

Lichtfarbenänderung durch Tageslichtsysteme

Dipl.-Ing. MA Heide Schuster
Universität Dortmund, Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur
Baroper Strasse 301, D-44227 Dortmund
heide.schuster@uni-dortmund.de

Dr.-Ing. Cornelia Vandahl
Dipl.-Ing. Jascha Vogel
Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
PF 100565, D-98684 Ilmenau
cornelia.vandahl@tu-ilmenau.de

Am Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur der Universität Dortmund wurden innerhalb eines Forschungsprojektes verschiedene innovative Sonnenschutz- und Lichtlenkeinrichtungen messtechnisch untersucht. Darüber hinaus wurden Befragungen von Versuchspersonen zu den verschiedenen Lichtsituationen durchgeführt. Dafür wurde eine Testfassade mit sechs verschiedenen Systemen und Messräumen installiert [1].

Ein wichtiges Gütemerkmal sind Lichtfarbe und Farbwiedergabeeigenschaften. Die Farbe des Lichts und die Farben der Körper und Flächen im Raum tragen zum Erkennen unserer Umwelt bei. Sie haben zugleich psycho-physische Wirkungen und beeinflussen die Stimmung des Menschen. Es sind die beiden Merkmale Lichtfarbe und Farbwiedergabeeigenschaften, deren richtige Beurteilung Voraussetzung für Behaglichkeit und einwandfreies Farberkennen ist.

Ziel war es, eine messtechnische Untersuchung hinsichtlich der Lichtfarben und Farbwiedergabeeigenschaften durchzuführen, die Ergebnisse zu beschreiben und diese dann den Bewertungen von Versuchspersonen gegenüberzustellen.

Bei dem hier vorliegenden Bericht handelt es sich um eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse. Eine ausführliche Dokumentation liegt vor [2].

1. Räume und Systeme

Um die innovativen Sonnenschutz- und Lichtlenkeinrichtungen messtechnisch zu untersuchen, wurde am Lehrstuhl für Klimagerechte Architektur der Universität Dortmund die Fassade umgebaut. Ziel war es, die verschiedenen Systeme unter gleichen und natürlichen Bedingungen zu vermessen und so gegenüberstellen zu können.

Der Lehrstuhl befindet sich im Staffelgeschoss eines Institutsgebäudes auf dem Campus der Universität. Die nach Nordost und Südwest orientierten Fensterbänder umschließen einen Raum von 7,45m Tiefe und jeweils 3,60m Breite (Bild 1). Durch textile Raumabtrennungen wurden sechs Messräume geschaffen, vor deren bestehender Fassade jeweils unterschiedliche Sonnenschutz- und Lichtlenkeinrichtungen (Tabelle 1) installiert wurden. Ein Raum (Raum 3) wurde für die Messungen der Vergleichswerte als Referenzraum genutzt, indem das Licht ohne System einfällt. Die sechs Messräume werden als universitäre Büro- und Verwaltungsräume genutzt und waren zum Zeitpunkt der Messung als solche eingerichtet. Die nach Nordost orien-

tierten Fensterbänder waren komplett abgedunkelt. Durch die Lage der Räume ergeben sich verschiedene Sonneneinfallswinkel auf die Fassade. Erst am frühen Nachmittag fällt direktes Sonnenlicht auf die Lichtlenksysteme.

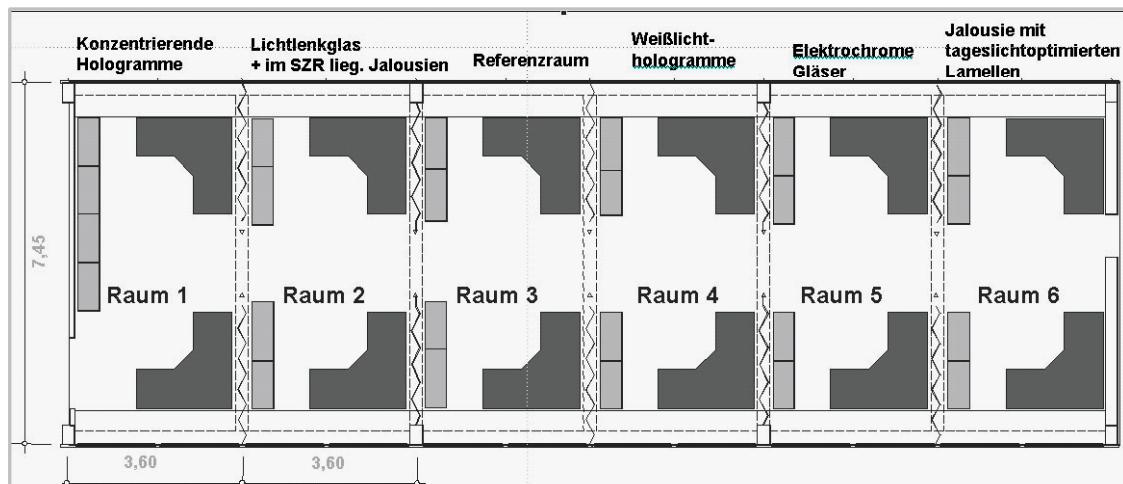


Bild 1: Messräume (Grundschnitt)

Raum 1	Konzentrierende Hologramme mit Photovoltaik – Sonnenschutzsystem in Kombination mit einem innenliegenden Blendschutz
Raum 2	Im Scheibenzwischenraum liegendes Lichtlenkglas im Oberlichtbereich und Jalousien im Sichtbereich – Sonnen- und Blendschutz
Raum 3	außenliegender Sonnenschutz mit im Oberlichtbereich leicht geöffneten Lamellen zur Tageslichtnutzung
Raum 4	Weißlichthologramme in Kombination mit einer außenliegenden Jalousie zur Tageslichtlenkung
Raum 5	Elektrochromes Glas in Kombination mit einem innenliegenden Blendschutz
Raum 6	Tageslichtoptimierte Jalousie mit im Oberlicht- und Sichtbereich getrennt stufenlos verstellbaren konkaven Lamellen
RR	Referenzraum ohne System

Tabelle 1: Untersuchte Tageslichtsysteme

1. Lichtfarbe

In der Farbmeterik werden Lichtfarben durch die Kennzeichnung ihrer Farbart, meist durch Angabe des Farbortes x, y in der Normfarbtafel, beschrieben. Daneben wird die Farbe einer Lichtquelle häufig mit der Farbe des so genannten „schwarzen“ oder Planckschen Strahlers verschiedener Temperatur verglichen. Die Farbarten des Planckschen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen liegen in der Farbtafel auf einem Kurvenzug. Jeder Farbort dieser Kurve entspricht einer bestimmten Temperatur, der so genannten „Farbtemperatur“. Niedrige Farbtemperaturen sind roten Farbarten zuzuordnen und mit steigender Temperatur wird die Farbart weiß und dann blau. Die Temperaturangabe erfolgt in Kelvin.

Die spektralen Eigenschaften von technischen Temperaturstrahlern (Grauen Strahlern) sind sehr ähnlich denen des Planckschen Strahlers. Ihnen kann man auch in guter Näherung eine Farbtemperatur zuordnen. Die spektralen Eigenschaften vieler Lichtquellen können von dem Verhalten der Temperaturstrahler stark abweichen. Die Farbart solcher Lichtquellen ist nur selten mit einem Punkt des Planckschen Kurvenzuges identisch, liegen aber vorwiegend in der Nähe dieser Kurve. Solchen praktischen Lichtarten kann dann eine „ähnlichste Farbtemperatur“ angenähert zugeordnet werden.

Lichtquellen mit ähnlichsten Farbtemperaturen im Bereich von ca. 3000 K werden als „warmweiß“ bezeichnet. Hohe Temperaturen im Bereich um ca. 6500 K werden entsprechend als „tageslichtweiß“ und der dazwischen liegende Bereich als „neutralweiß“ bezeichnet. Auch das natürliche Tageslicht kann durch seine ähnlichsten Farbtemperaturen gekennzeichnet werden. Je nach Sonnenstand und Wetterlage ist sie Schwankungen unterworfen. Etwa 20000 K können für den blauen klaren Himmel angesetzt werden, während bei Sonnenuntergang die ähnlichste Farbtemperatur bis auf etwa 4000 K sinkt.

Die Farbtemperatur lässt sich auch in Mired (engl. Abk. Micro Reciprocal Degrees) angeben. Mired ist das 10^6 -fache des Kehrwertes der Kelvin-Grade:

$$1000000 / K = \text{Mired}$$

Für die Auswertung wurde die Abweichung der Farbtemperatur als Δ mired angegeben: $\Delta \text{ Mired} = \text{Mired} (\text{Raum}) - \text{Mired} (\text{Referenz})$

2. Farbwiedergabe

Die Farbwiedergabeeigenschaft gibt an, wie natürlich die Farben der Umwelt unter dem vorhandenem Licht erscheinen. Zur Beschreibung dient der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a , der auf der Basis von 8 Körperfarben unter einer Bezugslichtart ermittelt wird [3]. Als bester Wert kann 100 erreicht werden (Tabelle 2).

Farbwiedergabestufe	R_a
1A	90 ... 100
1B	80 ... 89
2A	70 ... 79
2B	60 ... 69
3	40 ... 59
4	20 ... 39

Tabelle 2: Stufen der Farbwiedergabe nach DIN 5035

3. Messungen und Messgeräte

Zur Bestimmung der Lichtfarbe und der Farbwiedergabe muss die spektrale Verteilung des Lichtes gemessen werden. Dazu dienen Spektralmessgeräte, von denen 2 verschiedene zum Einsatz kamen:

Specbos 1100

SpectraScan PR-705

Mit beiden Messgeräten lassen sich spektrale Bestrahlungsstärken und Strahldichten messen. Daraus werden Beleuchtungsstärken, Leuchtdichten, Farbtemperatur und Farbwiedergabe-Kennwerte berechnet.

Die Messpunkte für Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten entsprechen denen der anderen Untersuchungsteile und sind in Bild 2 und Tabelle 3 dokumentiert.



Bild 2: Messpunkte

Messpunkt	Ort bzw. Blickrichtung	Messgröße
AE1 - AE5	Arbeitsebene	horizontale Bestrahlungsstärke
N	Nutzerposition in der Arbeitsebene	horizontale Bestrahlungsstärke
D1 - D3	Decke	Strahldichte
Wv W1 - W3 Wh	Wand	Strahldichte
fu	unterer Fensterbereich	Strahldichte
fo	oberer Fensterbereich	Strahldichte
N	Blick waagrecht 45° zur Fassade	Strahldichte

Tabelle 3: Erläuterungen zu den Messpunkten

Wegen mehr oder weniger häufig wechselnder Lichtverhältnisse durch Bewölkung und Sonnenstand mussten in regelmäßigen Zeitabständen Außenmessungen und Referenzmessungen am gleichen Ort und in gleicher Weise durchgeführt werden.

Außenmessungen dienen dazu, die verschiedenen Lichtfarben des Tageslichts über den Tag verteilt zu ermitteln und zu protokollieren. Die Farbtemperatur ändert sich mit dem Sonnenstand, der Bedeckung und der Trübung der Atmosphäre. Es wurde jeweils eine horizontale und eine vertikale Beleuchtungsstärkemessung auf dem Dach des Gebäudes durchgeführt. Die horizontale Messung fängt das Licht aus dem

Zenitbereich des Himmels auf. Vertikal wird das auf die Fassade auftreffende Licht gemessen.

Die Referenzmessungen wurden im Referenzraum durchgeführt, in dem das Tageslicht ohne Lichtlenkelemente einfällt. Die Referenzmessungen wurden stets unter gleichen Bedingungen an den vorgesehenen Messpunkten durchgeführt.

Die Referenzwerte dienen hauptsächlich dazu, Abweichungen und Veränderungen der Lichtfarben und Farbwiedergabewerte in den zu untersuchenden Räumen festzustellen, indem die gemessenen Werte mit den Referenzwerten verglichen werden. Die Abweichungen werden durch die Lichtlenk- und Sonnenschutzsysteme verursacht.

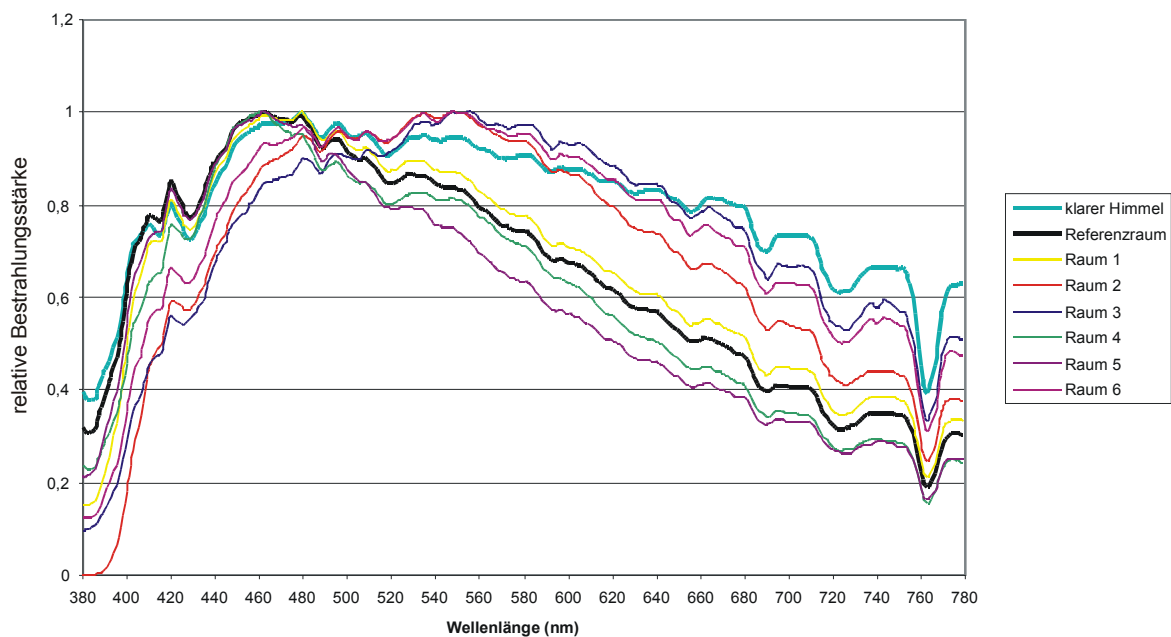


Bild 3: Messung der spektralen Bestrahlungsstärke (relativ) am Messpunkt AE1 (Zeitraum 13.7.03, 13:30 bis 14:30 Uhr)

4. Messergebnisse

4.1. Farbtemperaturen

Eine Veränderung der Farbtemperatur des einfallenden Tageslichtes ist vor allem in Fensternähe zu verzeichnen (Messpunkt 1 in Bild 4). Dies ist auch im Referenzraum ohne Tageslichtsystem der Fall. Die größte Änderung erfolgt im Raum 5 (Elektrochromes Glas). Im Raum 3 (Lamelle) ist dagegen eine Absenkung der Farbtemperatur zu erkennen.

In der Raumtiefe gleichen sich die Farbtemperaturen wieder den Außenwerten an (Messpunkte 2 bis 5).

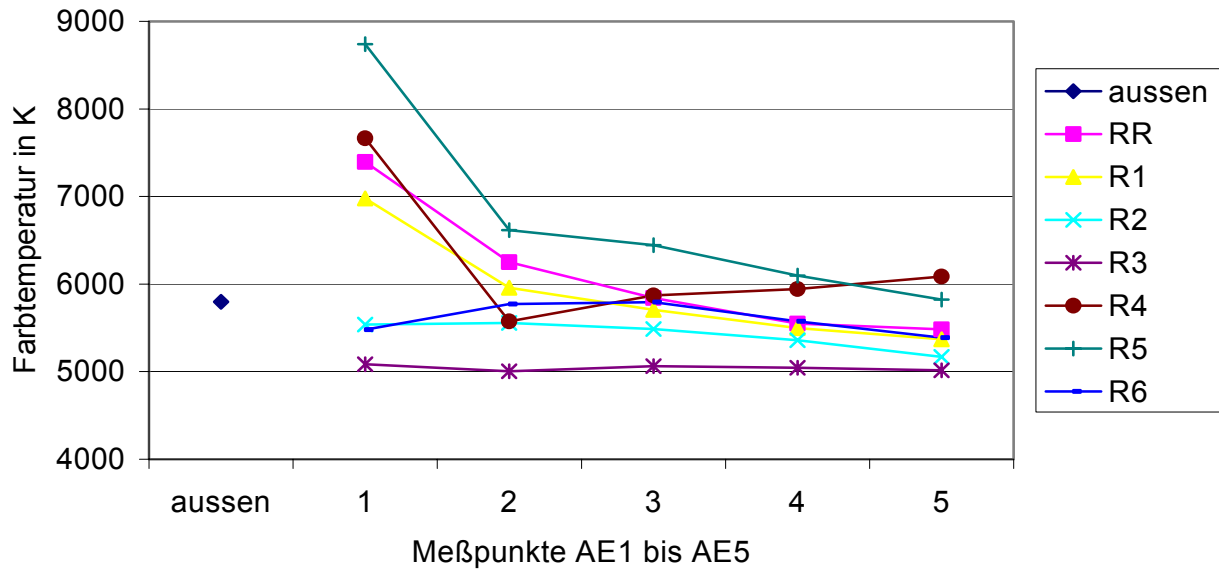


Bild 4: Verlauf der Farbtemperaturen an den 5 Messpunkten im Referenzraum (RR) und in den 6 Untersuchungsräumen (R1 bis R6). Zusätzlich ist der Wert der Außenmessung dargestellt. Alle Werte gelten für klaren Himmel und Sonne auf der Fassade (Messung 13.7.2003).

4.2. Farbabweichungen

In Tabelle 4 sind die Farbabweichungen zum Referenzraum für verschiedene Sonnenzustände zusammengefasst.

Arbeitsebene	Δ Mired	sonnig Sonne auf Fassade	klar Sonne nicht auf Fassade	bedeckt
Raum1	Mittel	5 wärmer	4 wärmer	6 kälter
	Max	8 wärmer an AE1	15 wärmer an AE1	11 kälter an AE1
Raum2	Mittel	19 wärmer	1 wärmer	-
	Max	45 wärmer an AE1	26 wärmer an AE1	-
Raum2 ohne Sonnenschutz	Mittel	-	4 wärmer	-
	Max	-	10 wärmer an AE2	-
Raum3	Mittel	33 wärmer	26 wärmer	28 wärmer
	Max	61 wärmer an AE1	49 wärmer an AE1	31 wärmer an AE1
Raum4	Mittel	1 wärmer	9 kälter	5 kälter
	Max	16 wärmer an AE2 12 kälter an AE4	17 kälter an AE2 wärmer an AE1	11 kälter an AE4
Raum5	Mittel	15 kälter	16 wärmer	53 kälter
	Max	15 kälter an AE1	22 wärmer an AE1	68 kälter an AE1
Raum6	Mittel	15 wärmer	9 wärmer	2 wärmer
	Max	53 wärmer an AE1	59 wärmer an AE1	14 wärmer an AE1

Tabelle 4: Maximale und mittlere Farbtemperaturabweichungen entlang der Arbeitsebene im Sommer in Δ Mired. Die Werte sind Abweichungen zum Referenzwert.

4.3. Farbwiedergabe

Deutliche Abweichungen der Farbwiedergabe sind im Raum 4 zu erkennen. Im Raum 2 sind die Abweichungen etwas geringer. Bei den anderen Räumen sind die Abweichungen unwesentlich (Bild 5).

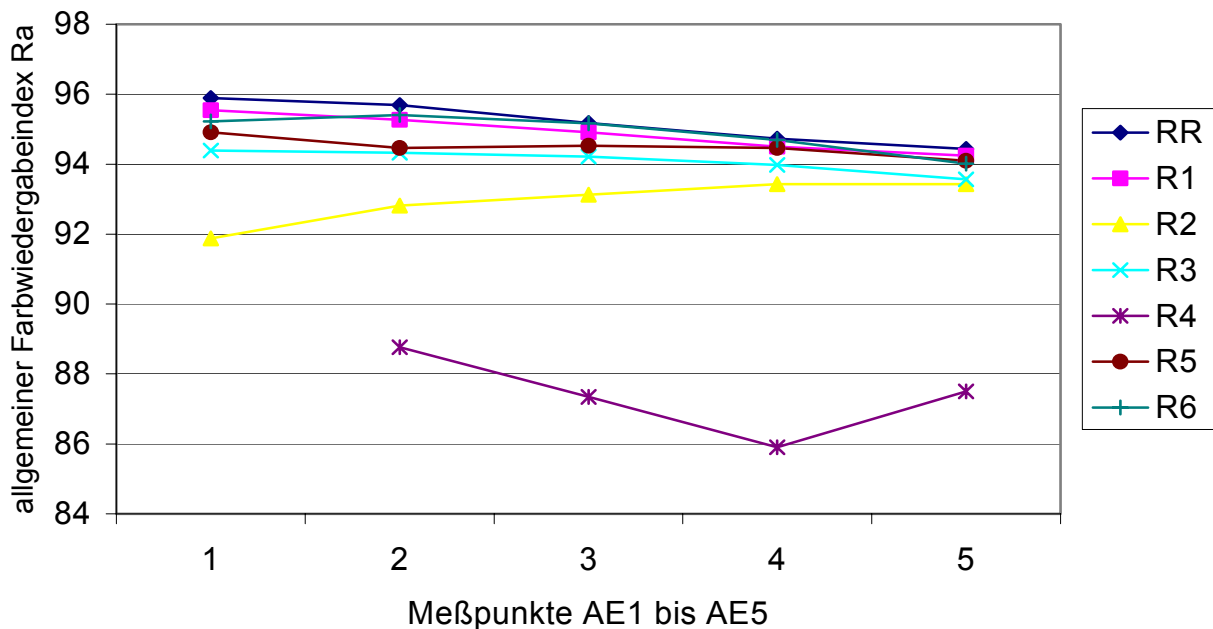


Bild 5: Verlauf des Allgemeinen Farbwiedergabeindexes an den 5 Messpunkten im Referenzraum (RR) und in den 6 Untersuchungsräumen (R1 bis R6). Alle Werte gelten für klaren Himmel und Sonne auf der Fassade (Messung 13.7.2003).

5 Zusammenhang zu den Befragungsergebnissen

5.1. Korrelation zwischen Mess- und Befragungsergebnissen

Um die Tageslichtsysteme hinsichtlich der Lichtfarbe und der Farbwiedergabe zu bewerten, ist es notwendig die Zusammenhänge zwischen den Mess- und Befragungsergebnissen aufzuzeigen. Das statistische Verfahren dazu ist die Korrelation. Im Folgenden sind in den Tabellen 5 und 6 die größten gefundenen Korrelationskoeffizienten $|r|$ dargestellt. Keine Angabe eines Wertes bedeutet, es besteht kein bzw. nur ein sehr schwacher Zusammenhang.

Aussage des Korrelationskoeffizienten:

$ r = 0$	kein Zusammenhang
$0 < r \leq 0,4$	niedriger Zusammenhang
$0,4 < r \leq 0,7$	mittlerer Zusammenhang
$0,7 < r < 1$	hoher Zusammenhang

Fragen 11.1 – 11.4 + 3b	Farbänderung störend - nicht störend	Wirkung Tageslicht angenehm - unangenehm	Wirkung Tageslicht natürlich - unnatürlich	Wirkung Tageslicht dunkel - hell	Wirkung Tageslicht kalt - warm
mittlere Farbtemperaturabweichung entlang der Wand in Mired				0,352	
Farbtemperaturabweichung an der Nutzerposition	0,376				

Tabelle 5: Korrelationskoeffizienten der Fragen 11 und 3b (keine Angabe: kein Zusammenhang)

Fragen 12.1 – 12.8	Urteil: Geschlossen	Urteil: Hell	Urteil: Grell	Urteil: Natürlich	Urteil: Offen	Urteil: Dunkel	Urteil: Verfremdet	Urteil: Eingeschlossen
Farbtemperatur oberer Fensterbereich in Kelvin					0,380			
Farbtemperatur unterer Fensterbereich in Kelvin	0,420							
Farbtemperaturabweichung an der Nutzerposition	0,522				0,465			

Tabelle 6: Korrelationskoeffizienten der Fragen 12 (keine Angabe: kein Zusammenhang)

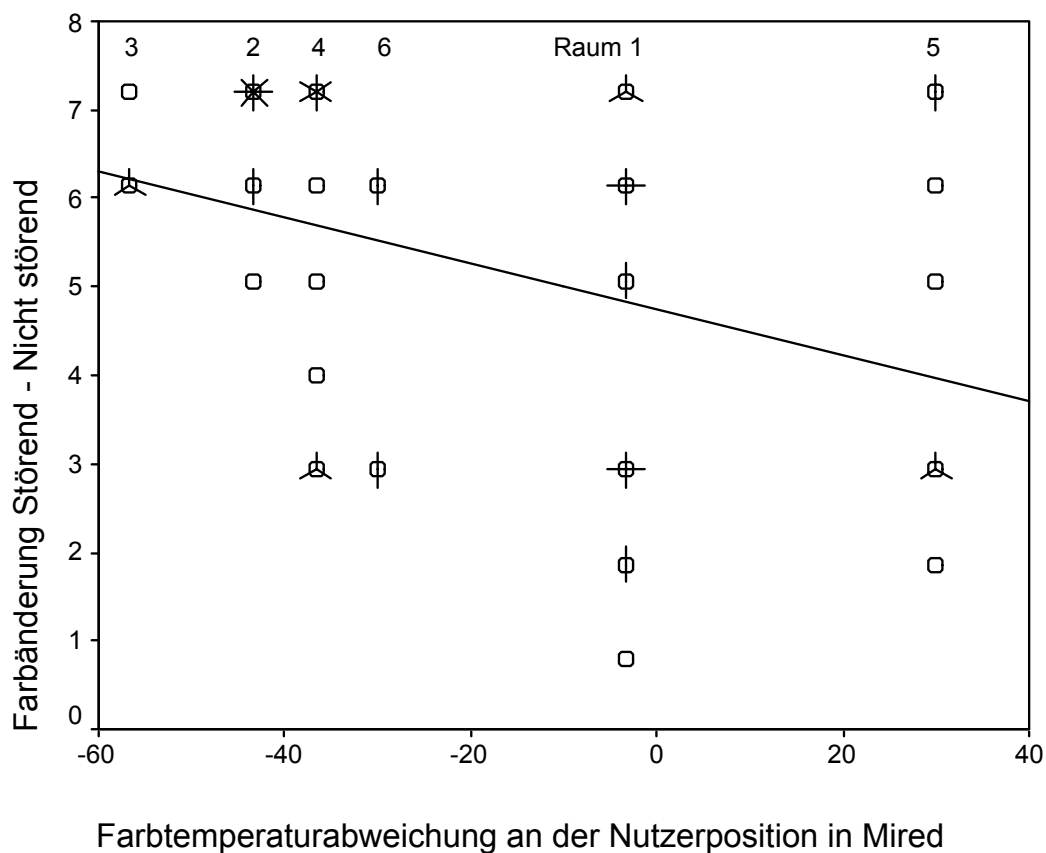


Bild 6: Zusammenhang zwischen der Abweichung der Farbtemperatur an der Nutzerposition und der Bewertung der Farbänderung als „störend – nicht störend“ (Streudiagramm und Anpassungslinie) für klaren Himmel

Die in der Tabelle 5 zusammengefassten Korrelationskoeffizienten liegen im Bereich von 0,3 bis 0,4. Das entspricht einem eher niedrigen Zusammenhang. In Bild 6 (stärkste gefundene Korrelation in der Tabelle 5) ist gut zu erkennen, dass die Messwertpaare stark um die Anpassungslinie streuen. Die getroffenen Aussagen der Versuchspersonen hängen demnach nicht sehr stark mit den in den Räumen befindlichen Farbtemperaturen oder Farbwiedergabewerten zusammen.

Die in Tabelle 6 zusammengefassten Korrelationskoeffizienten liegen im Bereich von 0,4 und 0,5. Das entspricht schon einem mittleren Zusammenhang. Die Urteile der Versuchspersonen nach Offenheit und Geschlossenheit korrelieren am besten mit den in der Nutzerposition gemessenen Farbabweichungen, aber auch mit den im Fensterbereich gemessenen Farbtemperaturen.

5.2. Vergleich der Räume

Die Ergebnisse der Befragung bewerten die Lichtsituationen in den einzelnen Räumen sehr unterschiedlich. Mit Hilfe des t-Tests wurden die unterschiedlichen Bewertungen auf Signifikanz getestet.

Bild 7 gibt einen Überblick über die Bewertung des Tageslichtes in den einzelnen Räumen. Die gegensätzlichsten Bewertungen lassen sich in Bezug auf die Natürlichkeit – Unnatürlichkeit des Tageslichts bei einem Vergleich der Räume 1 zu 2, 1 zu 3 und 1 zu 6 ausmachen. Dabei wird das Licht im Raum 1 im Vergleich als unnatürlich empfunden. Ein weiterer signifikanter Unterschied existiert im Raumvergleich 1 zu 5 in Bezug auf die Farbtemperatur (kalt - warm) des Tageslichts. Dabei wird das Licht im Raum 5 als kalt empfunden. Größere Unterschiede finden sich aber auch vor allem in Bezug auf die „Dunkelheit – Helligkeit“. Tendenziell wurde das Tageslicht in allen Räumen als angenehm und Farbänderungen, insofern sie auftraten, als nicht störend empfunden.

Anhand von Bild 8 erhält man einen Überblick über weitere Bewertungsunterschiede. Gegensätzliche Bewertungen lassen sich in Bezug auf Hell, Geschlossen, Eingeschlossen finden. Dabei werden Räume mit Sonnenschutz (Raum 2/3/4/6) im Vergleich zu denen ohne Sonnenschutz als Geschlossen oder Eingeschlossen bewertet. Räume ohne Sonnenschutz (Raum 1/5) werden dementsprechend eher mit „Offen“ beurteilt. Das Gesamturteil der Räume mit Sonnenschutz ist im Mittel eher „Natürlich“ und ohne Sonnenschutz (Raum 1/5) eher „Verfremdet“.

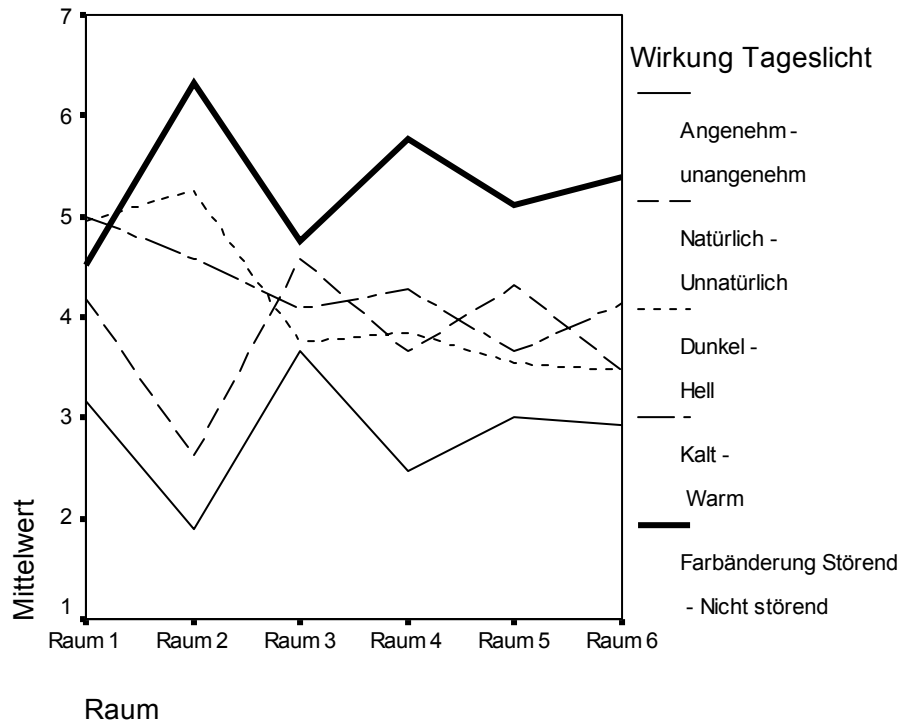


Bild 7: Mittelwertvergleich der Bewertungen der Fragen 11.1 -11.4

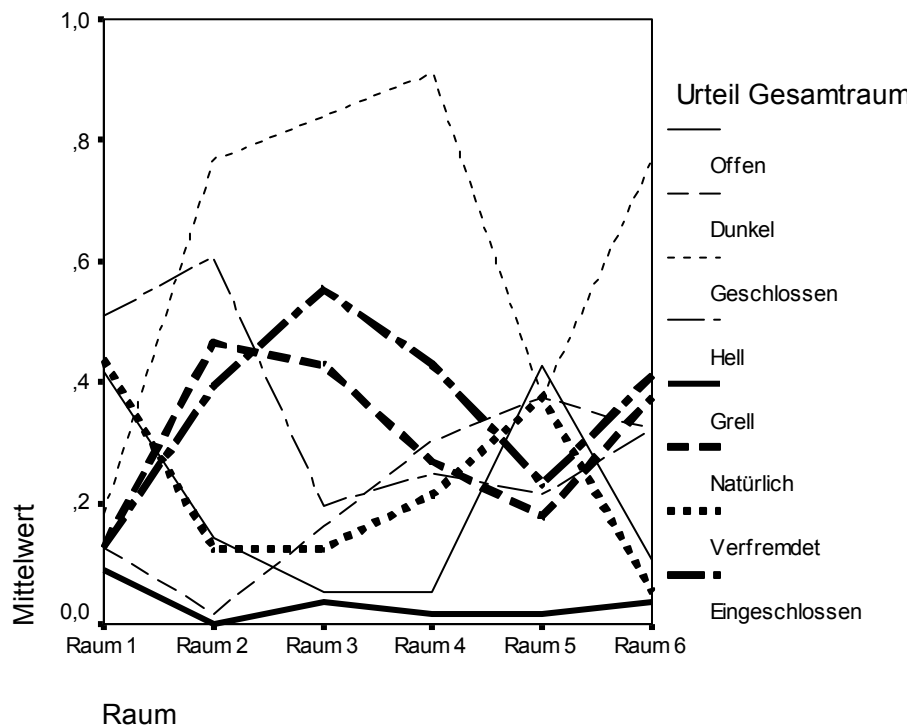


Bild 8: Mittelwertvergleich der Bewertungen der Fragen 12.1 -12.8

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ergebnis der messtechnischen Untersuchung zeigt im Allgemeinen eine Beeinflussung der spektralen Zusammensetzung des Tageslichts im Innenraum und somit der Lichtfarbe durch alle untersuchten Sonnenschutz- und Lichtlenkeinrichtungen. Die Änderungen der Farben sind messbar, jedoch sind sie oft nur so gering, dass sie nicht mehr für den Menschen im wahrnehmbaren Bereich liegen. Vor allem die konzentrierenden Hologramme in Raum 1 und die Weißlichthologramme in Raum 4 beeinflussen die Lichtfarben nur in einem sehr geringen Maße. Ausnahmen sind hier reflektierte Spektralfarben des direkt auf die Hologramme auftreffenden Sonnenlichts bei bestimmten Winkeleinstellungen der Elemente, die besonders bei niedrigem Sonnenstand im Winter bei den konzentrierenden Hologrammen und im Sommer bei den Weißlichthologrammen auftreten. Größere Farbabweichungen ließen sich in den anderen Räumen nachweisen.

Das Lichtlenkglas mit Jalousie im unteren Bereich (Raum 2), die tageslichtoptimierten Lamellen (Raum 6) und der außenliegende Sonnenschutz (Raum 3) erzeugen eine schwache bis starke Erwärmung der Lichtfarbe. Das Elektrochrome Glas in Raum 5 bewirkt dagegen durch seine Blaufärbung eine stärkere Abkühlung.

Eine Verschlechterung der Farbwiedergabeeigenschaften ist in den Räumen 2, 4 und 5 festzustellen. Die Werte liegen hier teilweise in der Farbwiedergabestufe 1b. Die Lichtqualität genügt somit nicht mehr höchsten Ansprüchen.

Die Auswertung der Befragungsergebnisse zeigt, dass deutliche Farbabweichungen in den Räumen mit den Elektrochromen Gläsern (Raum 5) und den konzentrierenden Hologrammen (Raum 1) wahrgenommen werden. Bei allen anderen Systemen ließen sich anscheinend keine Abweichungen bewusst wahrnehmen. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass kaum ein Zusammenhang zwischen den Aussagen der Probanden und den gemessenen lichttechnischen Größen der Lichtfarben und der Farbwiedergabewerte besteht. Tendenziell werden aber kältere Farben als störend und wärmere Farben als nicht störend empfunden. Dabei scheint die Lichtsituation im Fensterbereich und an der Nutzerposition für die Beurteilung ausschlaggebend zu sein, was nachvollziehbar ist, da an den Fensterflächen die Farbabweichungen am größten sind. Farbänderungen werden am stärksten in Raum 1 als störend empfunden, obwohl dieser Raum am Farbneutralsten ist. Diese Bewertung lässt sich auf die, besonders bei niedrigen Sonnenhöhen, an den Flächen im Innenraum reflektierenden Spektralfarben zurückzuführen. Auch der Eindruck der Verfremdung ist hier, zusammen mit dem bläulichen Licht in Raum 5, am stärksten.

Weitere schwache Zusammenhänge bestehen zwischen den Urteilen über den Gesamtraum „Offen/Geschlossen“ und der Farbtemperatur im Fensterbereich. Die Sonnenschutzsysteme im geschlossenen Zustand bewirken eine stärkere Senkung der Farbtemperatur im Raum in den rötlichen, gelblichen Bereich. Da aber geschlossene Sonnenschutzsysteme an sich einen Eindruck von Eingeschlossenheit vermitteln, liegt hier eventuell eine Scheinkorrelation vor. Ähnliches gilt für die Urteile „Hell/Dunkel“.

Die gemessenen und berechneten Farbabweichungen, die in den Räumen 2/3/6 relativ groß sind, müssten den Versuchspersonen eigentlich stärker auffallen. Ein

Grund dafür, dass es nicht so ist, kann chromatische Adaption sein. Das visuelle System des Probanden, der sich eine zeitlang im Raum befindet, stellt sich auf die Beleuchtung ein und nimmt diesen Unterschied, weil kein direkter Vergleich (Referenzraum) vorliegt, nicht.

In den Räumen 2, 3 und 6 werden trotz stark veränderten Lichtfarben keine Abweichungen der Farbwiedergabewerte festgestellt. Der Grund dafür ist, dass der allgemeine Farbwiedergabeindex hier nicht als ein Maß für die Natürlichkeit der Farbwiedergabe in Bezug auf das optimale Tageslicht (oder Referenzwert) betrachtet wird. Vielmehr wird für die Berechnung des Farbwiedergabewertes eine Bezugslichtart mit der ähnlichsten Farbtemperatur herangezogen.

Literatur

- [1] Müller, H., Schuster, H., Jellinghaus, S. u.a. Verbundprojekt Licht in Büroräumen - Sonnenschutz, Abschlußbericht Universität Dortmund, Klimagerechte Architektur, 2004
- [2] Vogel, J.: Lichtfarbenänderung durch Tageslichtsysteme. Diplomarbeit TU Ilmenau 2003
- [3] CIE: Verfahren zur Messung und Kennzeichnung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen. Technical Report CIE 13.2 1988