

Beeinflussung des Wohlbefindens am Büroarbeitsplatz durch Variation von Lichtfarb- und Leuchtdichteverteilung.

(Ableitung von praktischen Regeln für die Lichtplanung)

Autor: Pickelein, Andreas
DIAL GmbH
Gustav-Adolf Straße 4
58507 Lüdenscheid
www.dial.de

Mitautor: Polle, Dieter

1. Zusammenfassung

DIAL untersuchte, in einer praktischen Anwendung (Bürobeleuchtung), den Einfluss von ähnlichsten Farbtemperaturen T_{CCP} [K], Leuchtdichteverteilungen L [cd/m^2], sowie farbige Akzentbeleuchtungen zu verschiedenen Tageszeiten auf die Nutzerakzeptanz. In einem speziell lichttechnisch ausgerüstetem Büro – Versuchsraum wurden Testpersonen hinsichtlich Ihrer Akzeptanz auf unterschiedliche Lichtsituationen befragt. Die statistisch gesicherten Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass je nach Tageszeit und Leuchtdichteverteilung unterschiedliche Lichtfarbenkombinationen im Büroraum von den Nutzern präferiert werden. So werden in den Dunkelstunden „neutralweiße Lichtfarben“ und während des Tages „neutral- bis tageslichtweiße Lichtfarben für den indirekten, flächigen Beleuchtungsanteil bevorzugt. Wird zu der indirekten Beleuchtung ein flächiger Direktanteil zugeschaltet, so kann die Lichtfarbe dieses Anteils variabel zwischen den Standardlichtfarben „warmweiß“ bis „tageslichtweiß“ gewählt werden. Möchte man Besonderheiten des Raumes, wie Bilder, Pflanzen oder die eigentliche Sehaufgabe hervorheben, so wird bei Tag eine „neutralweiße“ und bei Nacht eine „warmweiße Lichtfarbe“ für die Akzentbeleuchtung gewünscht.

2. Zielsetzung

DIAL wollte herauszufinden, wie sich verschiedene Beleuchtungskonzepte (Lichtfarben- und Lichtstromverteilung) auf die Akzeptanz und das Wohlbefinden der im Büro arbeitenden Menschen auswirken. Der aktuelle Lichtfarbentrend der Lampenindustrie stellt den Planer vor immer neue Herausforderungen hinsichtlich seines Lichtkonzeptes. Wann und unter welchen Rahmenbedingungen sind eigentlich die verschiedensten Standardlichtfarben sinnvoll? Wie ist die ideale Aufteilung von Lichtstrom und somit Leuchtdichteverteilung im Büroraum? Welchen Einfluss hat die Tageszeit auf die Lichtfarbenpräferenz?

Darüber hinaus möchte DIAL einem seiner Unternehmensziele weiter gerecht werden, die Menschen für Licht zu sensibilisieren und dem Planer Regeln, fundierte Erkenntnisse und Argumente für die Umsetzung seiner Lichtplanungen liefern.

3. Versuchsaufbau und Methodik

Sämtliche Untersuchungen fanden in einem (Büro)-Versuchsraum im Maßstab 1:1 statt. Dieser Raum diente bereits vorigen DIAL Untersuchungen^{1/} und wurde gemäß den Projektanforderungen technisch komplett modifiziert. Neutrale Gestaltung in Bezug auf Möblierung und Leuchtendesign war notwendig, damit die Testpersonen möglichst designunabhängig urteilten. Zur weiteren Einrichtung gehören Bilder, Pflanzen, Schrank und Flipchart die als Rauminformationen im Gesichtsfeld der Testpersonen dienen. Die Testpersonen befanden sich also in einem völlig normalen und voll arbeitstauglichem Büroraum. Zwei, an der schmalen Raumseite angeordnete Fenster, simulieren den Tageslichteinfall auf die Arbeitsplätze. Während verschiedener Lichtsituationen wurden die Testpersonen nach Ihrem Wohlbefinden, in Abhängigkeit der eingestellten Lichtfarbe bei Erledigung einer normalen Bürotätigkeit, wie das Lesen vom Monitor und das Lesen von Papiervorlagen befragt.

Nachfolgende Abbildungen zeigen den beleuchtungstechnisch ausgerüsteten Versuchsraum.

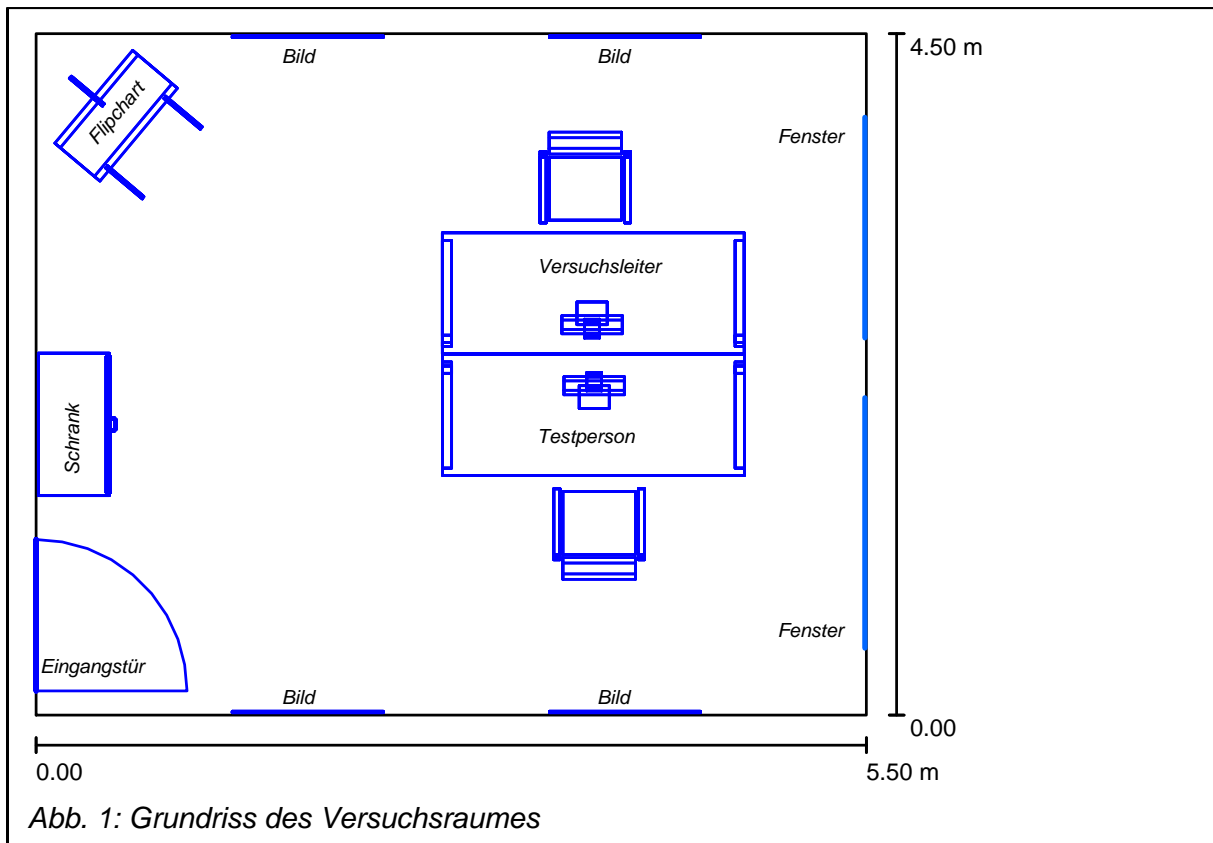


Abb. 2: Versuchsraum, mit Direkt- Indirektbeleuchtung, Tageslicht und Akzentuierung

4. Technische Realisierung:

Technische Voraussetzung zur Durchführung der Forschungsaufgaben war eine Beleuchtungsanlage mit leistungsstarkem Dynamikumfang hinsichtlich Lichtstrompakete, Lichtstromverteilung und Lichtfarbeneinstellung. Mit Hilfe der Leittechnik - Software B-CON und die damit verbundene, visuelle Anpassung an die Beleuchtungsanlage konnte jede eingesetzte Lampe mittels EIB-Technik auf einen beliebigen Lichtstromlevel gefahren werden. Somit war es möglich gespeicherte Lichtszenen abzurufen, manuell zu verändern, oder auch einfach mal eine neue Szene hinzuzufügen.

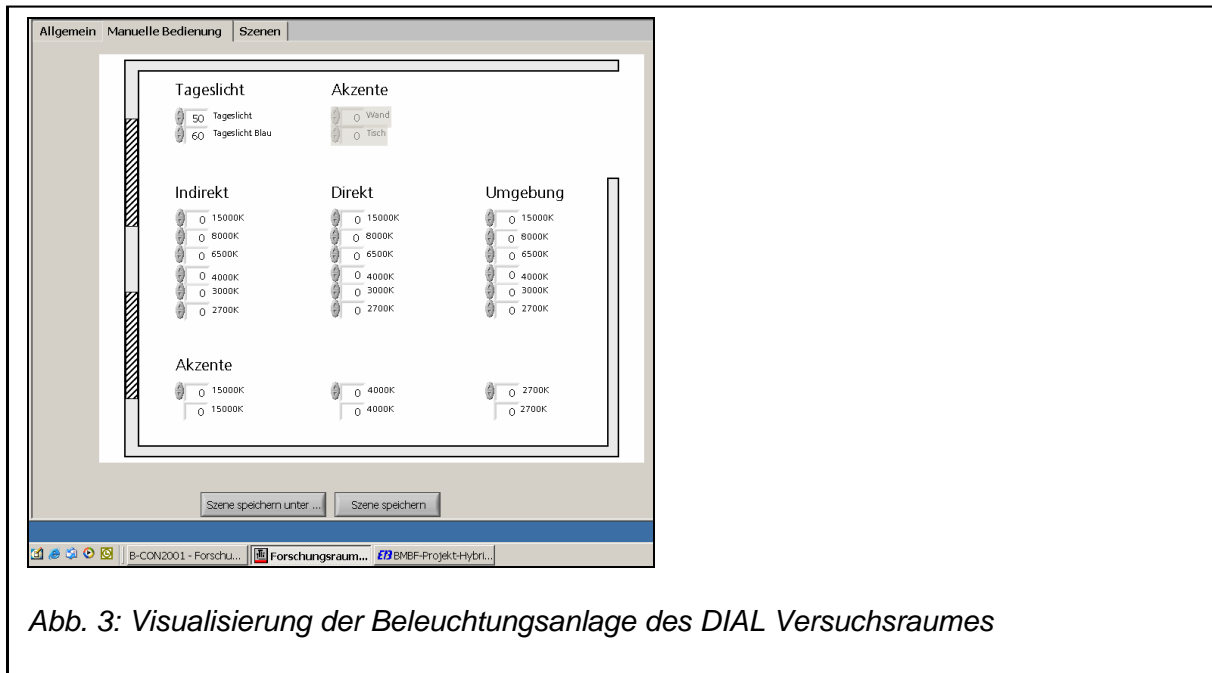


Abb. 3: Visualisierung der Beleuchtungsanlage des DIAL Versuchsraumes

Für die flächigen Anteile der allgemeinen Raumbelichtung wurde ein direkt/indirektes Beleuchtungskonzept bestehend aus 3 Lichtbändern mit je 2 verbundenen Leuchten realisiert. Lichtakzente mit deutlichem höherem Beleuchtungsniveau auf Raumbesonderheiten, oder der Sehaufrage lieferten fokussierbare Bühnenstrahler. Dadurch konnte das DIAL Forschungsteam auf alle Lichteinstellungen zur Bearbeitung der reagieren. In Zahlen ausgedrückt bedeutet das pro Lichtband und gesamter Akzentbeleuchtung:

- Indirektbeleuchtung, 20 x T16 Leuchtstofflampen freistrahrend (80 W und 54 W)
- Direktbeleuchtung, 12 x T16 Leuchtstofflampen hinter Reflektor (80 W und 54 W)
- 24 Bühnenstrahler „Selecon 650 W“ + Farbfilterrahmen (Akzentbeleuchtung)

Der Bereich der Lichtfarbenauswahl deckte damit das Angebot der am Markt verfügbaren Standardlichtfarben von T_{CCP} 2.700 K, 3.000 K, 4.000 K, 6.500 K, 8.000 K und 15.000 K im allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a 80 ab. Dank dieser leistungsstarken Bestückung waren Beleuchtungsstärken (blendfrei) von bis zu 2.500 lx je Lichtfarbe auf der horizontalen Nutzebene messbar. Speziell, auf das Glühlampenspektrum der Bühnenstrahler abgestimmte Farbfilterkombinationen ermöglichten die Akzentuierung in den Farbtemperaturen 2.700 K, 4.000 K und 15.000K. Eine Lampenleistung von 650 W je Strahler war notwendig, da nach Spektrumsumwandlung von Glühlampenlicht auf 15.000 K kaum noch Licht vorhanden ist. Dennoch gelang es auch hier Beleuchtungsstärken von bis zu 2.500 lx horizontal und vertikal zu erreichen.



Abb. 4: Bestückung Indirektbeleuchtung

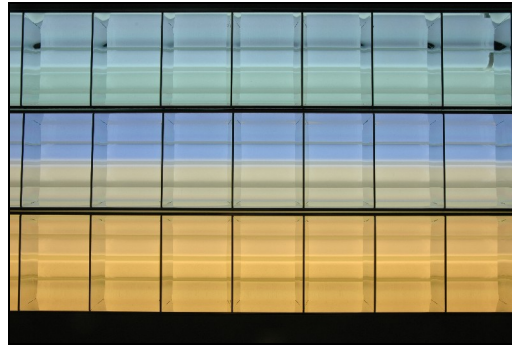


Abb. 5: Bestückung Direktbeleuchtung



Abb. 6: Akzentbeleuchtung
Selecon 650 W Strahler



Abb. 7: Strahler mit Filtervorsatz

5. Tageslichtsimulation

In die Untersuchungen fließt der Aspekt von Tageslicht bzw. Nacht und dessen Auswirkung auf die Akzeptanz der Testpersonen ein. Dazu verfügt der Forschungsraum über zwei Tageslichtsimulatoren, die unterschiedliche Tageslichtverhältnisse erzeugen können. Um der Realität eines nach Süden ausgerichteten Fensters näher zu kommen, sind diese zusätzlich mit Abblendrollos in Aluminium - Querlamellentechnik ausgestattet. Bei geschlossenem Rollo bekommt das gesamte Fenster die Anmutung eines blauen Himmels zur Mittagszeit mit einer Farbtemperatur von 15.000 K.

Anders als der Mensch es von der Natur aus gewohnt ist, waren die präsentierten Tageslichtstimmungen im Versuch nicht dynamisch, sondern statisch auf eine durchschnittliche Tageslichtsituation eingestellt. Beurteilungsschwankungen, bedingt durch eine Tageslichtdynamik, konnten durch diese Maßnahme ausgeschlossen werden. Wiederholte Vorabbefragungen ergaben eine positive und zudem reale Anmutung der Tageslichtsimulatoren. Bis heute (März 2007) empfinden 95% aller Besucher die Lichtwirkung der Simulatoren bei nahezu geschlossener Lamelle als real und glaubwürdig.

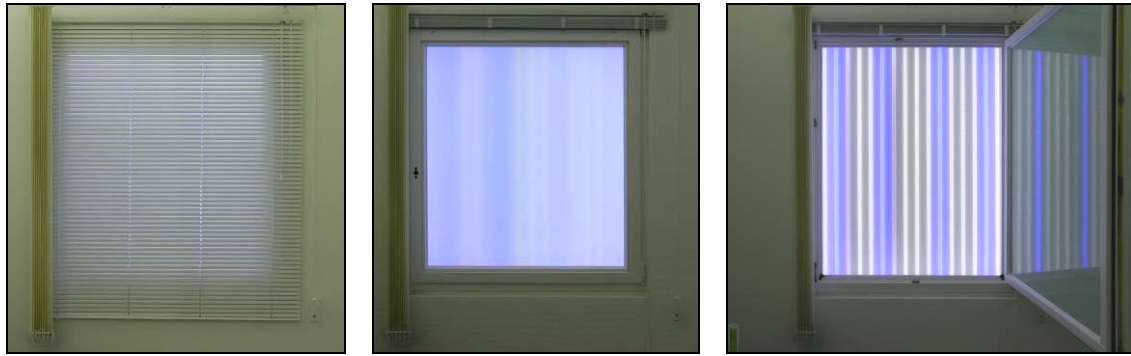


Abb. 8 – 10: Tageslichtsimulatoren
 von Links: Lamellenstellung im Versuch bei mittlerer Farbtemperatur von 15.000 K,
 M3 Diffusorfolie, 14 x T26 58W965 + 4 x T26 58WBlau je Simulator

6. Befragungs- und Versuchsmethodik:

Sämtliche Versuchsreihen wurden als Interviewmethode zwischen Testperson und Versuchsleiter durchgeführt. Der Versuchsleiter gab den Testpersonen eine kurze und neutrale Einweisung in die Thematik und begründete die Untersuchungsreihe, ohne dabei manipulierend zu wirken. Folgende Frage sollte dann rein subjektiv durch die Testperson beantwortet werden, die sich dafür entsprechend Zeit nehmen durften:

„Sie befinden sich in einem Büroraum und verrichten alltägliche Bürotätigkeit. Gezeigt werden Ihnen gleich verschiedene Lichtsituationen. Bewerten Sie bitte die Lichtsituation. Wie wohl fühlen Sie sich bei der eingestellten Lichtfarbe an Ihrem Arbeitsplatz? Verwenden Sie bitte die Beurteilungsskala von „wohl“ bis „unwohl“ und antworten Sie bitte in der Form:

Bei dieser Lichtfarbe fühle ich mich ...

... wohl

... eher wohl

... mittelmäßig / unentschieden

... eher unwohl

... unwohl

Die abgegebenen Urteile wurden vom Versuchsleiter direkt in das Notensystem „Note 1 = wohl“ bis „Note 5 = unwohl“ für die Testperson unbemerkt übersetzt und in eine Excel-Tabelle zur automatischen Auswertung eingetragen. In diesem Ablaufschema dauerte ein Befragungsdurchgang pro Testperson 1 bis 1½ Stunden. Statistisch randomisierte Lichtszenenfolgen während den Tag- oder Nachtsituationen waren eine Grundvoraussetzung für die Befragung der Testpersonen.

7. Ergebnisse

Eine 3 jährige Forschungsarbeit liefert eine übermäßige Vielfalt von Daten. Angefangen von ersten Machbarkeitstests, Vor- und Zwischenbefragungen, statistischen Validierungen bis hin zu endgültigen Endergebnissen. Um die Übersichtlichkeit und Lesbarkeit zu wahren, konzentrieren sich die folgenden Berichtspassagen nur auf die Darstellung und Diskussion der wichtigsten Projektergebnisse.

7.1 Direkt-Indirektbeleuchtung und bevorzugte Lichtfarben

Diese Untersuchung soll die Antwort auf eine offen Frage liefern. Besteht ein Zusammenhang zwischen präferierten Lichtfarbenkombinationen und Verteilungen unter Berücksichtigung von Tageslicht und dem Einfluss von akzentuiertem Licht und wie wirkt sich dieser weiterhin auf die Akzeptanz und damit auf das Wohlbefinden des Nutzer aus? Gemäß den Forschungsanforderungen wurde der Versuchsraum technisch modifiziert und Lichtsituationen für die Versuche definiert.

Forschungsanforderung	„Präferierte Lichtfarbenkombinationen bei Tageslicht und Akzentlicht“
Lichtfarben	flächige Beleuchtung: 2.700 K, 4.000 K, 15.000 K (erzeugt mit Standard T16 Leuchtstofflampen) Akzentlicht: 2.700 K, 4.000 K, 15.000 K (erzeugt über Farbfiltertransformation)
Farbwiedergabeindex	$R_a \geq 80$
Beleuchtungsstrategie	80:20 Direkt:Indirekt – Beleuchtung 20:80 Direkt:Indirekt – Beleuchtung Direktes- und Vertikales Akzentlicht
Beleuchtungsstärken	$E_{h,Mittel}$ 750 lx (ohne Tageslicht), $E_{h,Mittel}$ 1.000 lx (mit Tageslicht) auf der Schreibtischfläche Akzentlicht mit E_h 1.800 lx auf dem Schreibtisch Akzentlicht mit E_v 2.500 lx auf Rauminformationen
Tagsimulation	Farbtemperatur 15.000 K und mittlere Leuchtdichte von 500 cd/m^2 auf der Lamelle. $E_{h,Mittel}$ 250 lx auf dem Schreibtisch vor der Testperson
Anzahl Lichtszenen	27 Tagsituationen 27 Nachtsituationen
Statistik Testpersonen	10 Frauen 22 Männer
Monitoreinstellung	Farbtemperatur 9.300 K, Helligkeit 100%, 1280x1024, 75Hz und PDF Vorlage „DIAL aktuell “ (Monitor der Testperson)
<i>Tabelle 1: Versuchsparameter</i>	

Direkt [K] Lichtstrom	Lichtsituationen (graue Zellen) für die Befragung der Testpersonen bei Tag und Nacht									Akzent [K]
15.000			■			■			■	2.700
20%										4.000
15.000										15.000
15.000		■			■			■		2.700
50%		■			■			■		4.000
15.000										15.000
15.000										2.700
80%	■			■			■			4.000
4.000										15.000
20%										2.700
4.000		■			■			■		4.000
50%		■			■			■		15.000
4.000										2.700
80%										4.000
2.700										15.000
20%			■			■			■	2.700
2.700										4.000
50%		■			■			■		15.000
2.700	■			■			■			2.700
80%										4.000
Indirekt [K] Lichtstrom	15.000 20%	15.000 50%	15.000 80%	4.000 20%	4.000 50%	4.000 80%	2.700 20%	2.700 50%	2.700 80%	Indirekt [K] Lichtstrom

Abb. 11: Zusammenstellung der Lichtsituationen für Tag und Nacht

Sämtliche Lichtsituationen wurden statistisch vorab so ausgewählt, dass bei späterer Auswertung die Möglichkeit besteht, rein rechnerisch auf die Akzeptanzbewertung aller nicht gezeigten Lichtsituationen zu schließen. Diese Methode hatte auch den Vorteil, dass die Testpersonen nicht mit zu vielen Lichtsituationen überfordert wurden. Allerdings setzt diese Vorgehensweise auch die Kenntnis über die subjektive Hellempfindung und Farbempfindung voraus, da für eine Modellberechnung die einzelnen Empfindungen durch Zahlen kodiert werden müssen.

Gleichabständigkeit von Helligkeit und Farbtemperatur:

Vergleicht man eine Helligkeit, die durch eine Beleuchtungsstärke von 500 lx erzeugt wurde, mit einer durch 1.000 lx erzeugten, so impliziert der Zahlenwert der beschreibenden Größe Beleuchtungsstärke auch eine Linearität beim Helligkeitsempfinden. Der subjektive Helligkeitseindruck verhält sich jedoch ebenso wie viele andere Empfindungsgrößen (Schmerz, Lautstärke, ...) keineswegs linear, sondern lässt sich eher annähernd mit dem dekadischen Logarithmus beschreiben: Erst ab einer Erhöhung des Zahlenwertes einer photometrischen Größe (Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte) um das 7 bis 10-fache, verstärkt sich ein Helligkeitseindruck auf das Doppelte. Ähnlich lässt sich auch für die subjektive Farbempfindung verfahren, wenn man nach der merklich kühleren oder wärmeren Farbempfindung, ausgehend von einer Referenzlichtfarbe fragt. In Anlehnung an ein von der TU-Ilmenau aufgestelltes Gleichabständigkeitssystem zur subjektiven Beurteilung von Farbtemperaturen, wurden die für diese Untersuchung eingesetzten Lichtfarbenabstände ΔLFA auf eine einheitenlose numerische Skala umcodiert. Die Farbtemperaturen 2.700 K und 15.000 K der verwendeten Lampen grenzen dabei die Skala empfindungsgemäß nach unten (warm = -1) und nach oben (kühl = 1) ab.

Gleichabständigkeitssystem nach TU-Ilmenau

$\Delta u'v'$ zwischen 2.700 K und 3.000 K:	0,0133
$\Delta u'v'$ zwischen 2.700 K und 4.000 K:	0,0454
$\Delta u'v'$ zwischen 2.700 K und 6.500 K:	0,0876
$\Delta u'v'$ zwischen 2.700 K und 8.000 K:	0,1013
$\Delta u'v'$ zwischen 2.700 K und 15.000 K:	0,1291

Umrechnung für Lichtfarbenabstände ΔLFA :

$$\Delta LFA = \frac{2 \cdot \Delta u'v'}{0,1291}$$

Farbtemperatur	ΔLFA	Skalencode
2.700 [K]	0	-1
3.000 [K]	0,21	-0,79
4.000 [K]	0,7	-0,3
6.500 [K]	1,36	0,36
8.000 [K]	1,56	0,56
15.000 [K]	2	1

Tabelle 2: Kodierung de Farbtemperaturen

Statistisches Modell für Lichtsituationen bei Tag:

Sämtliche Beurteilungen wurden statistisch geprüft und die Prüfmenge von 32 Testpersonen als ausreichend eingestuft. Um ein orthogonales Design zu erhalten um damit die Einflüsse der Faktoren mit unterschiedlichen Maßeinheiten besser zu vergleichen, müssen die Einstellungen der Einflussfaktoren kodiert (in Tabelle 4 **fett** dargestellt) werden.

Mit Hilfe eines geeigneten statistischen Modells ist es möglich, zum Einen die beobachtete Durchschnittsnote einer Lichtsituation und zum Anderen eine Durchschnittsnotevorhersage für eine spezielle, nicht im Versuchsablauf praktisch gezeigten Lichtsituation zu bestimmen. Die Urteile von 32 Probanden für die Lichtsituationen bei Tag wurden gemittelt und an diese "Durchschnittsnote" ein lineares Modell in den Hauptfaktoren, 2-fach Interaktionen, quadratischen Termen und den zwei 3-fach Interaktionen "Akzent x Indirekt x Direkt" und "Lichtstrom x Direkt x Indirekt" angepasst. Dabei wurden nur die Faktoren in das Modell aufgenommen, die mindestens zum 5% Niveau signifikant waren. Hierzu ergab sich folgender Output:

	Koeffizienten-schätzer			p-Wert	Signifikanz Niveau
	Estimate	Std. Error	t Value	Pr(> t)	
Intercept	2.42445	0.09683	25.039	< 2e-16	0.001
Lichtstrom (Verteilung)	0.25837	0.05512	4.687	0.000142	0.001
Indirekt (Farbtemp.)	0.23586	0.04539	5.196	4.38e-05	0.001
Akzente (Farbtemp.)	0.16468	0.04539	3.628	0.001675	0.01
Indirekt ² (Farbtemp.)	0.49317	0.08767	5.625	1.66e-05	0.001
Akzent ² (Farbtemp.)	0.27098	0.08850	3.062	0.006156	0.01
Akzente: Indirekt:Direkt (Farbtemp.)	-0.14869	0.06415	-2.318	0.031177	0.05

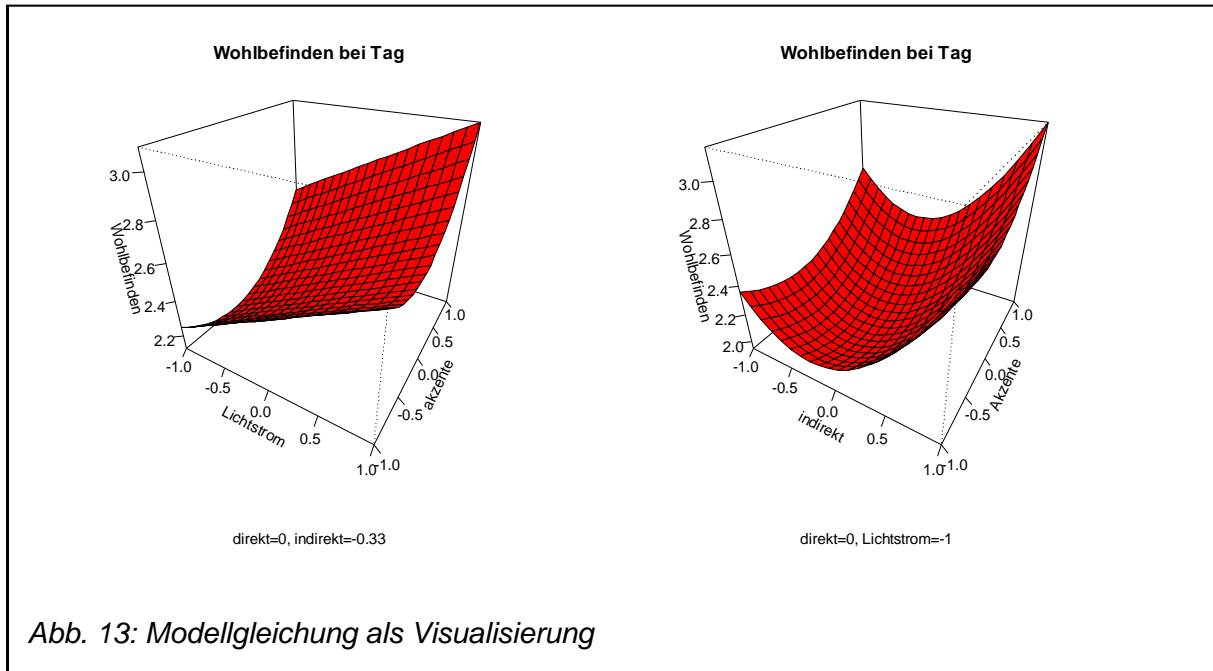
Tabelle 3: Koeffizientenermittlung für Einflussfaktor der Modellgleichung

Die Durchschnittsnote lässt sich nun wie folgt vorhersagen (auf zwei Nachkommastellen gerundet):

$$\text{Durchschnittsnote}_{\text{Tag}} = \left[2,42 + (0,26 \cdot \text{Lichtstrom}) + (0,24 \cdot \text{Indirekt}) + (0,16 \cdot \text{Akzente}) + (0,49 \cdot \text{Indirekt}^2) + (0,27 \cdot \text{Akzente}^2) - (0,15 \cdot \text{Akzente} \cdot \text{Direkt} \cdot \text{Indirekt}) \right]$$

Abb. 12: Modellgleichung für Durchschnittsnote bei Lichtsituationen für Tag

Die folgenden Beispielgrafiken visualisieren das gewonnene Modell. Dabei ist das durchschnittliche Wohlbefinden jeweils in Abhängigkeit von zwei Faktoren dargestellt. Die anderen zwei Faktoren sind fest. Für die Lesbarkeit der Datenmodelle ist eine 2-dimensionale Darstellung besser geeignet. Sämtliche Untersuchungsergebnisse werden im gesamten Berichtverlauf weiterhin als 2D-Darstellungen aufgeführt.



Kodierung: Farbtemperaturen [K] für Leuchtstofflampen und Akzentstrahler										
2.700	3.000	4.000	6.500	8.000	15000					
[-1]	[-0,79]	[-0,3]	[0,36]	[0,56]	[1]					
Kodierung: Lichtstromverteilung (Direkt / Indirekt)										
100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70	20:80	10:90	0:100
[1,66]	[1,33]	[1]	[0,66]	[0,33]	[0]	[-0,33]	[-0,66]	[-1]	[-1,33]	[-1,66]
<i>Tabelle 4: Modellkodierung der Einflussfaktoren</i>										

Setzt man die Kodierungen der Einflussfaktoren in die Modellgleichung ein, so lassen sich sowohl die beobachteten Durchschnittsnoten, als auch Vorhersagen berechnen, wie folgender Berechnungsauszug zeigt.

Licht-situation	Farbtemp .Akzent [K]	Farbtemp .Direkt [K]	Farbtemp .Indirekt [K]	Lichtstro m- verteilung	Mittelwert	fit	Vor. lwr	Vor. upr	Konf. lwr	Konf. upr
1	[-1]	[-1]	[-1]	[1]	3,12	3,20	2,73	3,66	2,95	3,44
2	[0]	[-1]	[-1]	[0]	2,69	2,62	2,18	3,06	2,45	2,80
3	[1]	[-1]	[-1]	[-1]	2,69	2,71	2,24	3,18	2,48	2,95

Tabelle 5: Beispielhafter Berechnungsauszug mittels Kodierung

Die erste Spalte der obigen Tabelle gibt die im Versuch gezeigte Lichtsituation bzw. Szenarionummer an. Danach folgen die zugehörigen Einstellungen für die Farbtemperaturen [K] der Akzente, der Direkt- und Indirektbeleuchtung und die Lichtstromverteilung in kodierter Form. Die Spalte Mittelwert gibt die beobachtete Durchschnittsnote wieder, fit ist der vorhergesagte Wert, Vor.lwr und Vor.upr bilden das 95%-Vorhersageintervall. Würde eine weitere Versuchsreihe mit wiederum 32 Probanden gefahren, dann sollten 95% der Durchschnittsnoten in den zugehörigen Vorhersageintervallen liegen. Das bedeutet, dass z.B. die bei Lichtsituation 2 vorhergesagte fit-Note 2,62 mit 95%-tiger Sicherheit zwischen 2,18 und 3,06 liegt. Bei einer Probandenanzahl, die Richtung unendlich geht, sollten 95% der Durchschnittsnoten im 95%-Konfidenzintervall liegen, welches durch Konf.lwr und Konf.upr gegeben ist. Bei den vorliegenden Versuchen liegen alle Durchschnittsnoten innerhalb der 95% Vorhersageintervalle und nur 8 außerhalb der 95%-Konfidenzintervalle. Auf eine vollständige Abhandlung des hier zu Grunde gelegten Modells, wird der weiteren Lesbarkeit halber verzichtet.

Statistisches Modell für Lichtsituationen bei Nacht

Wie für die Tageslichtsituationen wird auch für Lichtszenen bei Nacht ein geeignetes Modell ermittelt, mit dem die beobachteten Durchschnittsnoten, Vorhersagen und Optima berechnet werden können.

$$\text{DurschnittsnoteNacht} = \left[\begin{aligned} &2,65 + (0,28 \cdot \text{Lichstrom}) + (0,24 \cdot \text{Indirekt}) + (0,25 \cdot \text{Akzente}) \\ &+ (0,59 \cdot \text{Indirekt}^2) + (0,23 \cdot \text{Lichtstrom}^2) + (0,11 \cdot \text{Lichtstrom} \cdot \text{Akzente}) \\ &- (0,16 \cdot \text{Akzente} \cdot \text{Lichtstrom} \cdot \text{Direkt}) \end{aligned} \right]$$

Abb. 14: Modellgleichung für Durchschnittsnoten bei Lichtsituationen für Nacht

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Werte bei Nacht ist analog zu Tag und wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

An dieser Stelle sei auf den interessanten Aspekt einer, im Projektablauf entwickelten Modellvorhersage für Büro - Beleuchtungskonzepte hingewiesen!

Matrixdarstellung der beobachteten Durchschnittsnoten:

Die beiden folgenden Matrixdarstellungen (Abb. 15, 16) zeigen die beobachteten, also die praktisch gezeigten Lichtsituationen und vorhergesagten Durchschnittsnoten (fit) der 32 Testpersonen bei Tag und für Nacht.

Erläuterung der Matrixdarstellungen:

Die Spalte „Direkt [K] Lichtstrom“ gibt an, mit welcher ähnlichsten Farbtemperatur T_{CCP} und Dimmstufe [%] die Direkt - flächige Beleuchtung in eine Lichtsituation eingeht. Gleiches gilt für die untere, horizontale Zeile „Indirekt [K] Lichtstrom“ Mit der Beleuchtungsstrategie Direkt : Indirekt wird immer eine horizontale Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche von 750 lx erzeugt, aufgeteilt in die jeweiligen prozentualen Lichtstromanteile. Die Spalte „Akzent [K]“ zeigt die Auswahl einer von drei Akzentfarben in Kombination mit der Direkt : Indirekt Beleuchtung. Im Mittelteil der Matrix sind die beobachteten (**fett gedruckt**) und mittels Modellgleichung vorhergesagten Durchschnittsnoten (*kursiv und klein gedruckt*) eingetragen. Je schlechter die Benotung, desto rötlicher wird der Hintergrund. Verläuft der farbige Hintergrund ins Hellgrün, dann sind Beurteilungen positiver hinsichtlich Wohlbefinden ausgefallen.

Direkt [K] Lichtstrom	Beobachtete Durchschnittsnoten für Tag <i>Modellvorhersage der Durchschnittsnoten für Tag</i>									Akzent [K]
15.000 20%			3,15			2,20			2,38	2.700
			<i>2,91</i>			<i>2,10</i>			<i>2,35</i>	4.000
			<i>3,18</i>			<i>2,62</i>			<i>3,01</i>	15.000
15.000 50%		<i>3,41</i>			<i>2,46</i>			<i>2,64</i>		2.700
		3,17			2,36			2,61		4.000
		<i>3,44</i>			<i>2,88</i>			<i>3,27</i>		15.000
15.000 80%	<i>3,67</i>			<i>2,72</i>			<i>2,90</i>			2.700
	<i>3,43</i>			<i>2,62</i>			<i>2,87</i>			4.000
	3,70			3,14			3,52			15.000
4.000 20%			<i>2,96</i>			<i>2,26</i>		<i>2,57</i>		2.700
			<i>2,86</i>			<i>2,12</i>		<i>2,41</i>		4.000
			<i>3,38</i>			<i>2,56</i>		<i>2,81</i>		15.000
4.000 50%		3,22			2,52			2,83		2.700
		3,12			2,38			2,67		4.000
		3,63			2,82			3,07		15.000
4.000 80%	<i>3,47</i>			<i>2,78</i>			<i>3,09</i>			2.700
	<i>3,37</i>			<i>2,64</i>			<i>2,93</i>			4.000
	<i>3,89</i>			<i>3,08</i>			<i>3,33</i>			15.000
2.700 20%			<i>2,85</i>			<i>2,29</i>		<i>2,68</i>		2.700
			<i>2,83</i>			<i>2,13</i>		<i>2,44</i>		4.000
			3,48			2,53		2,71		15.000
2.700 50%		<i>3,11</i>			<i>2,55</i>			<i>2,94</i>		2.700
		3,08			2,39			2,70		4.000
		<i>3,74</i>			<i>2,79</i>			<i>2,97</i>		15.000
2.700 80%	3,37			2,81			3,20			2.700
	<i>3,34</i>			<i>2,64</i>			<i>2,96</i>			4.000
	4,00			<i>3,05</i>			<i>3,23</i>			15.000
Indirekt [K] Lichtstrom	15.000 20%	15.000 50%	15.000 80%	4.000 20%	4.000 50%	4.000 80%	2.700 20%	2.700 50%	2.700 80%	Indirekt [K] Lichtstrom

Abb. 15: Ergebnisse für Lichtsituationen am Tag

Ergebnisdiskussion für „Lichtsituationen mit Tageslicht“:

Die Ergebnisbetrachtung bezieht sich hier nur auf die farblich markierten Beleuchtungskombinationen. Zwischenwerte (z. B. für eine Farbtemperatur 3.850 K) (innerhalb der Kodierungsskala) lassen sich mit Hilfe der Modellgleichung in Kurvendiagrammen darstellen. Das Modell liefert dafür den formalen Kurvenzusammenhang zwischen den festen Stützstellen. Hierzu müssen die Gleichabständigkeiten der Farbtemperaturen durch weitere Kodierungen ergänzt werden. Betrachtet man nun zunächst die reinen Durchschnittsbenotungen in dieser Matrix, dann ist grundsätzlich zu beobachten, dass eine indirekte Beleuchtung mit einer ähnlichsten Farbtemperatur T_{CP} von 15.000 K keine Akzeptanz zeigt, unabhängig von der Wahl der direkten Komponente und der Akzentbeleuchtung.

Wird die indirekte Lichtfarbe wärmer, so werden die Noten tendenziell besser. Die Testpersonen vergaben hier für Lichtszenen mit einer indirekten Farbtemperatur von 4.000 K bei gleichzeitigem Lichtstromanteil $> 50\%$ und zusätzlichem Akzentlicht von 2.700 K oder 4.000 K die besten Noten. Hierbei hat die Wahl der direkten Farbtemperatur keinen entscheidenden Einfluss auf die Akzeptanz.

→ Die beste Akzeptanz bei Tageslicht erzeugen Lichtsituationen mit einem indirekten Lichtstromanteil von 80%, Akzentlicht mit 4.000 K in Kombination mit einem direkten Lichtstromanteil von 20%. Dabei spielt die Farbtemperatur des 20%-tigen direkten Lichtstromanteil keine Rolle. Zur Erinnerung: Die Aufteilung der Lichtstromanteile bei Tag führt zu einem Beleuchtungsniveau von $E_{h, \text{Mittel}} = 1.000 \text{ lx}$.

Direkt [K] Lichtstrom	Beobachtete Durchschnittsnoten für Nacht <i>Modellvorhersage der Durchschnittsnoten für Nacht</i>									Akzent [K]	
15.000										2.700	
			3,44				2,39			2,65	4.000
			3,43				2,52			2,86	15.000
20%			3,40				2,76			3,24	2.700
											4.000
			3,38				2,33			2,59	15.000
15.000											2.700
			3,44				2,54			2,88	4.000
			3,56				2,92			3,40	15.000
15.000											2.700
											4.000
											15.000
80%											2.700
											4.000
											15.000
15.000											2.700
											4.000
											15.000
80%											2.700
											4.000
											15.000
4.000											2.700
											4.000
											15.000
20%											2.700
											4.000
											15.000
4.000											2.700
											4.000
											15.000
50%											2.700
											4.000
											15.000
80%											2.700
											4.000
											15.000
4.000											2.700
											4.000
											15.000
80%											2.700
											4.000
											15.000
2.700											2.700
											4.000
											15.000
20%											2.700
											4.000
											15.000
4.000											2.700
											4.000
											15.000
50%											2.700
											4.000
											15.000
80%											2.700
											4.000
											15.000
2.700											2.700
											4.000
											15.000
20%											2.700
											4.000
											15.000
4.000											2.700
											4.000
											15.000
50%											2.700
											4.000
											15.000
80%											2.700
											4.000
											15.000
2.700											2.700
											4.000
											15.000
20%											2.700
											4.000
											15.000
4.000											2.700
											4.000
											15.000
50%											2.700
											4.000
											15.000
80%											2.700
											4.000
											15.000
Indirekt [K] Lichtstrom	15.000	15.000	15.000	4.000	4.000	4.000	2.700	2.700	2.700	Indirekt [K] Lichtstrom	
	20%										
	50%										
80%											
20%											
50%											
80%											
20%											
50%											
80%											

Abb. 16: Ergebnisse für Lichtsituationen bei Nacht

Ergebnisdiskussionen für „Lichtsituationen bei Nacht“

Im Vergleich zur vorigen Matrix mit Tageslicht ist hier bei Nacht der gleiche Trend der Urteilvergabe zu beobachten. Allerdings sind die Noten für die Lichtszenen durchweg schlechter, was auf den fehlenden Tageslichtanteil zurück zu führen ist. Die Testpersonen fühlten sich bei Lichtszenen mit einer indirekten Farbtemperatur von 4.000 K und einem Lichtstromanteil > 50%, unabhängig von der direkten Komponente, wohl. Dieses Wohlbefinden wird bei gleichzeitigem Akzentlicht von 2.700 K oder 4.000 K erzielt.

→ Die besten Akzeptanzurteile für eine Nachtszene erzeugt ein indirekter Lichtstromanteil $\geq 50\%$ mit 4.000 K, Akzentlicht mit 2.700 K und ein direkter Lichtstromanteil von $\leq 50\%$. Dabei spielt die Farbtemperatur des direkten Lichtstromanteils keine Rolle. Zur Erinnerung: Die Aufteilung der Lichtstromanteile bei Nacht führt zu einem Beleuchtungsniveau von $E_{h, \text{Mittel}} = 750 \text{ lx}$.






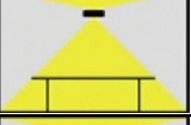



7.2 Einflüsse von Akzentbeleuchtung

Das eine zusätzliche Akzentuierung (Abb. 17) des Raumes die Nutzerakzeptanz steigert ist bereits in ^{1/1} „Licht und Mensch - Der Einfluss der Lichtverteilung im Raum auf die Akzeptanz des modernen Büroarbeitsplatzes“ bestätigt worden und wurde für dieses Projekt nicht mehr differenziert betrachtet.

Im Folgenden einige Passagen aus ^{1/1}:

„Die Attraktivität des Raumes dagegen bleibt von der Art der Grundbeleuchtung im Wesentlichen unbeeinflusst. Der Raum wird bei allen fünf Arten der Grundbeleuchtung vorwiegend als abweisend, monoton, unfreundlich und uninteressant bewertet. Eine zusätzliche Akzentbeleuchtung, insbesondere eine solche im Wandbereich, führt dazu, dass der Raum überwiegend als einladend, lebendig, freundlich und interessant beurteilt wird“.

„Die Art der Grundbeleuchtung ist sowohl für die aktivierende Wirkung als auch für das Wohlbefinden von untergeordneter Bedeutung. Unter direkter Beleuchtung wie auch unter indirekter Beleuchtung fallen die Beurteilungen überwiegend negativ aus. Entscheidend ist auch hier die zusätzliche Akzentbeleuchtung. Horizontale Akzente und in noch stärkerem Maße Akzente auf den Wandzonen nehmen positiven Einfluss auf das persönliche Wohlbefinden und die empfundene Aktivität“.

Persönliches Befinden: Wohlbefinden				
Akzentuierung Grund- beleuchtungsart				
	3,36	3,09	2,59	2,30
	3,32	2,95	2,68	2,32
	3,77	3,09	2,95	2,32
	3,18	2,93	2,57	2,23
	3,23	2,61	2,80	2,39

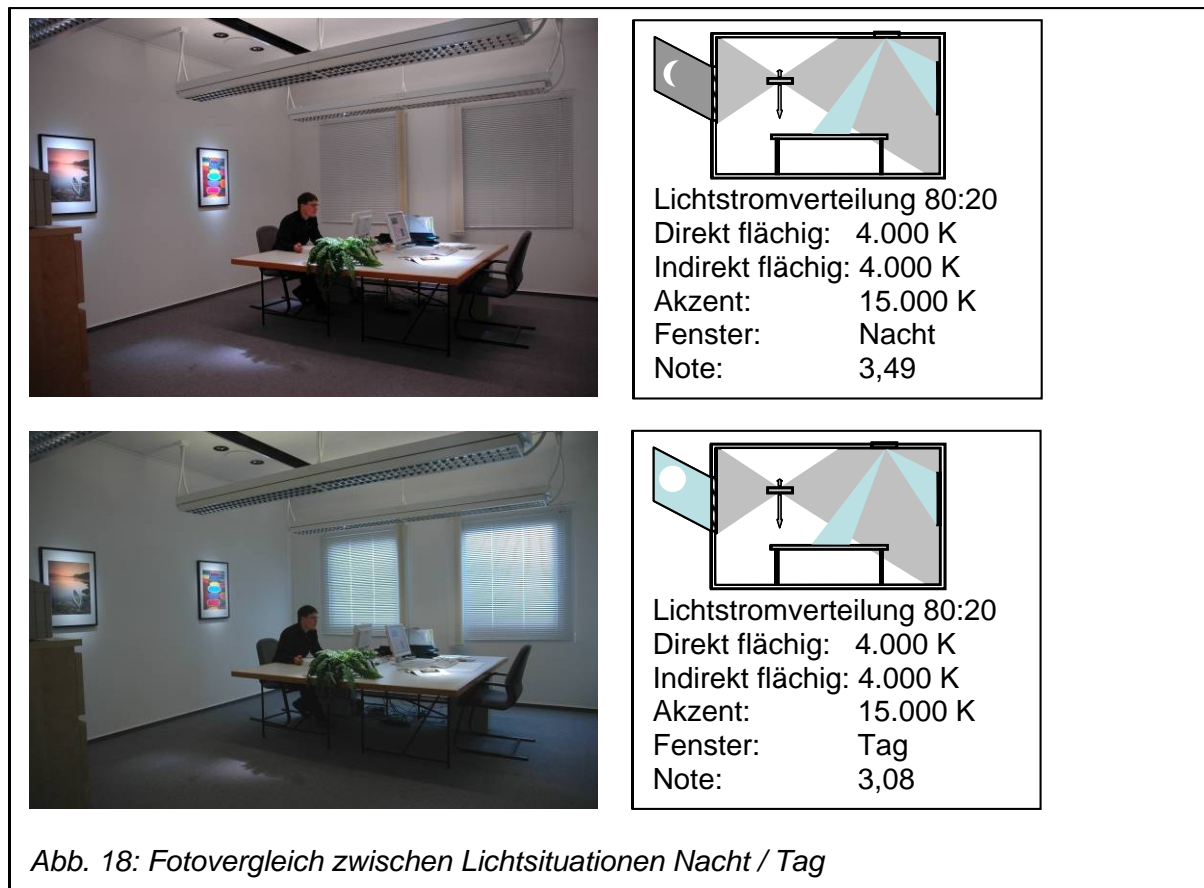
Direkt: 3.000 K
 Indirekt: 6.000 K
 Akzent: 2.700 K
 Fenster: Tag

Abb. 17: Wohlbefinden in Abhängigkeit verschiedener Grundbeleuchtungsarten mit zusätzlicher Akzentbeleuchtung^{1/1} bei Tageslicht. Lichtstromverteilung der Direkt-Indirektbeleuchtung entspricht einer 50:50 Situation.
 Es ist deutlich zu beobachten, dass eine zusätzliche Akzentbeleuchtung das Kriterium „Wohlbefinden“ bzw. „Akzeptanz“, in Bezug auf eine Direkt- Indirektbeleuchtung, um ca. eine ganze Note verbessert.

8. Einflüsse von Tageslicht

„Das Tageslicht ist für den Menschen von wesentlicher Bedeutung, da es einen großen Einfluss auf das Wohlbefinden hat. Unterschiedliche Lichtstärken und Lichtqualitäten stimulieren oder dämpfen die Leistung des Menschen und beeinflussen dadurch den Tagesrhythmus. Das Tageslicht informiert über unsere Außenwelt und das Wetter. Diese Wirkungen des Tageslichts sollen auch am Arbeitsplatz so weit wie möglich zum Tragen kommen“^[2].

In Anbetracht eines gesteigerten Energiebewusstseins der letzten Jahre wurden viele Normen, Regelungen und Empfehlungen an die Bedeutung des Tageslichtanteils angepasst. Dass sich der Mensch in Räumen mit zusätzlichem Tageslichtanteil wohler fühlt als ohne, ist zweifelsfrei bekannt. Genau dies wurde auch mit dieser Untersuchung bestätigt. Im direkten Vergleich der Ergebnisse aus den Tag-Nachtsituationen (Abb. 15 und 16) ist dies bei 86% aller untersuchten Lichtsituationen der Fall. In der Gesamtbetrachtung aller Durchschnittsnoten, auch die durch die Modellvorhersage ermittelten, sind sogar 88% aller Lichtsituationen mit Tageslichtanteil bzgl. der Nutzerakzeptanz besser. Notenverbesserungen von bis zu einer Notendifferenz von 0,5 sind durch Tageslichteinsatz möglich. Dabei spielt natürlich auch der Zugewinn an Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz eine Rolle.



9. Ableitung von Planungsregeln

Aus dem Gesamtüberblick der Untersuchungsergebnisse lassen sich für den Lichtplaner klare Leitgedanken und Planungsregeln für Beleuchtungsanlagen mit direkten und indirekten Lichtstromanteil, sowie Akzentuierung ableiten. Lichtfarben haben einen entscheidenden Einfluss auf Wohlbefinden und Akzeptanz. Werden Beleuchtungsanlagen nach diesen Planungsregeln umgesetzt, dann ist von den Nutzern eine positive Akzeptanzreaktion zu erwarten. Diese Planungsregeln resultieren aus Untersuchungen im Büroraum mit alltäglicher Büroarbeit. Bei der Anwendung auf anderen Arbeitsstätten, unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten ist von ähnlicher Nutzerakzeptanz auszugehen.

Planungsregeln:

1. Beste Akzeptanz von Bürobeleuchtung, bei:
 - direkter zu indirekter Beleuchtung im Verhältnis 20:80
 - globale indirekte, ähnlichste Farbtemperatur T_{CCP} 4.000 K bis 6.500 K
 - Akzentlicht 2.700 K (bei Nacht), Akzentlicht 4.000 K (bei Tag)
 - variabler direkte Farbtemperatur T_{CCP}
2. Für reine Indirektbeleuchtung Lichtfarben zwischen T_{CCP} 4.000 K und 6.500 K einsetzen. Sehr warme (T_{CCP} 2.700 K) und sehr kühle (T_{CCP} 15.000 K) Farbtemperaturen werden bei reiner Indirektbeleuchtung nicht akzeptiert.
3. Völlig unabhängig von der Tageszeit und der Variation verschiedener Beleuchtungsstrategien führt die indirekte Komponente mit T_{CCP} 15.000 K nur zu geringem Wohlbefinden.
4. Eine reine Direktbeleuchtung erzeugt nur sehr geringe Nutzerakzeptanz und ist für Bürobeleuchtung als Einzelkomponente nicht zu empfehlen.

Die nachfolgende Abbildung 19 stellt u. a. symbolisch die Zusammenstellung präferierter Beleuchtungskonzepte dar. Die aus dem gesamten DIAL Bericht bereits bekannte Farbkodierung, weist auf die Stufe der Akzeptanznote hin.

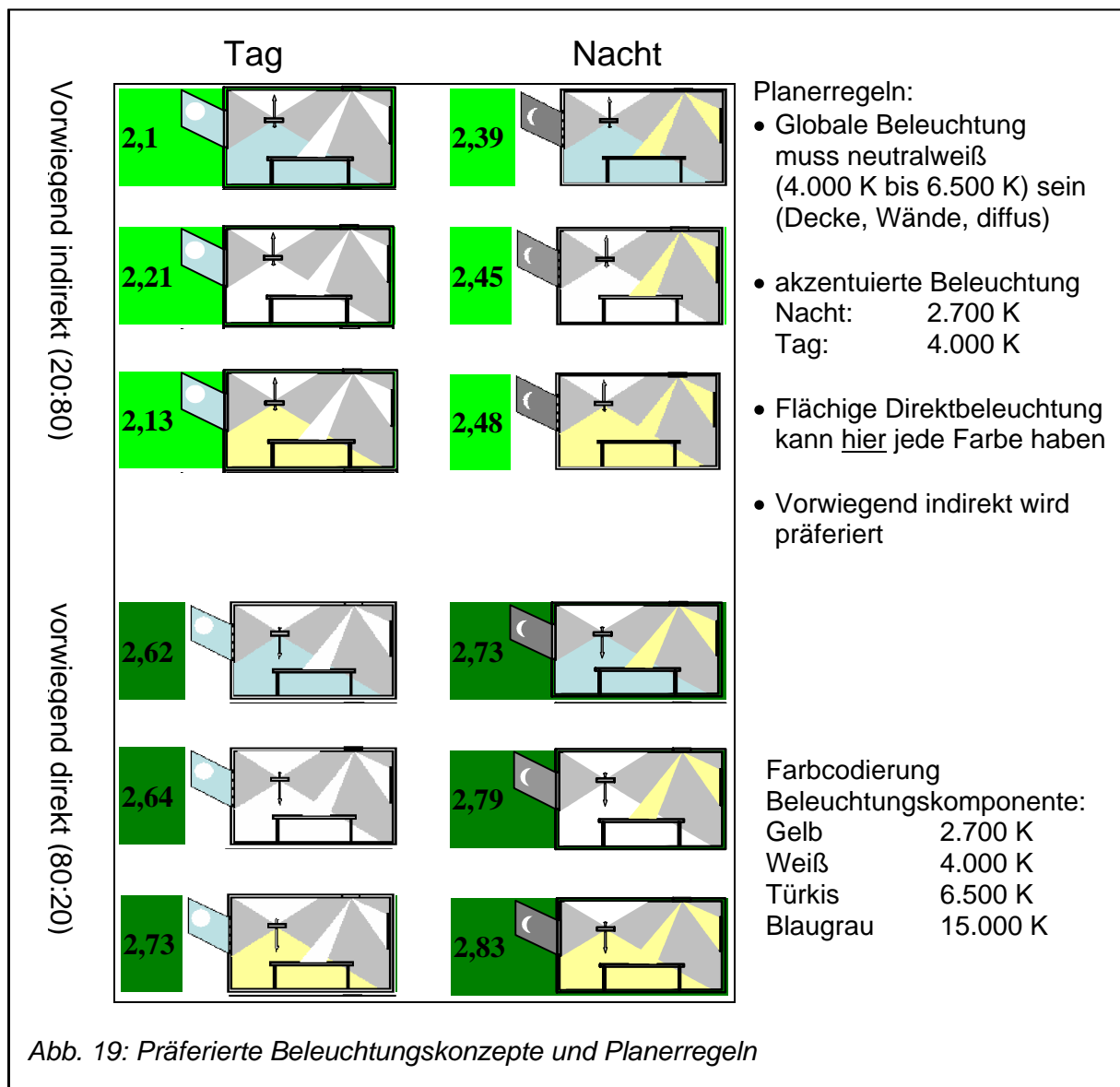


Abb. 19: Präferierte Beleuchtungskonzepte und Planerregeln

10. Ausblick

Die vorliegenden Untersuchungen beschränken sich auf die Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Lichtverteilungen mit differenzierten Lichtfarben auf das persönliche Befinden und somit auf die Nutzerakzeptanz im Büroraum. Die Ergebnisse bestätigten, dass für das Wohlbefinden bei der Arbeit und für die Tätigkeit am Büroarbeitsplatz unterschiedliche Beleuchtungsparameter verantwortlich sind und dabei insbesondere die Lichtfarbenverteilung sowie eine räumliche Differenzierung der Beleuchtung eine wichtige Rolle spielt. Ebenso wurde gezeigt, dass der Tageslichteinfluss eine nicht zu unterschätzende Größe bei der Lichtplanung ist. Sowohl hinsichtlich der Akzeptanz, als auch in Bezug auf die aktuelle Energiebedarfsdiskussion. Für weiterführende Untersuchungen zur Thematik „Licht und Mensch“ stellt sich die Frage, welche Rolle weitere Beleuchtungsparameter spielen, die in der vorliegenden Untersuchung unberücksichtigt blieben.

Dazu gehören

- Langzeitbetrachtung im Feld
- Tageslichtdynamik
- Persönliches Leistungsniveau
- Medizinische Betrachtungsweise
- Zukünftige Lichttechnologien

Diese Parameter sind im Rahmen der Fragestellung nach optimalen Beleuchtungsbedingungen in Arbeitsräumen von großem aktuellem Interesse und für Lichtplaner von großer Bedeutung, da sich neue Planungsansätze ergeben. Außerdem besteht dringender Bedarf an gesicherten Argumenten und geeigneten Richtlinien für bessere, den tatsächlichen Bedürfnissen der Menschen entsprechende Beleuchtungslösungen.

4.7.4 Anhang

Literaturverzeichnis:

^{/1/} Licht und Mensch - Der Einfluss der Lichtverteilung im Raum auf die Akzeptanz des modernen Büroarbeitsplatzes, DIAL im Oktober 2003

^{/2/} Sonnenschutz im Büro; Hilfen für die Auswahl von geeigneten Blend- und Wärmeschutzvorrichtungen an Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen BGI 827

DIAL Forschungsteam:

Dipl.-Ing. Dieter Polle (Geschäftsführung)

Dipl.-Ing. Gunnar Gehlfeldt (Team Licht)

Dipl.-Ing. Andreas Picklein (Team Licht)

Dipl.-Statistikerin Corinna Auer (Universität Dortmund)