Abbildung 4.1-9: Außenansicht und Vertikalschnitt des Systems 6	59
Abbildung 4.2-1: Messaufbau während der Befragungen, links: Beleuchtungsstärkesensoren; rechts: Leuchtdichtepositionen	59
Abbildung 4.2-2: Aufnahmepositionen der Leuchtdichtekameras: Position 1: Blickachse zum Fenster, Position 2: Blickrichtung des Nutzers, Position 3: Aufnahme von der rückwärtigen Wand	60
Abbildung 4.3-1: Links: Dokumentation der Systemeinstellungen und des Arbeitsplatzes vor den Befragungen; rechts: Dokumentation der Systeme während der Befragungen durch Digitalkameras	63
Abbildung 4.3-2: Ablaufschema der Nutzerbefragungen	64
Abbildung 4.4-1: Screenshot des Fragebogens	65
Abbildung 5.1-1: Verteilung des Alters der Probanden über der Anzahl der Befragungen	68
Abbildung 5.1-2: Verteilung der Befragungen über das Jahr bei geschlossenem Sonnenschutz	69
Abbildung 5.2-1: Beleuchtungsstärken in der Raumtiefe im Vergleich dreier Systeme bei geschlossenem Sonnenschutz (Außenbeleuchtungsstärke 66 klx)[MÜL b]	70
Abbildung 5.2-2: Auswertungen der Deckenmesspunkte bei geschlossenen Systemen im Raumvergleich	70
Abbildung 5.2-3: Auswertungen der Messpunkte horizontal in der Arbeitsebene (links), vertikal in Augenhöhe (Mitte) und vertikal an der rückwärtigen Wand (rechts) bei geschlossenen Systemen im Raumvergleich	71

Abbildung 5.2-4: Sonnenlichtquotienten in der Arbeitsebene (links), am fensternahen Deckenmesspunkt (Mitte) und am vertikalen Messpunkt in Augenhöhe (rechts) bezogen auf die globale Außenbeleuchtungsstärke.....	71
Abbildung 5.2-5: Mittlere Leuchtdichten zu Beginn der Befragungen aus den drei Messpositionen	72
Abbildung 5.2-6: Maximale Leuchtdichten zu Beginn der Befragungen aus den drei Messpositionen heraus	73
Abbildung 5.2-7: Maximale Leuchtdichten zu Beginn der Befragungen für Fensterbereiche und Arbeitsfläche	73
Abbildung 5.2-8: Kontraste zum nahen und fernen Umfeld und Uniformität in der Arbeitsebene.....	74
Abbildung 5.2-9: Spektrale Verteilung bei klarem (13.7.2003, 11:33 Uhr) und bedecktem Himmel (12.7.2003, 15:27 Uhr).....	74
Abbildung 5.2-10: Abweichung der spektralen Anteile vom klaren Himmel (13.7.2003).....	75
Abbildung 5.2-11: Farbtemperaturverlauf in der Raumtiefe bei unterschiedlichen Himmelszuständen ohne Sonnenschutzsystem (12. – 13.7.2003)	75
Abbildung 5.2-12: Vergleich der Farbtemperaturen Außenraum und Innenraum über einen klaren Sommertag [VOG]	76
Abbildung 5.2-13: Vergleich der Farbtemperaturen in der Arbeitsebene mit und ohne Blendschutz [VOG].....	76
Abbildung 5.2-14: Raumvergleich ähnlichste Farbtemperaturen bei geschlossenem Sonnenschutz [VOG].....	77
Abbildung 5.2-15: Farbwiedergabeindex Ra bei geschlossenem Sonnenschutz [VOG].....	77
Abbildung 5.2-16: Temperaturverteilung im Innenraum (alle Befragungsrunden).....	78
Abbildung 5.3-1: Links: Momentanes Wohlbefinden; rechts: Beurteilungen des Arbeitsplatzes.....	79
Abbildung 5.3-2: Beurteilung des Gesamtraumes nach den subjektiven Kriterien „offen“, „geschlossen“ und „eingeschlossen“	79
Abbildung 5.3-3: Links: Urteil des Gesamtraumes nach Systemfunktion; rechts: Urteil des Gesamtraumes nach Raum.....	80
Abbildung 5.3-4: Zusammenfassung der negativen Antworten in der Kategorie Temperatur	81
Abbildung 5.3-5: Zusammenfassung der negativen Antworten nach Räumen getrennt.....	81
Abbildung 5.3-6: Beurteilung des Ausblicks der Gesamtbefragungen mit geschlossenem System.....	83
Abbildung 5.3-7: Links: Die Beurteilung des Ausblicks ins Freie dem eingeschränkten Tageslicht gegenübergestellt; rechts: Zusammenfassung der Aussagen zur Wahrnehmung von Schwankungen des Wetters und deren Bewertung.....	83
Abbildung 5.3-8: Zusammenfassung der Bewertung des Ausblicks getrennt nach Systemfunktionen	84
Abbildung 5.3-9: Die positiven und negativen Eigenschaften der Systeme gegenübergestellt	84
Abbildung 5.3-10: Links: Positive Aussagen der Kategorie Blendung in der Zusammenfassung; rechts: Negative Aussagen der Kategorie Blendung in der Zusammenfassung	85
Abbildung 5.3-11: Ursachen für Blendung insgesamt und prozentual von „Andere“ (zusätzliche Angaben der Probanden).....	86
Abbildung 5.3-12: Positive/ negative Eigenschaften im Vergleich zur momentanen Blendung (Auswertung raumbezogen).....	86
Abbildung 5.3-13: Ursachen der Blendung nach Räumen aufgeschlüsselt.....	87
Abbildung 5.3-14: Links: Störungen durch Spiegelungen, Muster/ Streifen; rechts: Beurteilung der Raumbooberflächen, (Auswertung raumbezogen).....	87
Abbildung 5.3-15: Links: Beurteilung der Funktion; rechts: Beurteilung der Ästhetik und der Funktion als Statussymbol.....	88
Abbildung 5.3-16: Beurteilung der Flexibilität und Eingriffsmöglichkeiten aller Systeme.....	89
Abbildung 5.3-17: Links: Beurteilung der Funktion insgesamt; rechts: Beurteilung der Schutzfunktion	89
Abbildung 5.3-18: Zusammenfassung der freien Positiv- und Negativurteile der Probanden über die Systeme	90
Abbildung 5.3-19: Persönliche Einstellungen des Sonnenschutzes (links) und des Blendschutzes (rechts)	90
Abbildung 5.3-20: Beurteilung der Schutzfunktionen der Systeme nach Räumen getrennt	91
Abbildung 5.3-21: Beurteilung der Ästhetik sowie der Funktion als Statussymbol mit Eintragung der jeweils besten Bewertung (bezogen auf Urteile in den Räumen).....	91
Abbildung 5.3-22: Beurteilung der Eingriffsmöglichkeiten und Flexibilität der Systeme nach Räumen getrennt.....	92
Abbildung 5.3-23: Persönliche Einstellungen des Sonnenschutzes nach Räumen getrennt.....	92
Abbildung 5.3-24: Links: Persönliche Einstellungen des Blendschutzes nach Räumen mit Jalousiesystemen (i.d.R. ohne Blendschutz getestet); rechts: In Räumen mit reinen Sonnenschutzsystemen (grundsätzlich mit Blendschutz getestet).....	93
Abbildung 5.3-25: Gegenüberstellung der Nutzung des Sonnen- und Blendschutzes zur Veränderung des Lichtklimas	93
Abbildung 5.3-26: Zusammenfassung aller Bewertungen „hell“ innerhalb der Kategorie	94
Abbildung 5.3-27: Links: Zusammenfassung aller Bewertungen „dunkel“ innerhalb der Kategorie.....	95

Abbildung 5.3-28: Zusammenfassung der positiven Urteile nach Räumen getrennt.....	95
Abbildung 5.3-29: Zusammenfassung der negativen Urteile nach Räumen getrennt	96
Abbildung 5.3-30: Negative Urteile für die Fragen nach der Verminderung des Tageslichtes durch das System je Raum.....	96
Abbildung 5.3-31: Zusammenfassung der Kategorie Lichtlenkung; links: Wahrnehmung der Lichtlenkung; rechts: Beurteilung der vorhandenen Lichtlenkung.....	97
Abbildung 5.3-32: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Beurteilung der Lichtlenkung	98
Abbildung 5.3-33: Zusammenfassung aller positiven Antworten zum Thema Lichtwirkung.....	99
Abbildung 5.3-34: Links: Zusammenfassung aller negativen Antworten; rechts: Zusammenfassung der neutralen Bewertungen zum Thema Lichtwirkung.....	99
Abbildung 5.3-35: Zusammenfassung der Ergebnisse zum Thema Farbänderungen	100
Abbildung 5.3-36: Zusammenfassung der positiven Urteile nach Raum getrennt.....	100
Abbildung 5.3-37: Zusammenfassung der negativen Urteile nach Räumen getrennt	101
Abbildung 5.3-38: Zusammenfassung der Urteile „kalt – warm“ nach Räumen getrennt.....	101
Abbildung 5.3-39: Farbänderungen und deren Bewertung nach Räumen getrennt.....	102
Abbildung 5.3-40: Urteile der Kategorie Privatheit in der Zusammenfassung.....	103
Abbildung 5.3-41: Zusammenfassung der Beurteilungen in der Kategorie Privatheit nach Räumen getrennt.....	103
Abbildung 5.3-42: Gesamtbeurteilungen der Systeme durch die Probanden.....	104
Abbildung 5.4-1: Zu analysierende interkategoriale Beziehungen.....	105
Abbildung 5.4-2: Gesamtbeurteilungen „offen“ gegen die Kategorie Aussicht gestellt.....	105
Abbildung 5.4-3: Beurteilung: „offen“ gegen die Verminderung des Ausblicks pro Raum.....	106
Abbildung 5.4-4: Gesamturteil: Offen gegenübergestellt dem Gesamturteil: Hell (nur Lichtlenksysteme).....	106
Abbildung 5.4-5: Negative Beurteilung der Verminderung des Ausblicks gegenüber den Urteilen „hell“ (nur Lichtlenksysteme)....	107
Abbildung 5.4-6: Links: Beurteilungen der Aussicht gegenüber den Beurteilungen der feststellbaren Lichtlenkung; rechts: Ausblick gegenüber der Bewertung der Lichtlenkung (je nur Lichtlenksysteme)	107
Abbildung 5.4-7: Der Wunsch nach weiterem Schutz den möglichen störenden Spiegelungen gegenübergestellt	108
Abbildung 5.4-8: Gegenüberstellung der Anteile persönlicher Einstellungen der Systeme und der Beurteilung des Ausblicks	109
Abbildung 5.4-9: Links: Persönliche Einstellungen und ausreichendes Tageslicht; rechts: persönliche Einstellungen und Raumwirkung dunkel - hell	109
Abbildung 5.4-10: Eine auftretende Lichtlenkung über dem subjektiven Raumeindruck (nur Lichtlenksysteme).....	110
Abbildung 5.4-11: Links: Bewertung der Lichtlenkfunktion im Bezug zur Lichtwirkung kalt – warm (nur Lichtlenksysteme); rechts: Bewertung der Lichtlenkung im Bezug zur Beurteilung natürlich (nur Lichtlenksysteme)	110
Abbildung 6.2-1: Links: Vergleich der Ergebnisse „Nähe des Fensters“ mit Mittelwerten der Faktoren L2; rechts: getrennt nach Funktion der Systeme bezogen auf Faktor L2 aus Messposition 2.....	113
Abbildung 6.2-2: Links: Vergleich der Ergebnisse „offen“ mit Faktor L3; rechts: Raumanalyse Faktor L3 aus Messposition 2.....	113
Abbildung 6.2-3: Beurteilung „eingeschlossen“, aufgeschlüsselt nach Raum im Bezug zur Innenraumtemperatur.....	114
Abbildung 6.2-4: Links: Die Fragen der Kategorie Temperatur in Abhängigkeit der gemessenen Innenraumtemperaturen; rechts: Die Frage nach der Beurteilung der Innenraumtemperatur nach Räumen getrennt	115
Abbildung 6.2-5: Die Bewertung der Innenraumtemperatur über dem Faktor M1; rechts: Die Beurteilung der Innenraumtemperatur über den Beleuchtungsstärken an MP A1 und nach Raumtemperaturgruppen zusammengefasst	115
Abbildung 6.2-6: Eine mögliche Behinderung durch Hitze aufgetragen über den Messwerten des Faktors M2.....	116
Abbildung 6.2-7: Die Behinderung durch Hitze aufgetragen über: Links: M2 Global; Mitte: M2 Fassadenmesswert; rechts: M2 Sonnenlichtquotient am Messpunkt A1	116
Abbildung 6.2-8: Die Bewertung der Innenraumtemperatur aufgetragen über dem Farbfaktor F2 nach Räumen getrennt	117
Abbildung 6.2-9: Links: Beurteilung der Innenraumtemperatur über den Farbtemperaturen in der Arbeitsebene und nach Raumtemperaturgruppen zusammengefasst; rechts: Nach Räumen getrennt	117
Abbildung 6.2-10: Links: Die Verminderung des Ausblicks im Zusammenhang mit dem signifikanten Faktor L3; rechts: gesondert für Raum 2 dargestellt.....	118

Abbildung 6.2-11: Links: Die Bewertung des verminderten Ausblicks im Zusammenhang mit dem signifikanten Faktor M1; rechts: Nach Räumen getrennt bezogen auf den fensternahen Messpunkt A 1 in der Arbeitsebene	119
Abbildung 6.2-12: Links: Die Bewertung des verminderten Ausblicks im Zusammenhang mit MP A1 und SQ A1; rechts: Vertikaler Messpunkt am Auge und dazugehöriger Sonnenlichtquotienten.....	119
Abbildung 6.2-13: Links: Die Einschränkung des Tageslichtes im Bezug zu Faktor L4; rechts: Raumabhängigkeit der Störung durch die Einschränkung des Tageslichtes (Faktor L2).....	120
Abbildung 6.2-14: Raumabhängigkeit bei der Bewertung des ausreichenden Ausblicks im Bezug zu Faktor M3.....	120
Abbildung 6.2-15: Links: Störende Muster oder Streifen über der Innenraumtemperatur; rechts: Direkte Blendung zum Zeitpunkt der Befragungen über der Innenraumtemperatur	122
Abbildung 6.2-16: Links: Die Bewertung heller Flächen im Bezug zu Faktor M1; rechts: Raumanalyse im Bezug zu M1 (MP A1)	122
Abbildung 6.2-17: Links: Störende Muster und Streifen im Bezug zur Beleuchtungsstärke auf der Fassade; rechts: im Bezug zur globalen Beleuchtungsstärke (nicht signifikant).....	123
Abbildung 6.2-18: Die Fragen der Kategorie Blendung im Bezug zu Faktor M3.....	123
Abbildung 6.2-19: Links: Vertikaler Messpunkt am Auge im Bezug zu momentaner Blendung; rechts: Auftretenden Mustern/ Streifen und deren Grad an Störung.....	124
Abbildung 6.2-20: Momentan empfundene Blendung in der Überschreitung der Messwerten vertikal am Auge	124
Abbildung 6.2-21: Links: Kategorie Blendung über Faktor L3; rechts: Momentane Blendung über allen drei Messpositionen	125
Abbildung 6.2-22: Raumcharakteristik zum Thema Blendung über dem Faktor L3, Messposition 2	125
Abbildung 6.2-23: Links: Verteilung der Blendung auf Leuchtdichtewerte; rechts: Leuchtdichteüberschreitung und summarische Zusammenfassung der geblendeten Personen in Prozent.....	126
Abbildung 6.2-24: Links: „Weiterer Schutz“ über Faktor M3; rechts: Raumanalyse bezogen auf vertikalen Messpunkt am Auge .	127
Abbildung 6.2-25: Links: Kategorie Funktion im Bezug zu Faktor L3; rechts: Raumanalyse der Schutzfunktion im Bezug zu L3 ..	128
Abbildung 6.2-26: Zusammenfassung der signifikanten Fragen bezogen auf Faktor tempi	129
Abbildung 6.2-27: Links: Raumwirkung und signifikanter Faktor M1, rechts: Raumwirkung bezogen auf den fensternahen Messpunkt in der Arbeitsebene nach Räumen getrennt	129
Abbildung 6.2-28: Links: Ausreichendes Tageslicht am Arbeitsplatz über Faktor M1; rechts: Nach Räumen getrennt.....	130
Abbildung 6.2-29: Die globale Außenbeleuchtungsstärke stellvertretend für den Faktor M2	130
Abbildung 6.2-30: Links: Verminderung des Tageslichtes im Bezug zur globalen Außenbeleuchtungsstärke nach Räumen getrennt; rechts: Die Raumwirkung im Vergleich zur globalen Außenbeleuchtungsstärke (Faktor M2)	131
Abbildung 6.2-31: Links: Fragen der Kategorie mit dem signifikanten Faktor M3; rechts: Die Raumwirkung im Bezug zum vertikalen Messpunkt in Augenhöhe nach Räumen getrennt	131
Abbildung 6.2-32: Relevante Fragen für Faktor L2 am Beispiel des Mittelwertes aus Messposition 2.....	132
Abbildung 6.2-33: Links: Die für Faktor L3 Fragen zur Kategorie Helligkeit; rechts: Verminderung des Tageslichtes über der maximalen Leuchtdichte nach Räumen getrennt	132
Abbildung 6.2-34: Die Fragen der Kategorie dargestellt im Bezug zu Faktor L4, beispielhaft für die mittleren Leuchtdichten	133
Abbildung 6.2-35: Bewertung einer vorhandenen Lichtlenkung bezogen auf Faktor M1 (MP A1 und D1)	133
Abbildung 6.2-36: Links: Wahrnehmung der Lichtlenkung, mittlere Leuchtdichten; rechts: maximale Leuchtdichten (nur Lichtlenksysteme).....	134
Abbildung 6.2-37: Links: Beurteilung der Lichtlenkfunktion nach Räumen getrennt für Faktor L2; rechts: für Faktor L3.....	134
Abbildung 6.2-38:Wahrnehmung und Bewertung von Farbänderungen bezogen auf den Faktor M2	135
Abbildung 6.2-39: Lichtwirkung im Bezug zu Faktor L2, aus Position 2	136
Abbildung 6.2-40: Links: Mittlere Leuchtdichten aus Position 2 im Bezug zur natürlichen Lichtwirkung; rechts: Im Bezug zu möglichen Störung durch Farbänderungen	136
Abbildung 6.2-41: Lichtwirkung bezogen auf Faktor L3	136
Abbildung 6.2-42: Zusammenfassung des Faktors F1 im Bezug zum Gesamturteil verfremdet.....	137
Abbildung 6.2-43: Links: Zusammenfassung der Farbtemperaturen im Bezug zum Gesamturteil verfremdet; rechts: Raumanalyse bezogen auf die Farbtemperatur in der Arbeitsebene	137

Abbildung 6.2-44: Faktor F2 im Bezug zur Bewertung der wahrgenommenen Farbänderung durch die geschlossenen Systeme	138
Abbildung 6.3-1: Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene über dem Wunsch nach zusätzlichem Kunstlicht	142
Abbildung 7.2-1: Bewertung aus den Befragungen: Links: Sonnenschutzsysteme; rechts: Lichtlenksysteme	147
Abbildung 7.2-2: Vergleich der Befragungen dieser Studie mit den entsprechenden Ergebnissen der DIANE Skala [DIA]	147
Abbildung 7.2-3: Vergleich unterschiedlicher Gewichtungen innerhalb der Punktebewertung aus den Befragungen	148
Abbildung 7.2-4: Bewertung aus den Messungen: Links: Sonnenschutzsysteme; rechts: Lichtlenksysteme	149
Abbildung 7.2-5: Vergleich unterschiedlicher Gewichtungen innerhalb der Punktebewertung aus den Messungen	149
Abbildung 7.2-6: Vergleich der Ergebnisse aus der Punktematrix bezogen auf die Ergebnisse der Befragungen und Messungen	150
Abbildung 8.1-1: Gegenüberstellung der horizontalen und vertikalen Beleuchtungsstärken nach Räumen getrennt (Mittelwerte)	152
Abbildung 8.1-2: Vergleich der mittleren und maximalen Leuchtdichten in den Messräumen (Mittelwerte)	153
Abbildung 8.2-1: Vergleichende Darstellung der Bewertung der Aussicht und der Tageslichtverfügbarkeit (Mittelwerte)	157
Abbildung 8.2-2: Vergleich der quantitativen (ausreichend – nicht ausreichendes Tageslicht) und qualitativen (hell - dunkel) Bewertung der Raumhelligkeit bei geschlossenen Systemen	162
Abbildung 8.3-1: Ergebnisse der Fragen zur Raumhelligkeit am Beispiel der Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene	163
Abbildung 12.4-1: Anordnung der Beleuchtungsstärkemesspunkte im Grundriss	163
Abbildung 12.4-2: Anordnung der Beleuchtungsstärkemesspunkte im Schnitt	163
Abbildung 12.4-3: Anordnung der Leuchtdichtepositionen im Grundriss	163
Abbildung 12.4-4: Anordnung der Leuchtdichtepositionen im Schnitt	163

12.3 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1.1-1: Typische Leuchtdichten nach VDI 6011	14
Tabelle 1.1-2: Typische Beleuchtungsstärken nach VDI 6011	14
Tabelle 1.1-3: Typische Farbtemperaturen nach [LAN]	15
Tabelle 1.4-1: Zielkonflikte von Sonnenschutz und Tageslichtnutzung in Innenräumen	26
Tabelle 1.5-1: Tageslichtsignatur des Projektes Tageslichtnutzung DIANE	35
Tabelle 4.2-1: Voreinstellungen bei klarem Himmel und der Sonne auf der Fassade	60
Tabelle 4.2-2: Zusammenstellung der Messtage für spektrale Messungen	61
Tabelle 4.4-1: Übersicht über die Kategorien zur Auswertung der Daten	64
Tabelle 5.2-1: Zusammenfassung der Außenbeleuchtungsstärken bei geschlossenen Systemzuständen	69
Tabelle 5.2-2: Zusammenfassung der Innenbeleuchtungsstärken ohne Raumbezug (Messpositionen siehe Kapitel 4.2.1)	70
Tabelle 5.3-1: Fragen der Kategorie Arbeitsplatz	78
Tabelle 5.3-2: Fragen der Kategorie Innenraumtemperatur	81
Tabelle 5.3-3: Fragen der Kategorie Ausblick	82
Tabelle 5.3-4: Fragen der Kategorie Blendung	85
Tabelle 5.3-5: Fragen der Kategorie Funktion	88
Tabelle 5.3-6: Fragen der Kategorie Helligkeit	94
Tabelle 5.3-7: Fragen der Kategorie Lichtlenkung	97
Tabelle 5.3-8: Fragen der Kategorie Farb- und Raumwirkung	98
Tabelle 5.3-9: Fragen der Kategorie Privatheit	103
Tabelle 6.2-1: Zusammenstellung der Faktoren, resultierend aus der statistischen Analyse der Messwerte	111
Tabelle 6.2-2: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Arbeitsplatz	112
Tabelle 6.2-3: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Innenraumtemperatur	114
Tabelle 6.2-4: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für die Kategorie „Aussicht“	118
Tabelle 6.2-5: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie „Blendung“	121
Tabelle 6.2-6: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Bedienbarkeit und Funktion	126
Tabelle 6.2-7: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Helligkeit	128
Tabelle 6.2-8: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Lichtlenkung	133

Tabelle 6.2-9: Zusammenstellung der Abhängigkeiten für Kategorie Farb- und Raumwirkung.....	135
Tabelle 6.3-1: Schwellwertdefinition für Kategorie Ausblick	139
Tabelle 6.3-2: Schwellwerte Kategorie Blendung	140
Tabelle 6.3-3: Schwellwerte Kategorie Funktion	140
Tabelle 6.3-4: Zusammenfassung der Schwellwerte für die Kategorie Helligkeit.....	141
Tabelle 6.3-5: Zusammenfassung der Voraussagewahrscheinlichkeit für festgesetzte Schwellwerte	142
Tabelle 6.3-6: Schwellwerte der Kategorie Wirkung.....	143
Tabelle 7.2-1: Beispielhafte Umrechnung der Befragungsergebnisse.....	145
Tabelle 7.2-2: Beispielhafte Umrechnung der Messergebnisse.....	146
Tabelle 7.2-3: Zusammenstellung der Punktebewertung aus den Befragungen tabellarisch	146
Tabelle 7.2-4: Zusammenstellung der Punktebewertung aus den Messungen bezogen auf die Kategorien tabellarisch	148
Tabelle 7.3-1: Vorschlag der Autorin zur Erweiterung vorhandener Tageslichtsignaturen	151
Tabelle 9.3-1: Tabellarische Zusammenfassung der Thesen	163
Tabelle 12.4-1: Zusammenstellung der technischen Daten für konzentrierende Hologramme	163
Tabelle 12.4-2: Zusammenstellung der technischen Daten für Lichtlenkglas.....	163
Tabelle 12.4-3: Zusammenstellung der technischen Daten für Lichtlenkjalousie.....	163
Tabelle 12.4-4: Zusammenstellung der technischen Daten für Weißlichthologramme	163
Tabelle 12.4-5: Zusammenstellung der technischen Daten für elektrochromes Glas	163
Tabelle 12.4-6: Zusammenstellung der technischen Daten für tageslichtoptimierte Jalousie.....	163
Tabelle 12.4-7: Technische Daten der Messgeräte.....	163
Tabelle 12.4-8: Technische Daten der Sensoren	163
Tabelle 12.4-9: Technische Daten der Leuchtlichtekameras.....	163
Tabelle 12.5-1: Zusammenstellung der Auswahl an Fragen und Messgrößen für das Bewertungsverfahren.....	163
Tabelle 12.5-2: Tabellarischer Überblick über systemunabhängige Kriterien.....	163
Tabelle 12.5-3: Tabellarischer Überblick über systemabhängige Kriterien.....	163
Tabelle 12.5-4: Tabellarischer Überblick über ermittelte Schwellwerte	163

12.4 Projektdokumentation

12.4.1 Technische Daten der Systeme

Kapitelverweis aus Kapitel 4.1.2

Im Folgenden werden Abmessungen und technische Daten der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Systeme ausführlich dargestellt. Es wird auf die Darstellungen im oben genannten Kapitel verwiesen.

Tabelle 12.4-1: Zusammenstellung der technischen Daten für konzentrierende Hologramme

Technische Daten konzentrierende Hologramme (Raum 1)	
Haltekonstruktion	Ausführung in Rechteckhohlprofilen und HEB 140 in St 37, feuerverzinkt Achsabstand Haltekonstruktion 1,75m Gesamtsonnenschutzfläche: 6,75qm
Glaslamellen	6 Stck., Abwicklung*b*h = 637mm * 14-15mm * 1,875m Außenradius 609mm, Innenradius 593mm, Biegewinkel 60° Gebogenes Verbundsicherheitsglas VSG 2*6mm (Floatglas) mit eingebetteten Hologrammfilmen
Hologramme	6 x 2 Hologrammfilme, l*h = 190mm x 1,875m Beugungswirkungsgrad 80% Optimaler Einstrahlungswinkel 60° Umlenkung des direkten Sonnenlichtes um 45° auf die Fotovoltaikmodule Verschattungswirkung des Sonnenschutzes FC = 0,2 (80% verminderte Sonneneinstrahlung)
PV-Module	6 Solarmodule l*b*h = 25*14mm*1,875m mit 32 polykristallinen Zellen 100*100mm 1 Solarmodul l*b*h = 25*14mm*1,875m mit 32 Powerzellen, Semitransparent Gesamt Netto-PV Fläche: 1,92qm
PV-Zelle	Solarmodule mit grautransparenter Rückseite, PV-Scheibe 2*6mm TVG Weissglas Errechnete Leistung (konv.): P _{peak} =1,0kW, P _{peak} =1,5kW (mit Konz) Errechnete Jahresernte W=1000kWh (konv.), W=1250kWh (mit Konz.) Errechneter Konzentrationsfaktor F _{konz} 1,5 Powerzelle: 9% Transmittanz, 9,5% Wirkungsgrad
Nachführung	Bewegungsbereich der Lamellen +/-90° Positioniergenauigkeit/ Toleranzfenster +/-2° zum Azimuthwinkel der Sonne Automatische Berechnung des Soll-Lamellenstandes Automatische Einstellung von Sommer- und Winterzeit

Tabelle 12.4-2: Zusammenstellung der technischen Daten für Lichtlenkglas

Technische Daten Lichtlenkglas und Jalousie im SZR (Raum 2)	
Gesamtabmessung b*h = 1,47 m x 1,265 m, Gesamtdicke: 32mm, SZR: 24mm	
Lichtlenkglas	h = 0,4 m (o.Rahmen) mit Gussglas eingeklebt U-Wert: 1,2 W/qmK g-Wert: 0,3 Lichttransmission: 55% Einstrahlungswinkel: 15 – 65°
Jalousie	h = 0,875 m
Lamelle	b = 15mm, 0,19mm stark, hochglanzgewalzt bzw Alu poliert, Reflexion: 87% g-Wert: geschlossen: 0,12 Abminderungsfaktor F _c : geschlossen: 0,16
Steuerung	Stufenlose Verstellung der Neigungswinkel möglich, 12V Gleichstrom

Tabelle 12.4-3: Zusammenstellung der technischen Daten für Lichtlenkjalousie

Technische Daten Lichtlenkjalousie (Raum 3)	
Gesamtabmessung	Lamellenraffstore mit flexibler Lamelle HORISO 100, Krülland b*h = 3,50 x 1,67m
Lamellen	Lamellenbreite: 100mm, 0,4-0,5mmmm stark Aluminium doppelbrennlackiert, Farbe: natur bzw RAL Konvexe Anordnung Abminderungsfaktor $F_c = 0,18$ Energiedurchlassfaktor $b = 0,08-0,12$ (bei Klarglas Isolierverglasung 6/12/6 und Horiso 100), d.h. Wärmebelastung innen 7-10% der Gesamtenergie
Steuerung	Motorantrieb, 220V-Kopfleisten-Motor, 520Hz, Steuerung nach Außenbeleuchtungsstärke programmierbar, Stufenlose Verstellung der Neigungswinkel

Tabelle 12.4-4: Zusammenstellung der technischen Daten für Weißlichthologramme

Technische Daten Lichtlenkjalousie und Weißlichthologramme (Raum 4)	
Gesamtabmessung	Weißlichthologramme eingebettet in VSG b*h = 1,245m*0,525m, Gesamtstärke: 35mm Einfallswinkelbereich von 20-60° Teilung in 6 horizontale Streifen Lenkung des Lichtes in den Innenraum unter 10° Jalousie (s. System 3 In Kombination mit Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung und Jalousie

Tabelle 12.4-5: Zusammenstellung der technischen Daten für elektrochromes Glas

Technische Daten elektrochromes Glas (Raum 5)	
Gesamtabmessung	Scheibenabmessungen b*h = 1,75 x 1,20m, Gesamtdicke = 29mm Elektrochromer Verbund: 2x4mm Floatglas, 1mm ionenleitfähiges Polymer, 16mm SZR, 4mm Innenscheibe mit Wärmeschutzbeschichtung Variabler Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert: 36 – 12% Variable Lichttransmission TL-Wert: 50 – 15% Lichtreflexion außen RL 11-9%
Steuerung	Stufenweise Regelung von Hell bis Dunkel in 5 Schritten, Schaltzeit ca. 12min Energetischer Eigenbedarf (Hersteller): 18 Watt (max. Scheibengröße), 2 Watt (Ruhezustand)

Tabelle 12.4-6: Zusammenstellung der technischen Daten für tageslichtoptimierte Jalousie

Technische Daten tageslichtoptimierte Jalousie (Raum 6)	
Gesamtabmessung	Hüppe Umlenkjalousie ARS 80, FL, Duo Lamellenbreite: 80mm, 0,5mm stark Lamellenabstand: 46mm, konkave Anordnung Material: stranggepresstes Aluminium, RAL 7030 (steingrau) lackiert Abminderungsfaktor $F_c = 0,18$
Steuerung	Elektromotorischer Antrieb Automatische Nachführung der Lamellen getrennt möglich

12.4.2 Messprogramm und -aufbau

Kapitelverweis aus Kapitel 4.2.1: Positionen der Beleuchtungsstärkesensoren und Leuchtdichtemesskameras

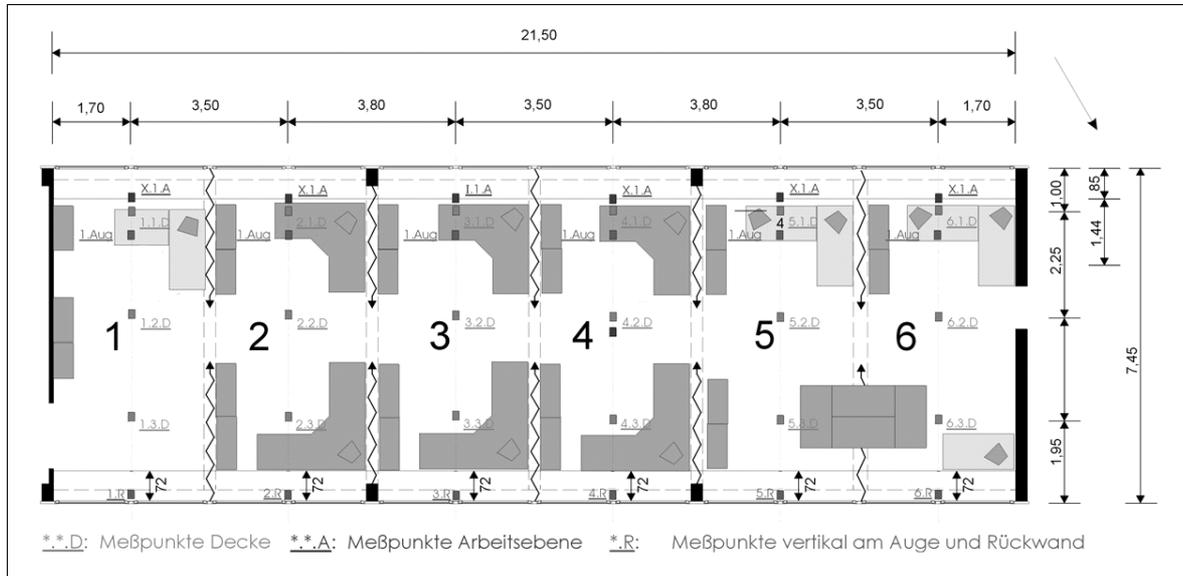


Abbildung 12.4-1: Anordnung der Beleuchtungsstärkemesspunkte im Grundriss

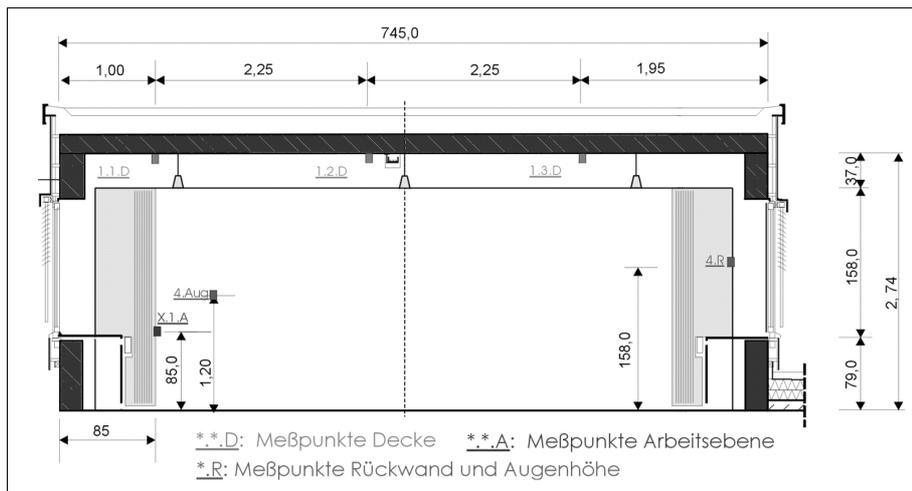


Abbildung 12.4-2: Anordnung der Beleuchtungsstärkemesspunkte im Schnitt

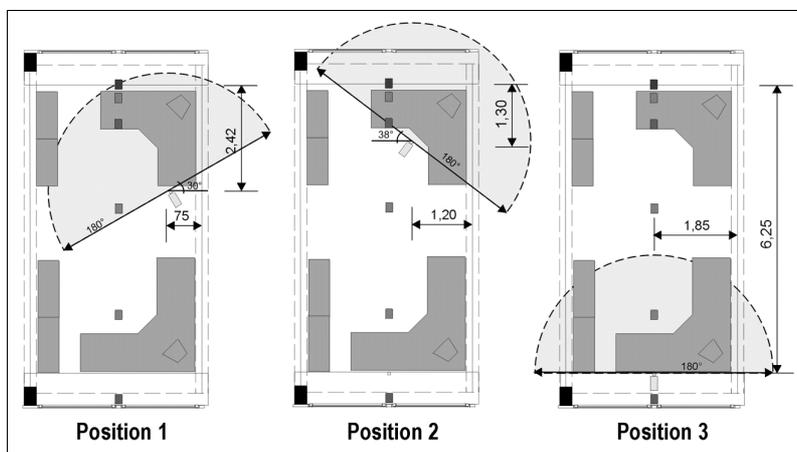


Abbildung 12.4-3: Anordnung der Leuchtdichte positionen im Grundriss

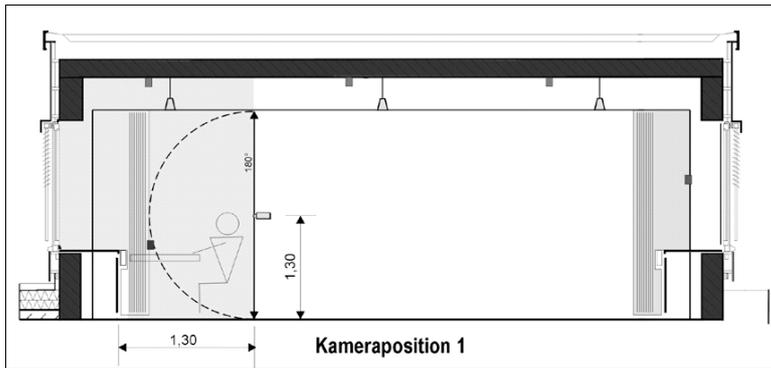


Abbildung 12.4-4: Anordnung der Leuchtdichte positionen im Schnitt

12.4.3 Messtechnik

Kapitelverweis aus Kapitel 4.2

Aufgrund langjähriger Erfahrung in verschiedenen Monitoringprojekten wurden Datenlogger der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik eingesetzt. Bereits vorhandene Geräte konnten zudem problemlos in das Messsystem eingebunden werden. Ein großer Vorteil der Messgeräte liegt in der einfachen Handhabung: In den Steckern der Sensoren sind alle Parameter werksseitig programmiert und enthalten Messwertkorrekturen, Skalierungen, Dimensionen und Fühlerbezeichnung, so dass die aufwändige Programmierung und Kalibrierung des Messgerätes entfällt. Zur Anpassung an Sensoren anderer Hersteller werden die Anschlussstecker individuell programmiert. Die Sensoren sind so von Messgerät zu Messgerät ohne jede Einstellung austauschbar. Durch zusätzliche Steckkarten sind die Geräte bis auf 98 Messstellen erweiterbar. Die Geräte sind untereinander vernetzbar. Sie wurden durch einen PC angesteuert und die Messdaten ausgelesen.

Tabelle 12.4-7: Technische Daten der Messgeräte

Messstationen			Technische Daten	
Messstation 1	Almemo 5590-2	48 Messstellen	Systemgenauigkeit	±0,03% v. Messwert, ±2 Digit
Messstation 2	Almemo 3290-8	9 Messstellen	Temperaturdrift	0,005%/°C
Messstation 3	Almemo 5590-2	9 Messstellen	AD-Wandler	16 Bit
			Messrate	2,5 oder 10 Messungen pro Sekunde
			Digitale Schnittstelle	RS232
			Vernetzung	Current Loop

Tabelle 12.4-8: Technische Daten der Sensoren

Sensor	Fabrikat / Typ	Messgröße	Genauigkeit (Messbereich)
Pyranometer	Kipp+Zonen, CM11	Globalstrahlung	± 3% (Für Tagessumme)
Schattenringpyranometer	Kipp+Zonen, CM11	Diffusstrahlung	± 3% (Für Tagessumme)
Tageslichtmesskopf	PRC Krochmann 910 GV	Globalbeleuchtungsstärke, horizontal und 4 vertikale Ebenen außen	± 0,9% 0-150 kLux
Tageslichtmesskopf	Ahlborn FL A 613 VLM	Vertikale Beleuchtungsstärke in der Fassadenebene außen	Absoluter Fehler <10% (0-170 kLux)
Temperatur / Luftfeuchte	Ahlborn FHA 646 AG	Temperatur und Luftfeuchte außen	Temp.: ± 0,1°C Feuchte ± 2%
Lichtmessköpfe	Ahlborn FLA 613 VL	Beleuchtungsstärken im Raum (horizontal / vertikal)	Grundgenauigkeit 5% vom Messwert (0-26000 Lux)

Tabelle 12.4-9: Technische Daten der Leuchtlichtekameras

Sensor	Fabrikat / Typ	Messgröße	Genauigkeit (Messbereich)
Leuchtdichte-Kamera	Technoteam LMK 98-2	hochaufgelöste Leuchtdichte	Anzahl der Messbereiche bis zu 250 Bildauflösung 1280 x 1024 Bildpunkte von Graufiltern bis 300 Mcd/m ² Blende Festblende Entfernungseinstellung Fixfocus Dynamik Einzelpunkt 1:1 000 000 V(λ)-Anpassung fl < 3,5 % räumliche Bewertung f2(g) < 0,5 % Einfluss der Umfeldleuchtdichte f2(u) < 2 % Linearitätsfehler f3 < 0,2 % Abgleichfehler f11 < 0,5 % Kalibrierunsicherheit < 2 %

12.4.4 Musterfragebogen

Kapitelverweis aus Kapitel 4.3.3

Verbundprojekt:
 Licht in Büroräumen – Sommerschutz – Vergleich innovativer Systeme

Nutzerbefragungen

BITTE FÜLLEN SIE BEI JEDER BEFRAGUNG DIE UNTEN STEHENDE TABELLE AUS!

Probandenkennzahl	Datum								
Versuchsleiter	Uhrzeit Beginn								
Raumnummer	1	2	3	4	5	6	Fragerunde	1	2

Universität Dortmund – Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur und Bauphysik – Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut F.O. Müller – Seite 1 von 12

Fragebogen Seite 1

1.a Vor Ihrem Fenster ist ein Sonnenschutzsystem installiert. Schützen dieses System bei der Einstellung Ihrer Einrichtung nach gut vor den Sonne? Bitte beurteilen Sie mit Schülern von Note 1 (sehr gut) bis Note 6 (ungünstigend).

Note

1.b Ist ein ausreicher Sonnenschutz mit diesem System nur durch völliges „Schließen“ des Fensters, d.h. mit Verminderung des Ausblicks möglich? Bitte kreuzen Sie an:

Ja Nein

Wenn Ja, beurteilen sie das eher

Positiv Negativ

1.c Bitte Beschreiben Sie die Funktion des in Ihrem Raum installierten Sonnenschutzes in der jetzigen Situation mit drei Stichworten!

1.
2.
3.

2.a Schauen Sie sich das Sonnenschutzsystem in Ihrem Testraum an. Wann funktioniert das System Ihrer Beurteilung nach nicht bzw. ist das Tageslicht im Raum durch den Sonnenschutz gerade im Moment in irgendeiner Weise:

Eingeschränkt Nicht eingeschränkt

2.b Empfinden Sie die möglicherweise vorhandene Tageslichteinschränkung als störend?

Störend Nicht störend

3.a Schauen Sie sich bitte für einige Sekunden im Raum um. Ist eine Änderung der Farben im Raum durch das System festzustellen (zum Beispiel die Farbe der Wand/ Decke)?

Ja Nein

3.b Wenn eine Farbänderung vorhanden ist, empfinden Sie diese als störend oder nicht störend? Nutzen Sie unten stehende Skala.

Störend Nicht störend

Fragebogen Seite 4

4.a Entstehen durch das Sonnenschutzsystem Muster oder Streifen im Raum?

Ja Nein

4.b Falls, Muster oder Streifen vorhanden sind, empfinden Sie diese als

Störend Nicht störend

5.a Ist eine Verminderung des Tageslichts durch den Sonnenschutz gegenüber einem „normalen“ Fenster ohne Sonnenschutz bemerkbar?

Vorhanden Nicht vorhanden

5.b Falls Sie eine Verminderung wahrnehmen, empfinden Sie diese als störend?

Störend Nicht störend

6.a Bitte achten Sie nun auf die Wittersituation draußen!
Falls draußen gerade Schwankungen des Tageslichtes stattfinden, beispielsweise durch vorüberziehende Wolken, sind diese Schwankungen auch im Raum bemerkbar?

Ja Nein

6.b Falls Schwankungen im Raum bemerkbar sind, empfinden Sie diese als störend?

Störend Nicht störend

7.a Einige Systeme sehen in ihrer Funktion die Umlenkung des Tageslichtes in die Raumlänge vor. Ist in Ihrem Raum eine solche Lichtenkung an Wänden oder Decken festzustellen?

Ja Nein Weiß nicht

7.b Falls ja, wie empfinden sie dies?

Positiv Negativ Weiß nicht

Fragebogen Seite 5

8.a Betrachten Sie nun bitte noch mal die Funktion des Systems als Sonnenschutz. Ist neben dem installierten System ein weiteres notwendig?

Ja Nein

8.b Wenn zusätzlicher Schutz notwendig ist, aus welchen Gründen? Bitte geben Sie einige Stichpunkte an.

9. Bitte betrachten Sie nun Ihren Arbeitsplatz insgesamt. Würden Sie in der momentanen Situation in Ihrem Raum gerne Kunstlicht zuschalten?

Ja Nein

10. Wie beurteilen Sie den Ausblick ins Freie durch den (geschlossenen) Sonnenschutz? Bitte bedenken Sie hierbei, dass sich Ihr Büro auch tieferen Geschossen befinden könnte, z.B. an einer Straße oder mit gegenüberliegenden Gebäuden?

Beschränkt Nicht beschränkt

Nicht gestört Gestört

Ausreichend Nicht ausreichend

11. Bitte achten Sie jetzt wieder auf den Innenraum. Wie beurteilen Sie die Wirkung des einfallendes Tageslichts?

Angenehm Unangenehm

Natürlich Unnatürlich

Dunkel Heil

Kalt Warm

Universität Dortmund – Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur und Bauphysik – Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut F. O. Müller – Seite 6 von 12

Fragebogen Seite 6

12. Beurteilen Sie nun bitte den Gesamttraum mit dem Sonnenschutzsystem: (Mehrfachnennungen möglich)

Offen

Dunkel

Geschlossen

Heil

Grell

Natürlich

Verfremdet

Eingeschlossen

Sonstiges _____

13. Wird Ihr Arbeitsplatz in der momentanen Situation ausreichend mit Tageslicht versorgt?

Eher nicht Eher schon

14.a Fühlen Sie sich durch helle Oberflächen im Raum geblendet?

Nie Oft

14.b Wenn Sie sich durch zu helle Oberflächen im Raum geblendet fühlen, welche sind dies. Bitte kreuzen Sie unten stehende Möglichkeiten an (Mehrfachnennungen möglich).

Decken

Wände

Sonnenschutzsystem

Andere Gegenstände

Wenn andere, welche _____

15.a Treten störende Spiegelungen oder Reflexionen durch das Sonnenschutzsystem auf?

Ja Nein

15.b Wenn störende Spiegelungen oder Reflexe auftreten, wie häufig ist dies der Fall, während Sie an diesem Arbeitsplatz sitzen?

Nie Oft

Universität Dortmund – Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur und Bauphysik – Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut F. O. Müller – Seite 7 von 12

Fragebogen Seite 7



Vielen Dank für ihre Mitarbeit bei dieser Fragerunde. Wünsche und Anregungen können Sie gerne beim Versuchsleiter hinterlassen. Wir werden uns schnellstmöglichst darum kümmern.

Bitte tragen Sie nun noch die genaue Enduhrzeit in unten stehenden Kasten ein. Geben Sie bitte auch an, ob Sie an der nächsten Fragerunde teilnehmen können oder nicht. Das genaue Datum für die nächsten Runden erfahren Sie vom Versuchsleiter.

Uhrzeit Ende		
Teilnahme an kommenden Fragerunde?	Ja	Nein

Universität Dortmund – Lehrstuhl für Klimageschichte Architektur und Bauphysik – Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut F.O. Müller Seite 12 von 12

Fragebogen Seite 12

12.5 Ergebnisse

Anhang zu Kapitel 7.2.1: Anmerkung: Die Kursiv gehaltenen Teile im Abschnitt „Wirkung“ sind aufgrund der geringen Anzahl an Farbmessungen nur als Tendenz zu verstehen.

Tabelle 12.5-1: Zusammenstellung der Auswahl an Fragen und Messgrößen für das Bewertungsverfahren

TEMPERATUR		AUSSICHT		LICHTLENKUNG	
Frage	Messgröße	Frage	Messgröße	Frage	Messgröße
o Bewertung der Raumtemperatur	o Innenraumtemperatur °C	o Bewertung des eingeschränkten Tageslichtes	o Leuchtdichtemittelwert aus Nutzerposition (cd/m ²)	o Bewertung der Lichtlenkung	o Leuchtdichtemittelwerte aus Nutzerposition 2 (cd/m ²) (Lichtlenksysteme)
		o Bewertung des Ausblicks	o Vertikale Beleuchtungsstärke am Auge (Lux) o Sonnenlichtquotient am Auge		
FUNKTION		BLENDUNG		WIRKUNG	
Frage	Messgröße	Frage	Messgröße	Frage	Messgröße
o Weiterer Schutz notwendig?	o Vertikale Beleuchtungsstärke am Auge (Lux) o Sonnenlichtquotient am Auge	o Blendung durch das Sonnenschutzsystem	o Maximale Leuchtdichte aus Nutzerposition 2 (cd/m ²)	o Urteil über den Gesamteindruck eines Raumes: Verfremdet	o Farbwiedergabe an Nutzerposition
		o Momentane Blendung während der Befragungen	o Maximale Leuchtdichte aus Nutzerposition 1 (cd/m ²)	o Wirkung Tageslicht (Angenehm - unangenehm)	o Leuchtdichtemittelwerte aus Nutzerposition (cd/m ²)
				o Wirkung Tageslicht (Natürlich - Unnatürlich)	o Leuchtdichtemittelwerte aus Nutzerposition (cd/m ²)
				o Farbänderung (Störend - Nicht störend)	o Leuchtdichtemittelwerte aus Nutzerposition (cd/m ²) o Farbtemperatur Nutzerposition
HELLIGKEIT					
Frage	Messgröße	Frage	Messgröße	Frage	Messgröße
o Zuschalten Kunstlicht gewünscht?	o Leuchtdichtemittelwert aus Messposition 1 und 3 (cd/m ²)	o Störung durch eine Verminderung des Tageslichtes	o Leuchtdichtemittelwert aus Messposition 1 und 3 (cd/m ²)	o Wirkung des Tageslichtes: Dunkel - Hell	o Beleuchtungsstärke an der Decke (Raumtiefe) o Sonnenlichtquotient am Auge
	o Sonnenlichtquotient am Auge	o Ausreichendes Tageslicht am Arbeitsplatz	o Vertikale Beleuchtungsstärke am Auge (Lux) (für Jalousiesysteme geltend)		o Globale Außenbeleuchtungsstärke o Vertikale Beleuchtungsstärke am Auge

Anhang zu Kapitel 9.3:

Table 12.5-2: Tabellarischer Überblick über systemunabhängige Kriterien

ARBEITSPLATZ	TEMPERATUR	AUSSICHT	BLENDUNG
o Das momentane Wohlbefinden während der Befragungen sowie die Bewertung des Arbeitsumfeldes (Position, Fenster, Größe)	o Eine Behinderung durch zu große Hitze	o Im Innenraum bemerkbare Schwankungen des Wetters und deren Bewertung	o Das Auftreten störender Spiegelungen, nicht aber deren Bewertung o Die Bewertung störender Muster oder Streifen im Raum, nicht aber das Auftreten derselben
FUNKTION	HELLIGKEIT	WIRKUNG	GESAMT
o Die Störung durch ein starres System sowie die Wichtigkeit von Eingriffsmöglichkeiten	o Das Zuschalten des Kunstlichtes	o Ein unangenehmer Raumeindruck (Negative Eigenschaften)	o Die Gesamtbewertung der Systeme (Schulnote)

Table 12.5-3: Tabellarischer Überblick über systemabhängige Kriterien

ARBEITSPLATZ	TEMPERATUR	AUSSICHT	BLENDUNG	FUNKTION
o Die Bewertung der Offenheit eines Raumes (offen, geschlossen, eingeschlossen)	o Empfindung der Raumtemperatur sowie empfundene Schutzfunktion der Systeme	o Die Verminderung/ Beschränkung des Ausblicks und des Tageslichtes sowie deren Bewertung o Die positive und negative Eigenschaft mit ausreichender Sichtverbindung nach außen	o Das Auftreten von Blendung durch den Sonnenschutz sowie störende Spiegelungen/ Mustern/ Streifen, nicht jedoch die Bewertung o Die Bewertung heller Flächen o Momentane Blendung sowie positive/ negative Eigenschaften der Systeme bezogen auf Blendung	o Die Bewertung der Sonnenschutzfunktion sowie der Wunsch nach weiteren Schutzmaßnahmen o Die Ästhetik sowie die Funktion als Statussymbol o Die Flexibilität der Systeme, nicht aber deren Bewertung
HELLIGKEIT	LICHTLENKUNG	WIRKUNG	PRIVATHEIT	GESAMT
o Die Wirkung des Tageslichtes (dunkel - hell) o Die Bewertung der Quantität des Tageslichtes (ausreichend oder nicht) o Die Verminderung des Tageslichtes durch das geschlossene System und deren Bewertung	o Die Wahrnehmung einer Lichtlenkung sowie deren Bewertung	o Die angenehme, natürliche und kalte oder warme Lichtwirkung o Die Wahrnehmung von Farbänderungen und deren Bewertung	o Die Bewertung des Einblickes	o nicht raumabhängig

Tabelle 12.5-4: Tabellarischer Überblick über ermittelte Schwellwerte

		Messpunkt A1 (Lux)	Messpunkt D2 (Lux)	Messpunkt vertikal in Aughöhe (Lux)	Außen Global (Lux)	Außen vertikal (Lux)	LMK MW Pos. 2 (cd/m ²)	LMK MW Pos. 3 (cd/m ²)	LMK Max Pos. 2 (cd/m ²)	LMK MW während (cd/m ²)	Farbtemperaturabweichung (Mired)	Farbtemperatur Arbeitsebene (Kelvin)	Farbtemperatur entlang der Wand (Kelvin)	Farbtemperatur Nutzerposition (Kelvin)
Blendung	Helle Flächen: Wahrnehmbar - unkomfortabel/ unakzeptabel						1121							
	Momentan geblendet: Ja		3169						29750					
Helligkeit	Zuschalten Kunstlicht gewünscht: ja				5581	12316								
	Wirkung Tageslicht: Eher hell	3393	1024	3797					59					
	Tageslicht ausreichend am Arbeitsplatz: eher schon	4442	829	3169		40039			72					
Ausblick	Einschränkung des Tageslichtes: störend						1121	141		80				
Funktion	Sonnenschutz momentan gut?	4274		3169										
	Weiterer Schutz notwendig?			3797										
Wirkung	Urteil Gesamttraum: Verfremdet										32	6745	10024	
	Farbänderung: Störend - Nicht störend													10024

12.6 Lebenslauf

Heide Gisela Schuster

Geboren 07. September 1969 in Ingolstadt

1989 Abitur in Wolfsburg

1989 – 1990 Université Toulouse le Mirail, Frankreich, Französisch-Studium

1990 - 1997 Architektur an der Fachhochschule Darmstadt, Diplom

1997- 1998 DAAD – Graduiertenstipendium und Environment & Energy Studies Master Programme, Architectural Association London, Masterarbeit August 1998 mit Auszeichnung

1997 – 1999 Freie Mitarbeit in verschiedenen Architekturbüros

Seit 1998 Selbständige Architektin, Durchführung eigener Projekte und Wettbewerbe, insbesondere zu den Themen nachhaltiges und energieeffizientes Planen und Bauen auf internationaler Ebene

Seit 2000 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Dortmund, Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur, Prof. Dr.-Ing. Hehlut F.O. Müller, Lehre, Forschung und Entwicklung in projektleitender Funktion, Schwerpunkte: Tageslichtnutzung und Fassadentechnologie

2003 Beginn des Dissertationsvorhabens an der Universität Dortmund

