

# Farblichtstudie

**Beleuchtung mit gesteuertem Farblicht -  
Untersuchung und Optimierung von  
Systemen zur Farblichtsteuerung**

bocom  
Lichttechnik

Energiespar-Technologien GmbH

[www.bocom-farblicht.de](http://www.bocom-farblicht.de)

in Kooperation mit:

FACH  
Hochschule Aachen

Solar-Institut Jülich

## Beleuchtung mit gesteuertem Farblicht - Untersuchung und Optimierung von Systemen zur Farblichtsteuerung

<b>Antragsteller:</b>	Prof. Dr. Klemens Schwarzer Fachhochschule Aachen Solar-Institut Jülich Heinrich-Mußmann-Straße 5, 52428 Jülich
<b>Kooperationspartner:</b>	Fa Bocom GmbH Geschäftsleitung: Bosco Papric Wankelstraße 13, 41352 Korschenbroich <a href="http://www.bocom-energy.de">www.bocom-energy.de</a>
<b>Laufzeit:</b>	01.10.2003 - 30.09.2005
<b>Autoren:</b>	Prof. Dr. Klemens Schwarzer Dr. Joachim Götsche Dipl.-Ing. Sabine Jellinghaus

Gefördert durch: NRW Forschungsförderung im TRAFO - Programm

Jülich, März 2006

0. Inhaltsverzeichnis	3
1. Hintergrund	4
1.1 Entwicklung der künstlichen Beleuchtung	4
1.2 Qualität des Tageslichts	5
1.3 Ausgangslage für das Forschungsvorhaben	5
2. F + E -Aufgabe und Zielsetzung	7
2.1 Technische Entwicklung	7
2.2 Nutzerakzeptanzuntersuchung	7
2.3 Empfehlungskatalog für Steuerstrategie	8
2.4 Umsetzung	8
3. Projektablauf	9
3.1 Projektstruktur	9
3.2 Entwicklung und Produktion der Prototypen	10
3.3 Erstellung einer Datenbank zur Regelung der Lichtszenarien	14
3.4 Planung und Vorbereitung der Nutzer-Befragungen	16
3.5 Einbau und Betrieb der Prototypen	18
3.6 Betreuung der fest installierten Sensorik u. der zentralen Datenerfassung	18
3.7 Durchführung der Nutzerakzeptanzuntersuchung	19
3.8 Durchführung von temporären Messungen der technischen Größen	21
3.9 Begleitende und abschließende Auswertung	22
3.10 Ableitung eines Empfehlungskataloges für Farblichtregelungen	24
3.11 Transfer in die Partnerunternehmen	24
3.12 Präsentation und Veröffentlichungen in breiter Fachöffentlichkeit	25
4. Ergebnisse	26
4.1 Materialauswahl und Leuchtendesign	26
4.2 Nutzerbefragungen	26
4.3 Empfehlungskatalog	32
5. Diskussion	33
6. Ausblick	34
7. Summary	34
8. Danksagung	34
9. Quellenverzeichnis	35

## 1. Hintergrund

### 1. Hintergrund

Seit etwa 100 Jahren steht den Menschen elektrisches Licht zur Verfügung. Arbeitswelt und Baugeschichte wurden durch diese technische Innovation maßgeblich bestimmt. Büroräume entstanden, deren Arbeitsplätze häufig fast ausschließlich mit künstlichem Licht beleuchtet werden; der Anteil der Tageslichtversorgung ist gering, obwohl das Tageslicht mit seinen spezifischen Eigenschaften für den Menschen eine wichtige Bedeutung besitzt. Sie geht über die reine Sehleistung weit hinaus und gewinnt erst in den letzten Jahren verstärkt die notwendige Aufmerksamkeit. Forschungsarbeiten mit künstlicher Beleuchtung belegen den großen Einfluss, den die Beleuchtung auf den Nutzer hat.

#### 1.1 Entwicklung der künstlichen Beleuchtung

Die Beleuchtung mit künstlichem Licht ist eine sehr gut dokumentierte Planungsaufgabe. Normen [DIN 5035, DIN EN 12464], Richtlinien [ASR] und zahlreiche Planungsunterlagen [FGL] geben Mindeststandards für die Beleuchtung vor und schärfen das Bewusstsein für qualitativ hochwertige Beleuchtungen. Die Entwicklungstendenzen verfolgen neben einer steigenden Energieeffizienz vor allem eine Qualitätsverbesserung und zunehmende Variabilität des Kunstlichtes an.

Studien zur Lichtverteilung und Gleichmäßigkeit zeigen, dass eine Variabilität dieses Parameters überaus angenehm

für den Nutzer ist und sich positiv auf die Sehleistung und das Wohlbefinden auswirkt. Diese Variabilität kann beispielsweise in der Aufteilung der Beleuchtung in direkte und indirekte Anteile mit veränderbarem Lichtstromanteil bestehen. So können sehr unterschiedliche Lichtstimmungen erzeugt werden [Fleischer] [DIAL]. Hier zeigt sich eine Analogie zum Tagesgang der natürlichen Beleuchtung mit seinen sehr differenzierten Lichtstimmungen.

Das Beleuchtungsstärkeniveau steht ebenfalls häufig zur Diskussion. Dabei geht es um die deutliche Erhöhung der Nennbeleuchtungsstärken. Das menschliche Auge ist an Beleuchtungsstärken am Tage im Freien von ca. 10.000 lx bis 100.000 lx gewöhnt, so dass eine Erhöhung die Anpassung an die Außenbeleuchtungsstärke darstellen wird [Sauer]. Die Entdeckung eines nicht visuellen Rezeptors im Auge mit hoher Sensibilitätsschwelle hat hier erst in den letzten Jahren neue Fragestellungen aufgeworfen [Gall].

Auch für die Lichtfarbe und die Farbwiedergabe gibt die Normung [DIN 5035] Vorgaben, die sich an den technischen Möglichkeiten der standardmäßige Leuchtstofflampen orientiert. Ein herkömmliches Bandenspektrum erzeugt zwar insgesamt eine weiße Farbe unterscheidet sich aber im Detail vom Tageslicht. Dem Kunstlicht fehlen zumeist wesentliche Farbanteile, was zu falschen Farbeindrücken führen kann (siehe Bild 1). Diesem Defizit wirken die so genannte Vollspektrumlampen [Truelight, Philips] entgegen.

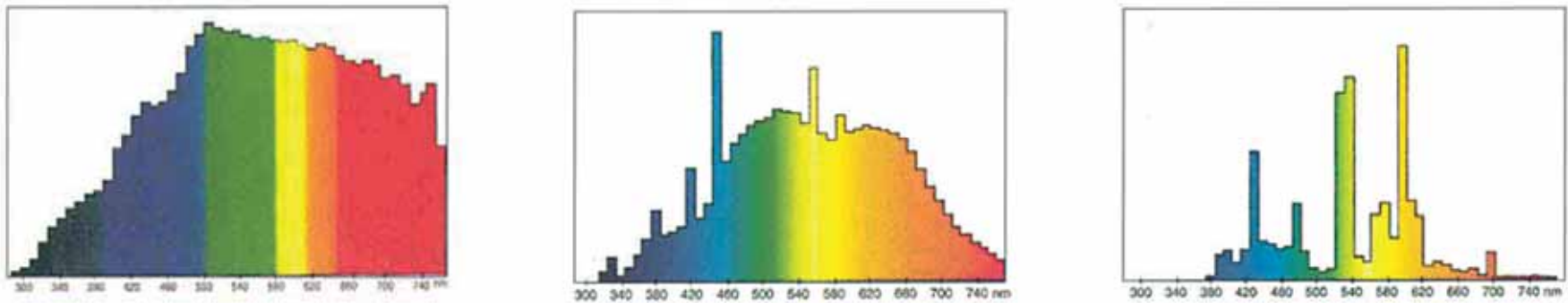


Bild 1: Qualitativer Vergleich der Spektren verschiedener Lichtquellen

## 1.2 Qualität des Tageslichts

Die grundlegende Bedeutung des Tageslichtes als Lichtquelle ergibt sich zunächst daraus, dass das menschliche Auge durch Evolution an die spezifischen Eigenschaften des Sonnenlichtes angepasst ist. Aber nicht nur die Sehleistung wird durch Tageslicht bestimmt. Der Tages- und auch Jahresrhythmus des Menschen wird bestimmt durch den Tagesgang des Lichtes und die Jahreszeiten. Diese Schlaf-, Wach- und andere Körperrhythmen greifen tief in die menschliche Physiologie ein und sind durch die Tageslichtzyklen getaktet. [Sauer] [Ehrenstein]. Der enge Zusammenhang von Lichttechnik und Gesundheit wird gemeinsam von Spezialisten beider Fachgebiete unter dem Begriff der Licht-Ergonomie wissenschaftlich diskutiert [Kaase].

Die positive Wirkung von Tageslichtbeleuchtung auf die Nutzer von Gebäuden wurde bereits in mehreren Studien belegt. Die zweijährige, amerikanische Studie "Daylight-

Schools" von 1996, konnte belegen, dass Schüler in Tageslichtklassenzimmern physisch und intellektuell der Vergleichsgruppe überlegen waren [Nicklas]. Eine weitere amerikanische Studie nimmt eine wirtschaftliche Betrachtung für Gewerbebauten vor. Dabei wurden Investitionskosten für eine Tageslichtbeleuchtung, reduzierte Betriebskosten für Kunstlicht und die Reduktion der krankheitsbedingten Personalkosten sowie die Steigerung der Leistungsfähigkeit des Personals mit einbezogen. Einer einmaligen Investition von 2.000.000 Dollar stand dabei eine jährliche Einsparung von 5.500.000 Dollar entgegen [Romm].

## 1.3 Ausgangslage für das Forschungsvorhaben

Ziel der Entwicklung muss es sein, Menschen in Gebäuden ein optimales Lichtklima zu verschaffen. Die unmittelbare und mittelbare Nutzung des Tageslichts selbst sollte dabei Vorrang haben. Aber auch dort wo räumlich oder zeitlich das Tageslicht nicht zur Verfügung steht, kann das

## 1. Hintergrund

Kunstlicht die wesentlichen Qualitäten des Tageslichtes nachempfinden. Zu diesen wichtigen und in der Zukunft unabdingbaren Qualitätsparametern der Beleuchtung gehören als wichtigste die Beleuchtungsstärke, die Leuchtdichteverteilungen, die spektrale Verteilung sowie die absolute Lichtfarbe. Neben der Betrachtung der Absolutwerte dieser Parameter ist aber vor allem auch der Tagesgang der Parameter eine Besonderheit des Tageslichtes. Die Veränderung des Tageslichtes über den Tag, aber auch die aktuelle Wahrnehmung der Witterung sind besonders ausschlaggebend für das Wohlbefinden. Durch die Tagesrhythmik von Lichtstärke und Lichtfarbe werden Leistungsphasen unterstützt und Regenerationsphasen des Menschen effektiver.

Eine Variation von Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe durch die künstliche Beleuchtung ist heute technisch umsetzbar und inzwischen am Markt verfügbar [iguzzini, Osram, Ross]. Diese Systeme bieten dem Nutzer derzeit verschiedene manuell angesteuerte Einstellungen zur Auswahl.

Aufgabe dieses Forschungsprojektes ist es, Beleuchtungen mit gesteuertem Farblicht technisch zu optimieren, die Lichtvariationen auf ihre Akzeptanz hin zu untersuchen und Empfehlungen für eine Steuerung zu entwickeln, um eine breite und schnelle Umsetzung in den Standard der Beleuchtungstechnik zu unterstützen.

## 2. F + E -Aufgabe und Zielsetzung

Übergeordnetes Ziel dieses Vorhabens ist es, die Beleuchtungsstandards zu verbessern hin zu einem ergonomischen Lichtklima. Konkret wird dies realisiert durch die Entwicklung eines Leuchtenprototypen für dynamisches Kunstlicht und die Untersuchung und Optimierung dieser Beleuchtungsanlage. Bisher offene und im Rahmen der Forschung zu beantwortende Fragen umfassen dabei vorrangig vier Aspekte:

- Materialauswahl und Leuchtendesign
- Lichttechnische Messungen
- Akzeptanzuntersuchung der Farbvariationen
- Empfehlungskatalog für Steuerstrategie

### 2.1 Technische Entwicklung

Bei der Entwicklung des Leuchtenprototyps mit qualitativ hochwertigen, veränderbaren Lichtfarben sind im Vergleich zu standardmäßigen Leuchten besondere Anforderungen zu stellen. Für diese Aspekte der Leuchte sind Lösungen zu entwickeln, und exemplarisch ist ein Prototyp zu erstellen und zu optimieren. Dazu gehört die Auswahl der Leuchtmittel, die idealerweise aus einer Kombination verschiedener Leuchtstofflampen und LED besteht. Aus der Kombination verschiedener Lampen resultieren besondere technische Anforderungen an das Leuchtendesign und eine gute Mischung des Lichts aus den verschiedenen Quellen. Und ein weiterer wesentlicher Bestandteil ist die Ansteuerung der gesamten Leuchte sowie die internen Steuerung der Einzellampen.

Auf dem Gebiet der Elektrotechnik in der Gebäudeleittechnik ist das Partnerunternehmen im Projekt, die Fa. Bocom aus Korschenbroich beheimatet. Erste Vorläufer von Leuchten mit verschiedenen Farbeinstellungen wurden hier bereits entwickelt, die jedoch ausschließlich zu dekorativen Zwecken eingesetzt wurden. Die Anwendung mit ergonomischer Zielsetzung steht bisher aus und stellt eine Leistungserweiterung für das Unternehmen dar.

### 2.2 Nutzerakzeptanzuntersuchung

Das Hauptkriterium für die Farblichtsteuerung wird die Bewertung durch die Nutzer und deren Leistungsfähigkeit sein. Nur wenn die technisch möglichen Variationen der Beleuchtung von den späteren Nutzern wahrgenommen und akzeptiert werden, ist der Einsatz der Systeme gerechtfertigt. Die Studie soll belegen, dass unterschiedliche Einstellungen unterschiedlich erlebt werden, und dass die Bewertungen zeitlich veränderlich sind. Denn diese Daten sind Ausgangspunkt für eine Steuerstrategie. Die positive Wirkung verschiedener Lichtfarben an industriellen Nachtschicht-Arbeitsplätzen konnte bereits in Studien belegt werden [Boyce] [Guth]. Die besonderen Anforderungen an tagsüber genutzte Büroarbeitsplätze mit und ohne Außenlichtbezug stehen im Focus dieser Forschungsarbeit. Die Untersuchung wird durch Befragungen von Testpersonen - in dem Versuchsraum durchge-

führt, in dem der Beleuchtungsprototyp installiert ist. Erfahrungen in der Planung und Durchführung von Nutzerakzeptanzuntersuchungen hat das Solar-Institut Jülich in einem voran gegangenen Forschungsprojekt erfolgreich gesammelt [Schwarzer].

### **2.3 Empfehlungskatalog für Steuerstrategie**

Die zentrale Fragestellung des Projektes zielt auf die idealen Regelstrategien ab. Aufgabe ist es, funktionsfähige und erprobte Standards für eine breite Anwendung zu etablieren. Ausgangspunkt hierfür sind die Ergebnisse der Nutzerakzeptanzuntersuchung, in der zeitabhängige Präferenzen bestimmter Beleuchtungseinstellungen ermittelt werden. Ein weiterer Aspekt der Steuerung von Beleuchtungsanlagen ist immer auch die Art der Bedienung und des Nutzereingriffs. Hier liegt generell ein Schlüssel zur Akzeptanz von Anlagen, die gesteuert Parameter des Raumklimas verändern [Gött-sche]. Durch den Einsatz von Beleuchtungen mit gesteuertem Farblicht in typischen Büroräumen werden optimale Steuerungsalgorithmen entwickelt, die unmittelbar zu neuen Steuereinheiten für Beleuchtung führen werden.

### **2.4 Umsetzung**

Mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes werden die Grundlagen geschaffen, um die Beleuchtung mit künstlichem Licht in einem wichtigen Aspekt zu optimieren, indem Lichtfarbe und Beleuchtungsstärke der Beleuchtung - ähnlich dem Tageslicht - variiert werden. Dies wird zu ergonomischen Arbeitsplätzen mit gutem Lichtklima führen und auch wirtschaftlich durchsetzbar sein.

Der Projektpartner bocom GmbH wird die Ergebnisse des Forschungsvorhabens direkt in ein innovatives Produkt umsetzen. Damit werden neben der Veröffentlichung der Forschungserkenntnisse auch die konkreten Erkenntnisse in Form funktionsfähiger Produkte einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht und zur Anwendung zur Verfügung gestellt.



### 3. Projekttablauf

#### 3.1 Projektstruktur

Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Untersuchung von Beleuchtungsanlagen mit geregelter Farblicht und die Entwicklung eines Empfehlungskataloges für Farblichtbeleuchtung, um funktionsfähige und erprobte Standards für eine breite Anwendung zu etablieren. Als Methode wird dafür der Einsatz von Prototypen in realen Büroräumen und deren wissenschaftliche Untersuchung mit iterativen Optimierungsschritten gewählt.

In die halbjährige Vorbereitungsphase war zum einen die Entwicklung und Fertigung der Prototypen mit der Auswahl der technischen Komponenten, wie Lampen, elektronische Komponenten und Diffusormaterialien in enger Kooperation mit dem Partnerunternehmen bocom GmbH vorgesehen. Eine erste Ideenskizze für die Umsetzung zeigt Bild 2.

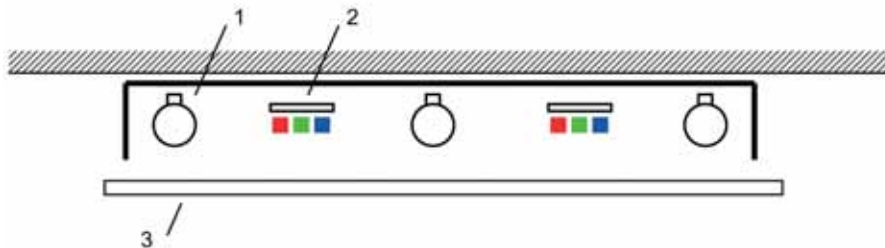


Bild 2: Ideenskizze für die Leuchtdecke im Schnitt

- 1: Vollspektrum-Leuchtstofflampe
- 2: LED-Paneel zur Farbbeimischung
- 3: Diffusor zur Farbmischung

Projektstruktur		
Phase I Vorbereitung	1	Entwicklung und Produktion der Prototypen
	2	Erstellung einer Datenbank zur Regelung der Lichtszenarien
	3	Planung und Vorbereitung der wissenschaftlichen Untersuchung
Phase II Betrieb und Wissenschaftliche Untersuchung	4	Einbau und Betrieb der Prototypen
	5	Betreuung der fest installierten Sensorik und der zentralen Datenerfassung
	6	Durchführung der Nutzerakzeptanzuntersuchung
	7	Durchführung von temporären Messungen der technischen Größen
Phase III Auswertung	8	Begleitende und abschließende Auswertung
	9	Ableitung eines Empfehlungskataloges für Farblichtregelungen
	10	Transfer in die Partnerunternehmen
	11	Präsentation und Veröffentlichungen in breiter Fachöffentlichkeit

Als weitere vorbereitende Schritte waren die Entwicklung einer Datenbank zur Beleuchtungssteuerung und Regelung aufgebaut und die Datenbasis mit verschiedenen Tagesgängen des Lichtes geplant. Parallel war das Programm der wissenschaftlichen Untersuchung im Detail vorzubereiten. Die Messgrößen umfassen folgende Daten:

- Beleuchtungsstärke
- Leuchtdichten
- Spektren des Lichts
- Nutzerakzeptanz
- aktuelle Klimadaten
- Stromverbrauch der Beleuchtung

### 3. Projekttablauf

Während der Hauptphase des Projektes waren die Prototypen ein Jahr lang In Situ zu betreiben und zu untersuchen. Dazu war geplant, drei Leuchtdecken in Räumen des SJJ und/oder der Partnerfirma bocom GmbH in Korschenbroich einzusetzen und verschiedene Regelstrategien zeitgleich zu untersuchen. Der Arbeitsumfang dieser Phase gliedert sich in den Einbau und die Betreuung der Beleuchtungsanlagen selbst, was auch den Austausch und ggf. die Reparatur von Komponenten umfasst. Dieser Punkt wurde schwerpunktmäßig vom Projektpartner übernommen. Als weiterer Punkt war die Pflege der zentralen Messwerterfassung und Messdatenbank sowie die Durchführung der temporären Messung technischer Parameter (s.o.) und der Nutzerakzeptanzuntersuchungen vorgesehen. Diese Nutzerbefragung wurden mit Unterstützung eines Beratungsunternehmens geplant, um ein konsistentes Vorgehen sicher zu stellen.

Mit einer zeitlichen Überschneidung sollte die abschließende Phase der Auswertung und Verarbeitung der Messergebnisse und Entwicklungen beginnen. Zunächst waren die technischen Daten der Untersuchungen auszuwerten. Aus diesen Ergebnissen war der Empfehlungskatalog für den Einsatz und Betrieb von Farblichtsystemen zu entwickeln. Durch die geplanten Arbeitstreffen und gemeinsame Arbeitsschritte wurde bereits während der Projektlaufzeit ein Transfer der Erfahrungen und der (Zwischen-) Ergebnisse sichergestellt. Das Projektschema schloss ab mit der Erstellung der Berichte und der Veröffentlichung und Präsentation der Ergebnisse.

### 3.2 Entwicklung und Produktion der Prototypen

Gemeinsam mit dem Projektpartner, der Fa. Bocom aus Korschenbroich wurde ein erster Prototyp entwickelt. Er basiert auf einem Vorgängermodell, das vom Partnerunternehmen mit anderer lichttechnischer Ausstattung bereits eingesetzt wurde. Dieses Modell wurde ergänzt um ein Diffusormaterial und die Ausstattung mit Leuchtmitteln. Für die Diffusorauswahl wurden verschiedene Messreihen im Labor an der Fachhochschule Aachen durchgeführt. Insbesondere wurden die Transmission und die Lichtstreuungseigenschaften verschiedener Materialien bestimmt. Der Versuchsaufbau ist Bild 3 zu entnehmen.

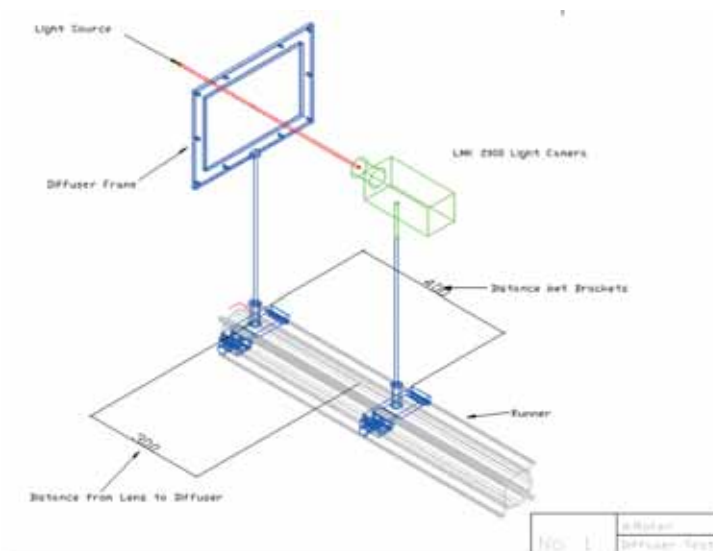


Bild 3: Messaufbau zur Messung von Transmission und Streueigenschaften von Diffusormaterialien

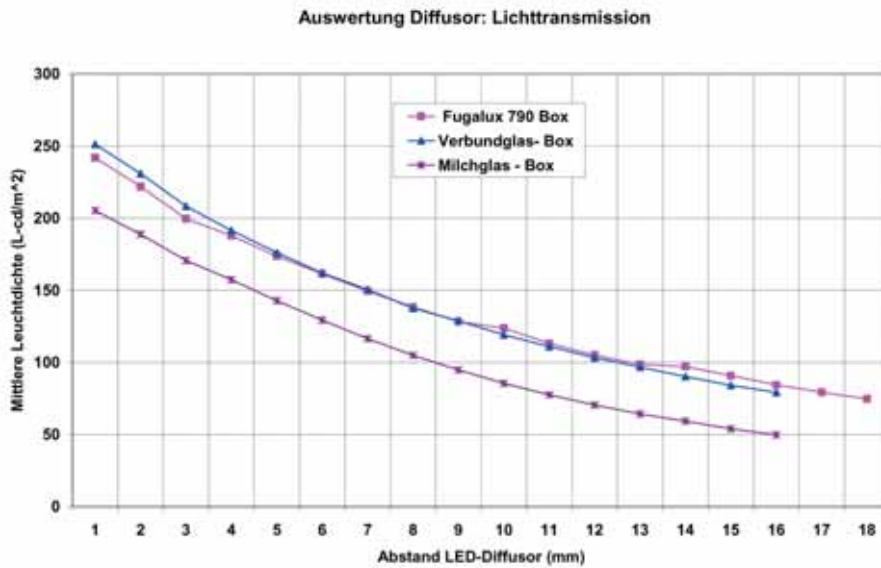


Bild 4: Auswertung der Lichttransmission verschiedener Diffusormaterialien

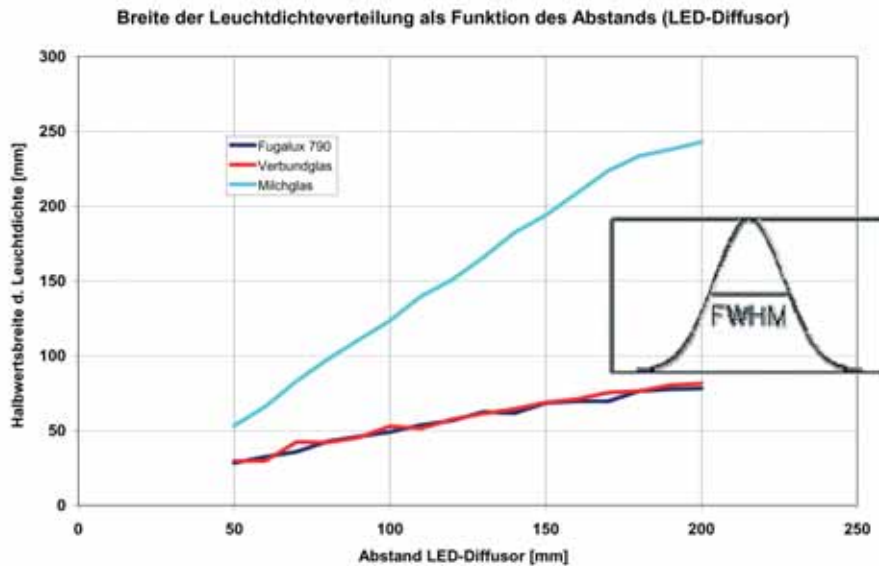


Bild 5: Bewertung der Lichtstreuungseigenschaft diverser Diffusormaterialien (FWHM = Halbwertsbreite)

Zur Bewertung der Streueigenschaften wurde die Halbwertsbreite der Leuchtdichteverteilung auf dem Diffusor bei konstantem Abstand zwischen Leuchtdichtekamera und Diffusor in Abhängigkeit vom Abstand zwischen LED-Lichtquelle und Diffusor gemessen.

### 3. Projektlauf

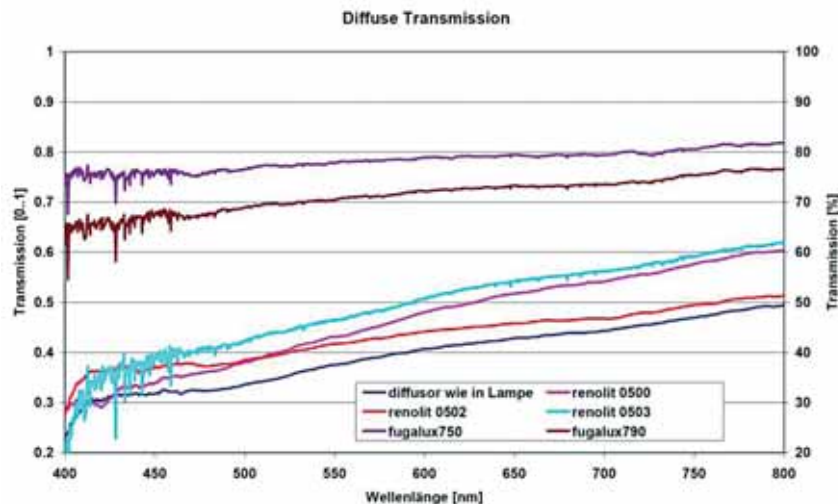


Bild 6: Direkt-diffuse Transmission unterschiedlicher streuender Materialien

Der von Fa. Bocom für den Prototyp eingesetzte Diffusor (Fa. Velasun, www.velasun.de) hat für die Lichtfarbmischung hervorragende Eigenschaften, besitzt aber nur verhältnismäßig geringe Lichttransmission (vgl. Bild 6). Dies führt in Konsequenz zu einem verhältnismäßig hohen Stromverbrauch der Leuchte. Für die Entscheidung waren der optische Eindruck und die Handhabbarkeit des Materials ausschlaggebend.

Um die Anordnung der Leuchtmittel und deren Spezifikation festzulegen, wurde die Beleuchtungssituation im gewählten Versuchsraum simuliert und die Mischung der Spektren verschiedener Lampen berechnet.



Bild 7: Leuchte zur Bereitstellung gesteuerten Farblichts, Stand 9/2004 (links: geschlossen, rechts: geöffnet)

Als Leuchtmittel wurden Sowohl Leuchtstoffröhren als auch LED verwendet (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenstellung der Leuchtmittel

Leuchtstoffröhren(je 6)	Osram L36W/67 blue	Osram L36 W/965 Biolux	Osram L 36W/930 warm White
LED ( je 6 x 6)	Lumiled 1W, 440 nm	Lumiled 1W, 520 nm	Lumiled 1W, 640 nm
Die Leuchtmittel wurden von der bocom GmbH zur Verfügung gestellt			

Das Arbeitspaket "Entwicklung des Prototypen" ging fließend über in die Aufgabe "Einbau und Betrieb der Prototypen". Auch nach der Inbetriebnahme ergaben sich Optimierungspotenziale in der Leuchtenhardware und Ansteuerungssoftware. So musste eine dritte Gruppe von Leuchtstoffröhren mit hohen Blauanteilen nachgerüstet werden, damit die Beleuchtungsstärken 500 lx und 750 lx bei allen gewünschten Farbtemperaturen

(4000K/6500K/10000K) eingestellt werden konnten. Für die Auswertung wurde ein Berechnungsalgorithmus der Farborte von Lichtspektren in einer Software zur Tabellen-

kalkulation (MS Excel) sowie in der Programmiersprache Pascal umgesetzt.

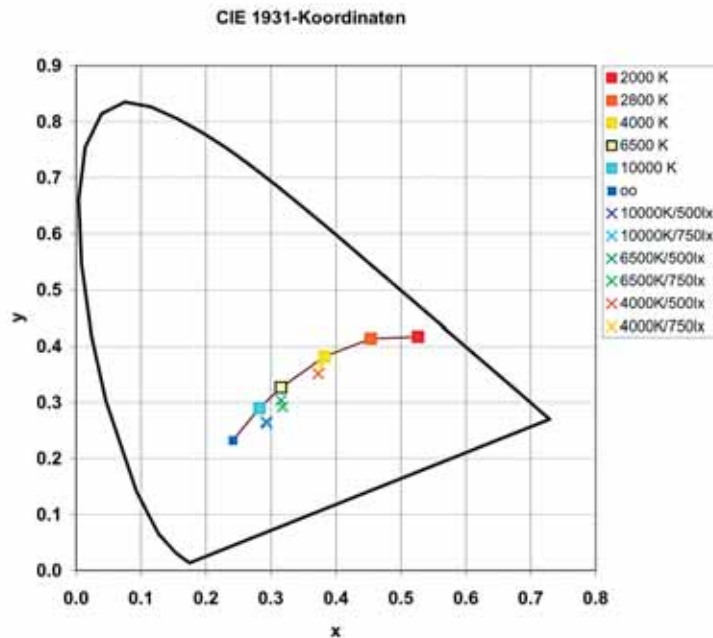


Bild 8: Farbkoordinaten der auf Basis der Farbtemperaturen eingestellten Lichtsituationen. Die durchgezogene Linie stellt die Farborte der Spektren schwarzer Strahler bei den angegebenen Temperaturen dar.

Zur Auswertung der Lichtqualität wurden Spektralmessungen durchgeführt ((McMahan LightSpex). Mit der Software MRL Lightsoft wurden Farborte und auch Farbwiedergabeindizes berechnet. Ein Beispiel ist in Bild 9 dargestellt. Durch die Verwendung von Vollspektrum-Leuchtstoffröhren lässt sich grundsätzlich eine gute Farbwiedergabe (Ra > 90) erzielen, doch nimmt dieser bei starker Erhö-

hung der Blauanteile ab. Hier könnte durch eine Optimierung der Wellenlängen-Maxima der eingesetzten LEDs insbesondere in den Bereichen grünen und roten Lichts ein kontinuierlicheres Spektrum erreicht werden woraus höhere Farbwiedergabeindizes resultieren.

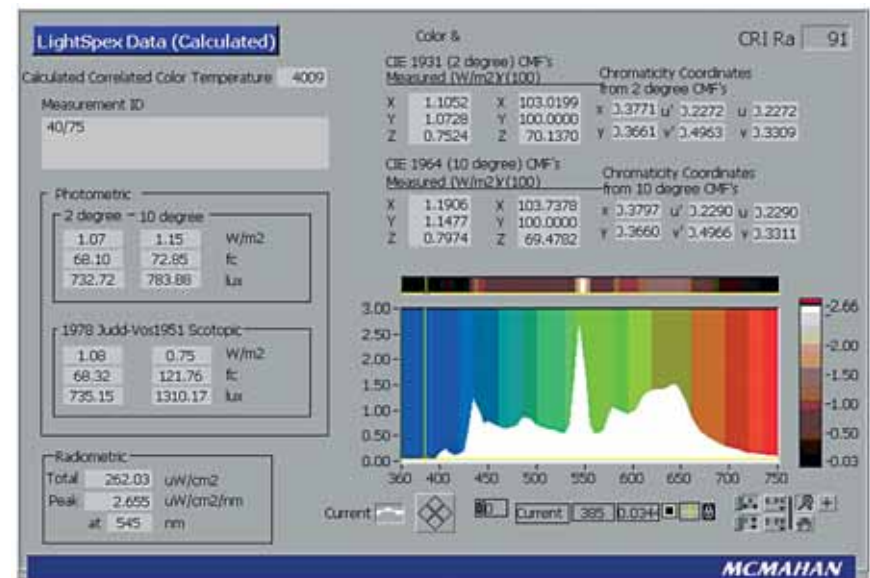


Bild 9: Spektrum und Auswerte-Bildschirm zur Einstellung 4000 K / 750 lx

### 3. Projektlauf

Die Farbwiedergabewerte der Leuchte sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Farbwiedergabeindizes der Farbleuchte (Stand 12/2004)

Farbwiedergabeindex Ra	4000 K	6500 K	10000 K
500 lx	87	86	78
750 lx	91	80	77

Durch die hohe installierte Leistung kam es bei hoher Belastung zu Ausfällen einzelner elektronischer Vorschaltgeräte (EVG), die vermutlich durch die hohe thermische Belastung bedingt sind. Zur Lösung des Problems wurde ein kleiner Lüfter in die Leuchte integriert. Seit dieser Nachbesserung funktioniert die Leuchte einwandfrei, allerdings irritiert die geringfügige Geräusentwicklung des Lüfters bei stillen Arbeitssituationen.

#### 3.3 Erstellung einer Datenbank zur Regelung der Lichtszenarien

Die Grunddaten für eine Datenbank wurden in der Literatur recherchiert. Darüber hinaus wurde eine Messeinrichtung aufgebaut. Ein Spektrometer wurde dazu über einen Lichtleiter an einen unter einer Glaskuppel horizontal angeordneten Diffusor gekoppelt, so dass Spektren des auf die Horizontale treffenden Mischlichts (direktes + diffuses Sonnenlicht) aufgenommen werden (vgl. Bild 10). Dieses Spektrometer nimmt mit Ausnahme einzelner kurzer Unterbrechungen kontinuierlich seit Juni 2004 die Spektren des Himmelslichts auf.



Bild 10: Diffusorkonfiguration zur Aufnahme von Tageslichtspektren

Die Spektren der horizontal gemessenen globalen Solarstrahlung wurden in Abständen von 15 Minuten aufgezeichnet. Die daraus resultierenden Farbkoordinaten sind in Bild 11 dargestellt. Aus dieser Darstellung lässt sich nur schwer ein saisonaler Trend ablesen. Zur weiteren Analyse wurden für alle Spektren die entsprechenden Farbtemperaturen berechnet (siehe Bild 12 und Bild 13). Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der direkten Solarstrahlung, die in der Tagesmitte zu niedrigen Farbtemperaturen führt. An sonnigen Tagen werden daher mittags geringere Farbtemperaturen (bis zu etwa 5300 K) gemessen als an bedeckten Tagen. In den Zeiten der Dämmerung dominiert in der Regel die blaue Himmelsfarbe die gemessenen Spektren. Das Rot von Sonnenauf- bzw. -untergängen ist nur schwer zu erkennen, da der Sensor auf das nahezu horizontal eingestrahelte rote Licht sehr unempfindlich reagiert. Nur wenn Wolken nahe des Zenith von der auf- bzw. untergehenden Sonne angestrahlt werden, können auch Farbtemperaturen unterhalb von 5000 K beobachtet werden (z.B. am 17.6.04 (Bild 12) oder 21.9.04 (Bild 13)). Bild 14 stellt die Tagesgänge des

Monats Mai 2005 dar. Deutlich zu erkennen ist ein Band der Farbtemperaturen zwischen ca. 5400 K und ca. 6200 K, innerhalb dessen tagsüber fast alle gemessenen Spektren fallen. Es werden wenige Ausreißer zu höheren Temperaturen in Situationen beobachtet, in denen die direkte Solarstrahlung durch kleine Wolken ausgeblendet wird und der blaue Himmel die Lichtfarbe dominiert. In den Morgen- und Abendstunden nimmt die Lichtintensität ab, und damit steigt der Fehler bei der Bestimmung der Farbtemperatur an.

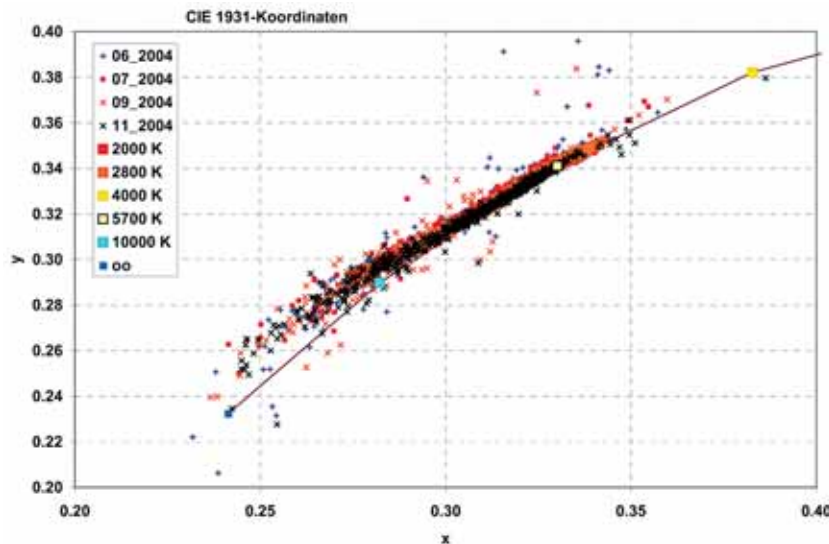


Bild 11: Farbkoordinaten des solaren Strahlungsangebots (horizontal global) in Jülich nach CIE 1931

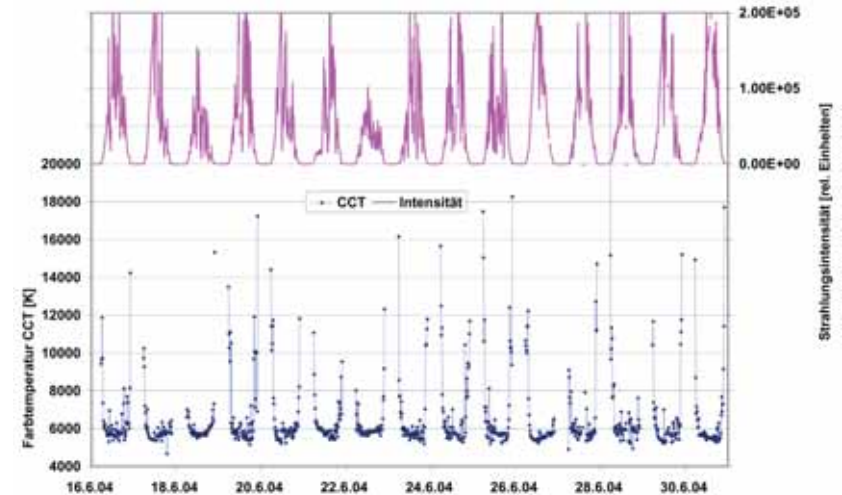


Bild 12: Zeitreihe der Farbtemperatur in der zweiten Junihälfte 2004

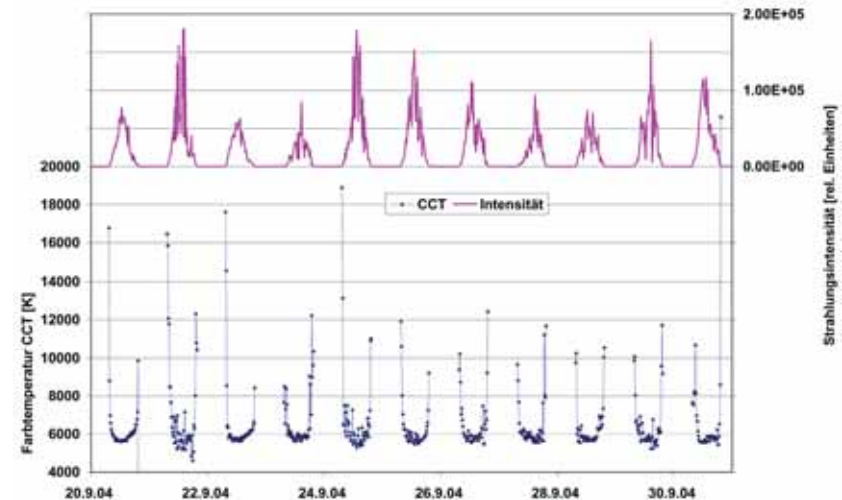


Bild 13: Zeitreihe der Farbtemperatur in der zweiten Septemberhälfte 2004

### 3. Projektlauf

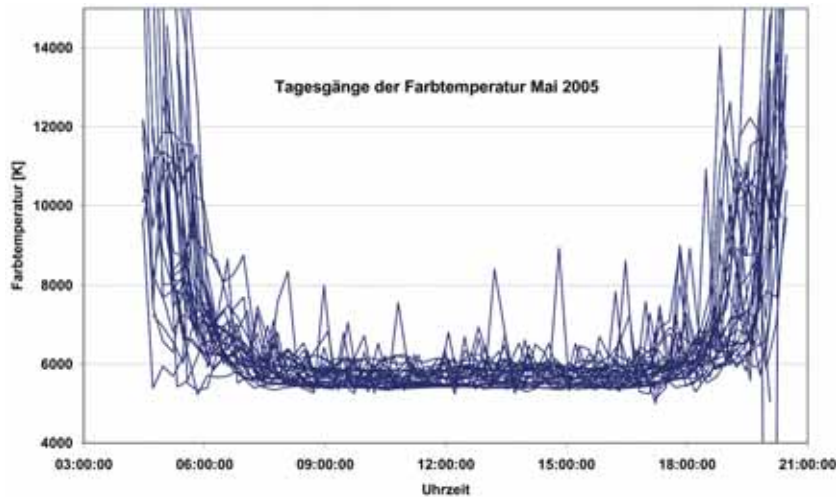


Bild 14: Tagesgänge der Farbtemperatur im Mai 2005

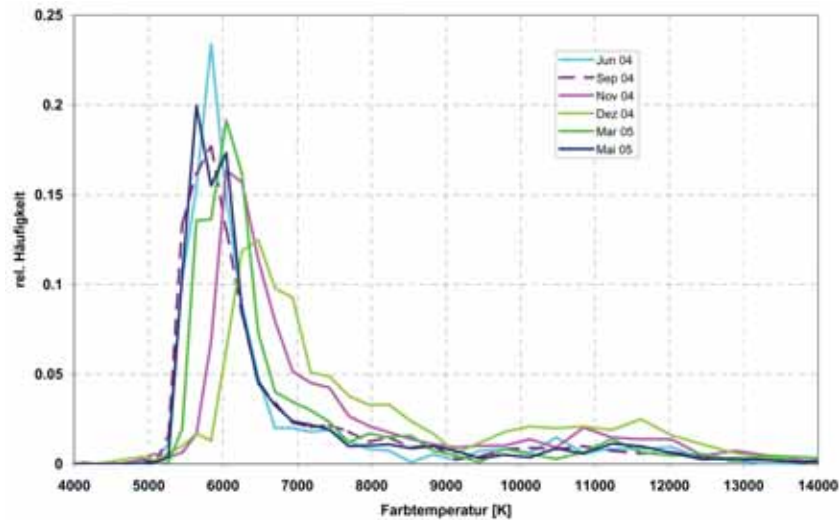


Bild 15: Statistik der Farbtemperatur der solaren Globalstrahlung in verschiedenen Monaten

Erst aus der statistischen Auswertung der Farbtemperaturen ist ein deutlicher saisonaler Trend erkennbar, der aus der höheren Sonnenscheinwahrscheinlichkeit in den Sommermonaten resultiert (Bild 15).

#### 3.4 Planung und Vorbereitung der Nutzer-Befragungen

Der Untersuchungsschwerpunkt liegt auf den Nutzerbefragungen, flankiert von technischen Messungen verschiedener Parameter. Das Messprogramm ist in folgende Sektoren aufgegliedert.

Analysesektor	Untersuchung	Art und zeitliche Auflösung
Technische Untersuchung	Aufzeichnung der Wetterdaten	kontinuierlich, 1 Min
	Stromverbrauch der Beleuchtung	kontinuierlich, 1 Min / Testphase
	Beleuchtungsstärke	an Testtagen, 1Min.
	Leuchtdichten	an Testtagen, in Einzelbildern
	Spektrn im Innenraum	an Testtagen, in Einzelbildern
Nutzerakzeptanz	Befragung mit Testpersonen	Einzelne Befragungsrunden jeweils ca. 1 Std.
	Parallele Sonderuntersuchung techn. Parameter	

Die Nutzerbefragungen wurden gemeinsam mit Dipl.-Ing. MA Heide Schuster als Unterauftragnehmerin entwickelt. Frau Schuster arbeitet seit mehreren Jahren an der Universität Dortmund im Bereich Tageslichtnutzung und Nutzerakzeptanz. Die Kernfragen, die durch die Nutzerbefragung beantwortet werden sollten, sind:



- Hat die Lichtfarbe einen Einfluss auf die Aktivierung /Deaktivierung von Probanden?
- Wie wirkt sich eine Anpassung der Kunstlichtfarbe an den Tagesverlauf /Jahreszeit auf das Empfinden der Probanden aus?
- Besteht ein Einfluss der Lichtfarbe auf die Beurteilung der Helligkeit?

Daraus wurde ein vierseitiger Fragebogen entwickelt, der 24 Fragen umfasst. Diese sind bis auf die abschließende Frage (freie Texteingabe) durch ankreuzen bipolaren Skalen zu beantworten (siehe Bild 16). Dabei werden Raumeindruck, Farbwirkung, Helligkeit und mögliche Störgrößen abgefragt. Ein Exemplar der Fragebögen ist im Anhang beigefügt.

Eine detaillierte Analyse der Leistungsfähigkeit unter dem Einfluss verschiedener Beleuchtungssituationen musste aus dem Untersuchungsprogramm gestrichen werden. Derartige Fragestellungen erfordern einen besonders hohen Aufwand und sehr spezifische Kompetenzen, die weit in die Bereiche der Arbeitspsychologie und Medizin reichen. In Rahmen dieses Projektes kann dieser Aspekt nicht intensiv untersucht werden. Die Leistungsfähigkeit ist verschlüsselt über eine Selbsteinschätzung unserer Testpersonen in der Nutzerakzeptanzuntersuchung inbegriffen.

Nutzerbefragung  
Forschungsprojekt „Licht“



**Frage 7:** Wie wirkt der Gesamtraum im Moment für Sie? Bitte bewerten Sie jede Zeile!

großzügig	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	beengt
ungemütlich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	gemütlich
warm	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	kalt
lebendig	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nüchtern
ermüdend	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	aktivierend

**Frage 8:** Wie gut harmoniert die Lichtsituation mit der aktuellen Tageszeit?

gar nicht  sehr gut

**Frage 9:** Wie gut harmoniert die Lichtsituation mit dem aktuellen Wetter?

gar nicht  sehr gut

Bild 16: Ausschnitt aus dem vierseitigen Fragebogen der Nutzerbefragung

Um eine belastbare statistische Aussage über den Einfluss verschiedener Einstellungen der Beleuchtungsanlage treffen zu können, musste aufgrund der limitierten finanziellen Mittel für die Nutzerbefragungen die Parameter und deren Varianten eng eingegrenzt werden: Parameter, die Einfluss auf die Sehleistung und visuelle Wahrnehmung haben, sind Jahreszeit, Tageszeit, Lichtfarbe (Farbtemperatur), und Beleuchtungsstärke. Deren Varianten sind in folgender Tabelle 3 zusammengefasst. Daraus ergeben sich 48 Konstellationen der Parameter, die so genannten Settings.

### 3. Projektablauf

Tabelle 3: Parameter-Zusammenstellung der Nutzerbefragung

Parameter	Varianten	Anmerkungen
Jahreszeit	Frühjahr / Sommer / Herbst / Winter	analog kalendarischen Jahreszeiten
Tageszeit	10.00h und 15.00h	Hier für Hauptuntersuchung nur zwei Zeitpunkte; ggf. detailliertere Analyse mit Einschränkung der weiteren Parameter In einer Sondermessreihe
	8.00h, 12.30h und 17.00h	
Farbtemperatur	4000 K / 6500 K / 10000 K	4000 K und 6500 K entsprechen den handelsüblichen Lichtfarben neutralweiß und tageslichtweiß. 10000 K liegen am oberen Ende der derzeit erzeugbaren Lichtfarben. Tageslicht kann noch deutlich darüber hinaus gehen.
Beleuchtungsstärke	500 lx und 750 lx	Neben dem Standardwert 500 lx wurde der erhöhte, wirtschaftlich noch vertretbare Wert von 750 lx gewählt.

Es wurde ein Untersuchungsplan erstellt, die Organisationseinheit der Versuchstermine, Probanden und Settings. In jeder Saison wurden alle Settings in annähernd gleicher Anzahl und von jedem Proband jeweils nur einmal durchlaufen. Die Probanden wurden durch Aushänge in der Hochschule und an zentralen Stellen in Jülich akquiriert. Es nahmen insgesamt 68 Probanden an den Befragungen teil. Eine mehrfache Teilnahme mit mehrtägigen Abständen und zu unterschiedlichen Settings war möglich. Es entstand ein Untersuchungsplan, der alle Termine, zu durchlaufende Settings und Besetzung der Befragungen mit Probanden koordinierte.

#### 3.5 Einbau und Betrieb der Prototypen

Für die Installation des Prototypen wurde ein Raum im Gebäude Naturwissenschaften in Jülich ausgewählt. Dieser Raum diente bisher nicht als ständiger Arbeitsplatz, so dass der Zugang für die Projektmitarbeiter jederzeit möglich ist. Diese Bedingung hat sich in vorausgegangen Projekten mit ähnlichen Anforderungen als besonders wichtig erwiesen.

Zudem ist der erdgeschossige Testraum nach Norden orientiert, so dass direkte Sonneneinstrahlung oder unterschiedliche Sonnenstände die Nutzerbefragungen nicht beeinflussen können.

Anstelle der drei Leuchten für kleine Büroräume wurde in dem Versuchsraum eine entsprechend große Leuchte eingebaut. Die Leuchte ist an den Gebäudemanager angeschlossen und wird über einen PC, auf dem die Ansteuerungssoftware installiert ist, bedient. Änderungen und Austausch von Einzelleuchten erfolgen bereits mehrmals wie vereinbart durch den Projektpartner bocom GmbH. Erfahrungen und Beobachtungen, die erst im Betrieb einer Leuchte gemacht werden, haben zu Optimierungen an der Leuchte geführt, wie beispielsweise der Einbau eines Lüfters, um den überhitzungsbedingten Ausfall der elektronischen Vorschaltgeräte bzw. der in der Leuchte montierten Steuermodule zu vermeiden.

#### 3.6 Betreuung der fest installierten Sensorik u. der zentralen Datenerfassung

Entgegen der ursprünglichen Planungen wurden keine Messinstrumente fest installiert, sondern auf mobile Messgeräte mit interner Datenerfassung zurückgegriffen. Diese Messungen fanden zeitgleich mit den Nutzerbefragungen oder in eigenen Messreihen statt. Alle Daten wurden auf dem zentralen Netzwerk gebündelt und zur Auswertung bereitgestellt.

### **3.7 Durchführung der Nutzerakzeptanzuntersuchung**

Die Nutzerbefragungen haben mit zeitlicher Verzögerung begonnen. Die Untersuchungen konnten aber wie geplant in uneingeschränktem Umfang über vier Quartale hinweg von Herbst 2004 bis Sommer 2005 durchgeführt werden. Die Nutzerbefragungen haben im Projekt den größten Teil der Arbeiten ausgemacht. Die Terminierung entsprechend dem Organisationsplan und die Durchführung der Befragungen waren zeitintensiv.

Die Befragungen fanden Blockweise, in jedem Quartal über einen Zeitraum von ca. vier bis sechs Wochen statt. An jedem Versuchstag wurden zwei Befragungen um 10.00 h und um 15.00 h durchgeführt. In einer Sonderuntersuchung auch um 8.00 h, 12.30 h und 17.00 h. Während der Projektlaufzeit wurden 97 Befragungsrunden durchgeführt, zu denen jeweils vier Probanden eingeladen waren. Zur Auswertung liegen nach Ablauf des Projektes 348 gültige Fragebögen vor, deren Daten gemeinsam mit technischen Messwerten in einer Datenbank der Software SPSS zusammengestellt wurden.

## 3. Projekttablauf



Bild 17: Verteilung der gültigen Fragebögen nach den Parametern Uhrzeit, Jahreszeit und Lichteinstellung

Für die Hauptauswertungen wurden in allen vier Quartalen Befragungen um 10.00 h und um 15.00 h jeweils mit den verschiedenen Lichteinstellungen durchgeführt. Im Sommer wurde das Programm um Sonderbefragungen um 8.00 h, 10.00 h und 15.30 h ergänzt. Sie dienten einer detaillierten zeitlichen Aufschlüsselung und wurden nur mit jeweils zwei Einstellungen durchgeführt: 4000K/ 750 lx und 10000K/ 750lx. Für alle Einstellungen zu den Uhrzeiten 10.00 h und 15.00 h liegen jeweils etwa 50 Datensätze vor. Die Zusatztermine gingen in eine gesonderte Auswertung ein.

Im Versuchsraum wurde durch die Möblierung eine Sitzanordnung hergestellt, die sowohl eine Konferenzsituation oder auch einem Gruppenarbeitsplatz entspricht. In der symmetrischen Anordnung saßen sich jeweils zwei Proban-

den gegenüber (siehe Bild 18).

Der standardisierte Ablauf der Befragungen sah das Eintreffen der Testpersonen außerhalb des Versuchsraums vor. Alle Probanden betraten zeitgleich den Raum, in dem die zu untersuchende Beleuchtungssituation bereits eingestellt war. Die Testpersonen erlebten stets statische Einstellungen der Beleuchtung. Den Probanden wurde ihr Sitzplatz zugewiesen und es folgte eine 20minütige Adaptationsphase. In dieser Zeit konnten die Personen lesen, diskutieren, arbeiten. Darauf wurden die Fragebögen verteilt und ausgefüllt. Dies nahm im Durchschnitt 15 Minuten in Anspruch. Wenn der letzte Fragebogen abgegeben war, endete die insgesamt etwa 45 Minuten lange Befragungsrunde.

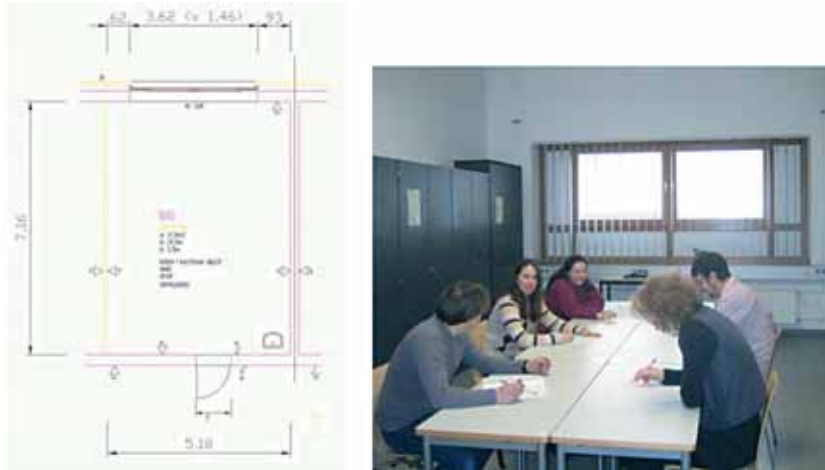


Bild 18: Grundriss und Foto des Testraums mit Testpersonen und Versuchsleiterin

Besondere Sorgfalt wurde auf einen immer gleichen Ablauf der Befragungen gelegt, um den Einfluss von Rahmenbedingungen auf die Antworten der Testpersonen auszuschließen. Ein Protokoll stellte sicher, dass der Versuchsleiter alle Vorbereitungen trifft und dass alle Arbeitsschritte durchlaufen wurden. Zeitpunkte und Messwerte von Temperatur und Beleuchtungsstärke, Wetterdaten und Teilnehmerdaten wurden darin protokolliert.

### 3.8 Durchführung von temporären Messungen der technischen Größen

Die temporären Messungen sind aufgeteilt in zwei Kategorien: Zum einen die Daten, die zeitgleich zu den Befragungen erhoben werden. Zum anderen Messungen der Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke. Die Messungen während der Nutzerbefragungen umfassen Temperatur,

Beleuchtungsstärke und Spektrum. Die Daten wurden in einem Protokoll erfasst, in die statistische Software SPSS übertragen und standen von dort aus für weitere Auswertungen bereit. Die Untersuchungen der Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke sind für jede Beleuchtungssituation in einem eigenen Messaufbau ermittelt worden.

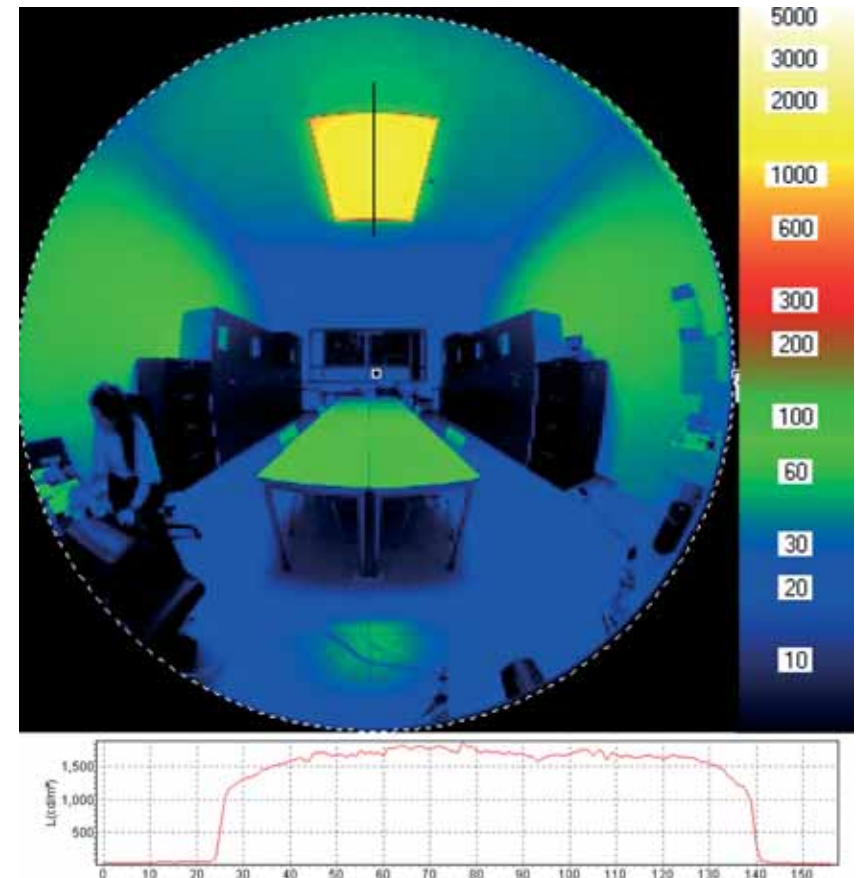


Bild 19: Leuchtdichteverteilung im Versuchsraum unter reinem Kunstlicht, Einstellung 4000 K/ 500 lx (cd/m<sup>2</sup>)

## 3. Projekttablauf

Die Farbleuchte strahlt bei der 500 lx-Einstellung mit einer Leuchtdichte von ca. 1700 cd/m<sup>2</sup> als weitgehend homogenes Leuchtelement.

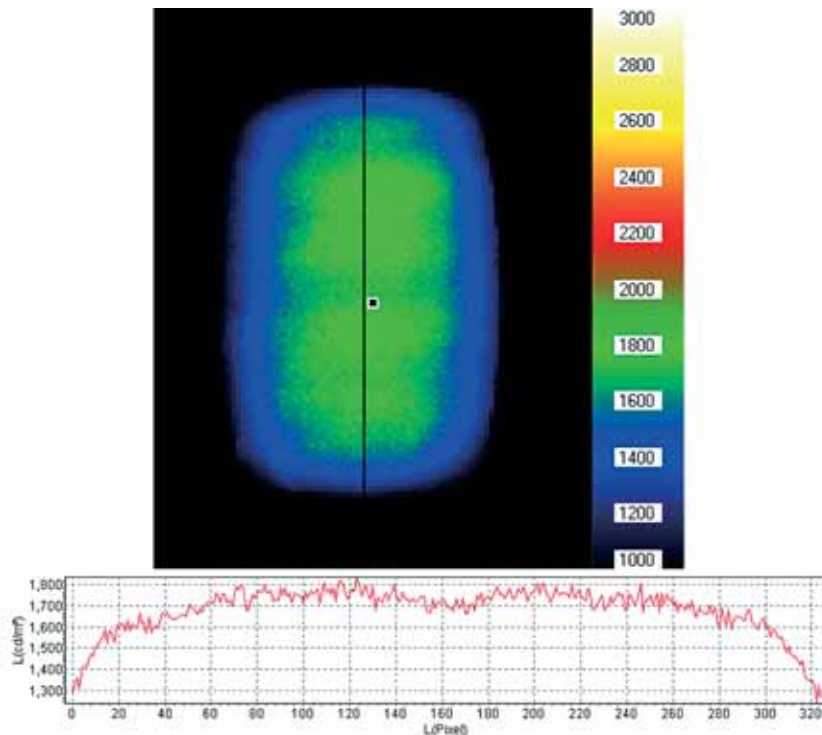


Bild 20: Leuchtdichte der Farbleuchte bei 4000 K/ 500 lx

### 3.9 Begleitende und abschließende Auswertung

#### 3.9.1 Begleitende Auswertung

Die Auswertungen während der Projektlaufzeit dienten einer Plausibilitätskontrolle und offenbarten Optimierungspotenziale. So konnten durch Messungen der Beleuchtungsstärke und der Spektren während der Nutzerbefragungen in zwei Fällen defekte an der Leuchte festgestellt und beseitigt werden.

Bei den Nutzerbefragungen wurden speziell für diesen Zweck zwei sogenannte Pretests durchgeführt, die schwer verständliche Formulierungen oder andere Störgrößen im Versuchsaufbau herausfiltert sollten. Daraufhin wurde eine Frage umformuliert. Außerdem war auffällig, dass die Beurteilungen der Lichtsituation als besonders "kalt", "ungemütlich" und "unwohl" ausfielen. Ursache dafür war der Behang der Schränke mit weißen Vorhängen (siehe Bild 21).



Bild 21: Befragungssituation im Testraum während eines Pre-Tests mit abgehängten Schränken

Diese Vorhänge waren vorgesehen, um den Farbeinfluss der dunkelgrauen Möblierung zu minimieren. Die hellen Vorhänge verliehen dem Raum aber einen sterilen Laborcharakter. Vor Beginn der eigentlichen Untersuchung wurden die Vorhänge entfernt und so ein realistisches, lebendiges Umfeld geschaffen. Die Einstellungen der Leuchte wurde angepasst, um die Licht schluckende Wirkung der Möblierung zu kompensieren.

### 3.9.2 Schlusserwertung

Zur abschließenden Auswertung wurden die Daten der Fragebögen sukzessive in die statistische Software SPSS eingepflegt. Von dort aus wurden sämtliche Auswertungen ausgeführt. Die zweistufige Auswertungsroutine umfasste zunächst die reine Auszählung aller Antworten. Die siebenteiligen Skalen wurden dabei zunächst in eine dreiteilige Skala umgewandelt, die die neutrale Antwort und die Zusammenfassung der jeweils drei Antwortmöglichkeiten der bipolaren Skala beinhaltet. Diese Skala wurde mit dem Begriff "eher" versehen, so dass eine substituierte Skala beispielsweise "eher hell" - "neutral" - "eher dunkel" lautet. Auf diese Weise konnte die Sensibilität der Auswertungen für Tendenzen hin zu einer Bewertung deutlicher erkannt werden. In Einzelfragen wurde nach den ersten Beobachtungen in der Dreierskala auch die detailliertere Siebenerskala untersucht.

Auf die reine Auszählung der Fragen folgte die Überprüfung auf statistische Signifikanz. Hierzu wurde mittels der allgemein zugänglichen Software "R" Chi-Quadrat-Tests (approximativ, nach Pearson) durchgeführt. Dabei ist der Wert  $\chi^2$  ein Maß für die Abweichung der beobachteten Verteilungen. Zusätzlich wird die Wahrscheinlichkeit  $p$  für den Fehler 1. Art (die falsche Annahme, dass die beobachteten Verteilungen derselben Wahrscheinlichkeitsverteilungen erwachsen) berechnet. Ein niedriger Wert für  $p$  bedeutet, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den Beobachtungen als signifikant bezeichnet werden können. In der Regel wird ein Wert  $< 0,1$  (strenger:  $< 0,05$ ) erwartet.

In einer ersten Phase wurden zunächst die organisatorischen Daten erhoben, wie beispielsweise die Häufigkeit bestimmter Settings. Und es wurde der Einfluss bestimmter Randparameter untersucht. Es zeigte sich beispielsweise, dass die weiblichen Probanden häufiger neutral geantwortet haben als die männlichen. 29% aller Antworten, die von Frauen abgegeben wurden, waren neutral; bei den Antworten männlicher Probanden waren es hingegen nur 22%. Da die Geschlechterverteilung über alle Settings hinweg jedoch nahezu konstant war, hat dieser Sachverhalt für die Auswertungen keinen weiteren Einfluss (siehe Bild 22).

### 3. Projektlauf

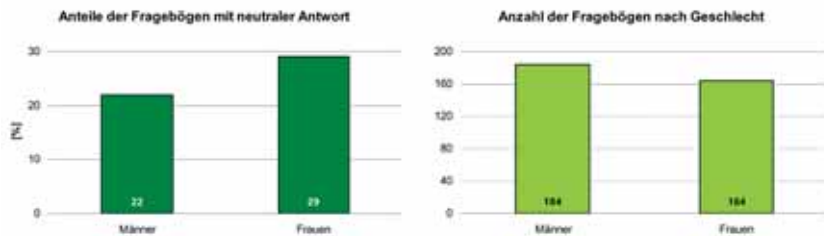


Bild 22: Geschlechterspezifische Untersuchungsergebnisse

Ein weiterer Aspekt, der möglicherweise Einfluss auf die Antworten hätte haben können, war der Sitzplatz, denn es wurden zeitgleich vier Probanden befragt, wie die Fotos der Befragungen oben zeigen.

Tatsächlich zeigten sich bei der Auswertung einiger Fragen Sitzplatz abhängige Unterschiede, wie beispielsweise bei der Frage nach dem allgemeinen Wohlbefinden der Probanden. Hier liegt der Schluss nahe, dass linke und rechte Sitzplätze zu signifikant unterschiedlichen Bewertungen aller Fragen führen. Bei der Analyse weiterer Fragen, zeigen sich ebenfalls Varianzen zwischen den Sitzplätzen, die jedoch keine Regelmäßigkeit aufweisen. Zudem ist die Besetzung der Sitzplätze nahezu gleichverteilt. Unterbesetzungen sind nur entstanden, falls eingeplante Probanden nicht erschienen. Jeder Proband saß bei mehrfacher Teilnahme stets auf einem anderen Platz.

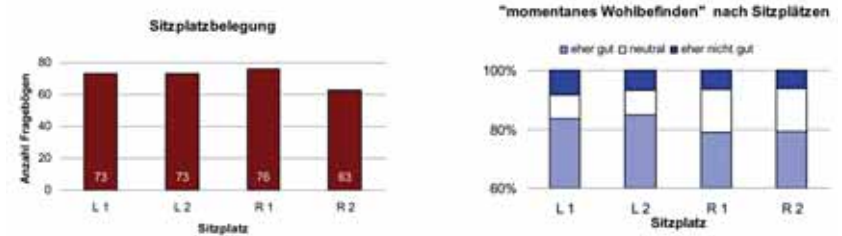


Bild 23: Sitzplatz spezifische Auswertungen

### 3.10 Ableitung eines Empfehlungskataloges für Farblichtregelungen

Der Empfehlungskatalog für Farblichtregelungen basiert auf den ausgewerteten Daten des gesamten Projektes. Die zeitliche Auflösung der Nutzerbefragung mit maximal fünf Uhrzeiten am Tag lässt es noch nicht zu einen kontinuierliche Tagesgang für die Beleuchtungseinstellungen abzuleiten. Tageszeitliche Tendenzen sind aber ablesbar und als Ergebnis des Vorhabens dokumentiert.

### 3.11 Transfer in die Partnerunternehmen

Die Kooperation mit dem Partner bocom GmbH fand vor allem im Bereich der Prototypentwicklung statt. Die bisherigen gemeinsamen Entwicklungsschritte haben dabei sowohl die Erfahrungen aus der Industrie in die Forschung getragen, haben aber auch die Ergebnisse der Laboruntersuchungen an Lampen und Leuchtenmaterialien für das Partnerunternehmen bereitgestellt.

Die Ergebnisse der Befragungen stellen eine wichtige Voraussetzung für die Vermarktung des entwickelten Produkts, insbesondere der Steuerung für Farbleuchten dar.



### **3.12 Präsentation und Veröffentlichungen in breiter Fachöffentlichkeit**

Für die Untersuchungen wurde ein Raum gewählt, der jederzeit zugänglich ist. Dadurch war es möglich das Forschungsprojekt interessierten Besuchergruppen zu präsentieren, unter anderem den 25 Teilnehmern eines Symposiums der Fördergemeinschaft innovative Tageslichttechnik (FiTLicht) im November 2004 in Jülich. Auch die Mitglieder des Fachausschusses Tageslicht der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG) nutzen ihre Tagung im Februar 2006 in Jülich, um sich über das Projekt zu informieren.

Auf dem Symposium "Innovative Lichttechnik in Gebäuden" der OTTI in Staffelstein im Januar 2006 wurden die Ergebnisse in einem Vortrag vorgestellt.

Die Veröffentlichung der Ergebnisse in einer Ergänzungslieferung zum "Handbuch für Beleuchtung" 2006 ist in Vorbereitung.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Materialauswahl und Leuchtendesign

Das Leuchtendesign des Prototyps erfüllt die vom Projekt geforderten Ansprüche bei ansprechendem Design, so dass bei den geforderten Farbtemperaturen von 4.000 K, 6.500 K und 10.000 K die Beleuchtungsstärke in Arbeitsebene von 500 lx bzw. 750 lx eingestellt werden konnte. Insgesamt enthält die 1,20 x 2,00 m<sup>2</sup> große diffus abstrahlende Flächenleuchte 18 Leuchtstoffröhren und 36 LED-RGB-Gruppen. Die Anschlussleistung beträgt ca. 800 W.

Die durch den Diffusor hervorgerufene Farbmischung der unterschiedlichen Lichtquellen kann als exzellent bezeichnet werden. Die Leuchtdichteverteilung der Farbleuchte weist nur geringfügige Schwankungen auf.

Optimierungsbedarf besteht noch bei der Lichtausbeute, da der Diffusor mit ca. 40 % eine relativ geringe Lichttransmission aufweist. Durch Mehrfachreflexionen in der Leuchte tritt allerdings insgesamt ein deutlich höherer Anteil des erzeugten Lichts durch den Diffusor hindurch.

Bezüglich der spektralen Verteilung des abgestrahlten Lichts ließen sich noch die Wellenlängen der LED (insbesondere im grünen Bereich) optimieren, so dass ein höherer Farbwiedergabeindex auch bei hohen Farbtemperaturen erreicht werden kann.

### 4.2 Nutzerbefragungen

Bei der Auswertung der Befragungsergebnisse sind alle Fragen zu vier thematischen Gruppen zusammengefasst, die sich auf die Themen "Helligkeit", "Farbwahrnehmung", "Zeitliche Varianz" und "Bezug zum Tageslicht" konzentrieren. In den folgenden Kapiteln sind diejenigen Auswertungen zusammengestellt, die die größte Aussagekraft besitzen.

#### 4.2.1 Helligkeit:

Die prozentualen Anteile der Antworten zu zwei Fragen in der Themengruppe „Helligkeit“ sind in Bild 24 und  $\chi^2 = 12,0$ ,  $p=0,0025$   $\chi^2 = 4,98$ ,  $p=0,29$

Bild 25 dargestellt. Es bestätigte sich zunächst der zu erwartende Zusammenhang, dass höhere Beleuchtungsstärken auch zu einem geänderten Helligkeitseindruck führen. Aber auch die erhöhte Farbtemperatur induziert einen helleren Raumeindruck.

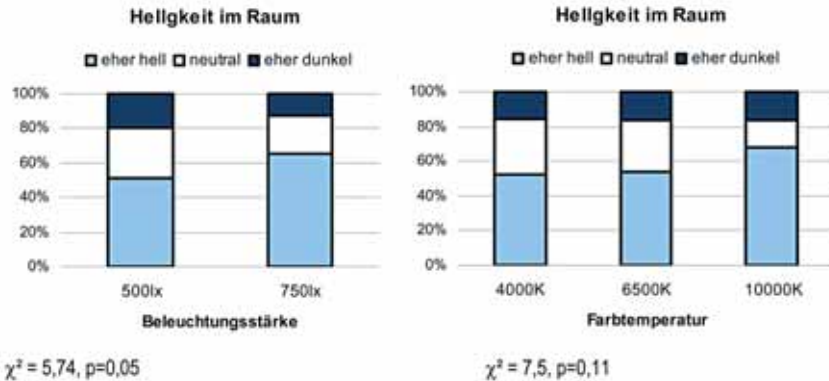


Bild 24: Antworten auf die Frage "Wie beurteilen sie die Helligkeit im Raum insgesamt?"

Dieser Zusammenhang bestätigt sich: Gefragt nach dem Änderungswunsch der Helligkeit entscheiden sich bei 500 lx deutlich mehr Probanden für "mehr Helligkeit". Bei der Auswertung nach Farbtemperaturen zeigt sich, dass der Wunsch nach mehr Helligkeit bei 10.000K am geringsten und bei 4000K am höchsten ist.

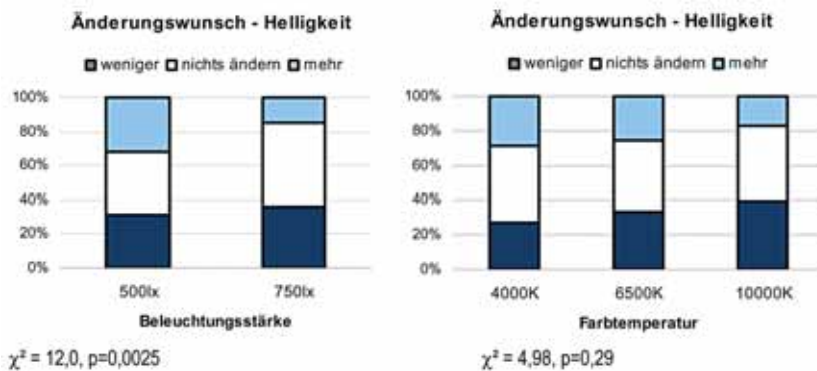


Bild 25: Antworten auf die Frage "Wenn sie die jetzige Lichtsituation in Hinblick auf die Helligkeit ändern könnten, was würden sie ändern?"

Generell wird bei der Auswertung bezüglich der Lichtfarbe ein höherer p-Wert erzielt (geringere Signifikanz), weil die Anzahl der Fragebögen pro Situation geringer ist

#### 4.2.2 Lichtfarbe:

In der Fragengruppe "Lichtfarbe" zeigt sich ein ähnliches Bild. Sowohl die Farbtemperatur als auch die Beleuchtungsstärke haben einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Raumeindrucks. Wie zu erwarten, führt blaues Licht (hohe Farbtemperaturen) zu einem eher kalten Raumeindruck. Aber auch hohe Beleuchtungsstärken werden häufiger als "eher kalt" wahrgenommen,

(siehe  $\chi^2 = 2,15, p=0,34$   $\chi^2 = 2,76, p=0,60$ )

Bild 26 zeigt.

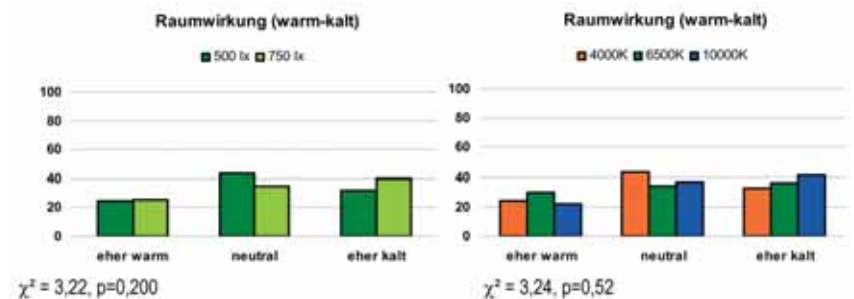


Bild 26: Antworten auf die Frage „Wie wirkt der Gesamtraum im Moment für Sie?“

Bild 26: Antworten auf die Frage "Wie wirkt der Gesamtraum im Moment für Sie?"

## 4. Ergebnisse

Die Gegenfrage zum Thema Lichtfarbe, die Frage nach einem Änderungswunsch der Lichtatmosphäre, bestätigt dies. Überraschend ist hierbei, dass die Aufschlüsselung nach Beleuchtungsstärke eine deutlichere Tendenz aufweist als diejenige nach Farbtemperaturen. Die höhere Beleuchtungsstärke von 750 lx erzeugt häufiger den Wunsch nach einem wärmeren Lichteindruck. Und je höher die tatsächliche Farbtemperatur desto eher besteht der Wunsch nach einem wärmeren Lichteindruck,

Bild 27). (siehe  $\chi^2 = 2,15, p=0,34$   $\chi^2 = 2,76, p=0,60$

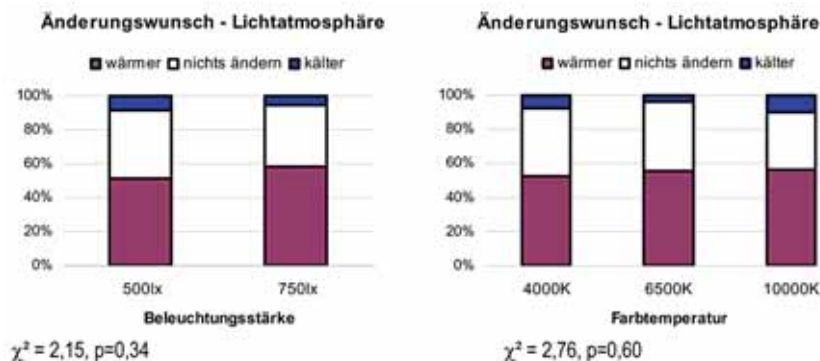


Bild 27: Antworten auf die Frage: "Wenn sie die jetzige Lichtsituation in Hinblick auf die Lichtatmosphäre ändern könnten, was würden sie ändern?"

## Vergleich der Ergebnisse mit Kruithof:

Eine von Kruithof bereits in den 1940er Jahren durchgeführte Studie zeigte den empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen der als angenehm empfundenen Helligkeit und Lichtfarbe auf. Auch wenn das vorliegende Projekt nicht zur Aufgabe hatte, die These von Kruithof zu hinterfragen, scheint es geboten, die gewonnen Erkenntnisse auf die Kongruenz zu Kruithof zu überprüfen. Alle sechs in diesem Projekt verwendeten Beleuchtungskombinationen liegen innerhalb des lt. Kruithof akzeptablen Bereichs oder in den Randzonen (siehe Bild 28).

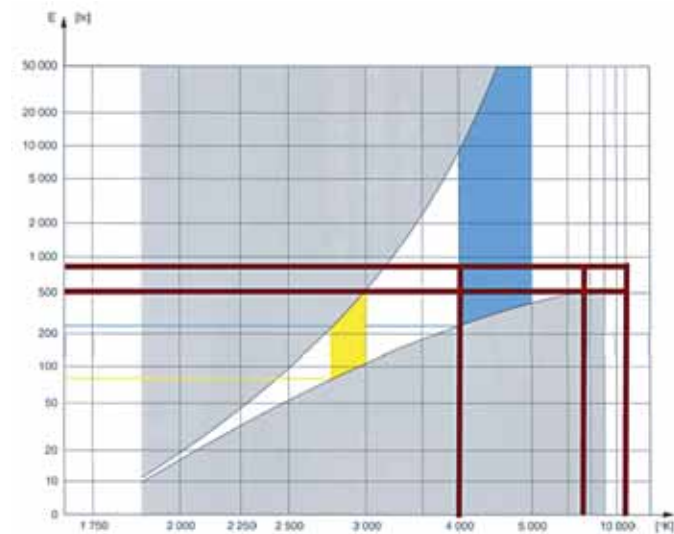


Bild 28: Empirisch als angenehm empfundenen Kombinationen aus Beleuchtungsstärke und Lichtfarbe nach Kruithof. In rot sind die Einstellungen im Projekt dargestellt. [Quelle: [HfB]]

Der allgemeinen Formulierung "als angenehm empfinden" nach Kruithof kommen im Projekt zwei Fragen am nächsten. Dies sind die Fragen, wie den Probanden die Lichtsituation am Arbeitsplatz allgemein gefällt, und die Frage, wie sich die Probanden in der aktuellen Lichtsituation fühlen (wohl bis unwohl).

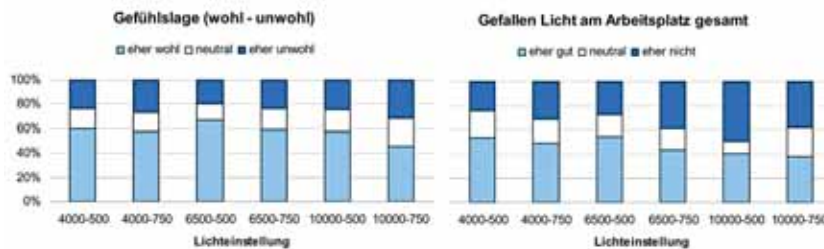


Bild 29: Antworten auf die Frage "Wie fühlen sie sich im Moment bei der aktuellen Lichtsituation? (wohl - unwohl)" und "Wie gefällt Ihnen der Arbeitsplatz mit der momentanen Lichtsituation insgesamt?"

Für eine klare Übereinstimmung mit Kruithof müsste man erwarten, dass die Lichteinstellungen mit 10.000 K generell schlechter abschneiden als die übrigen und dass die Kombinationen mit hoher Beleuchtungsstärke besser bewertet werden als diejenigen mit geringerer. Dies bestätigt sich jedoch nicht. Tendenziell führen niedrige Beleuchtungsstärken sogar eher zur Bewertung "wohl" und der Gesamtarbeitsplatz gefällt besser.

Bei den vorangegangenen Analysen zum Änderungswunsch der Lichtatmosphäre (siehe  $\chi^2 = 2,15, p=0,34$   $\chi^2 = 2,76, p=0,60$  Bild 27)

Im Bild 27 wird deutlich, dass bei hohen Farbtemperaturen weniger Akzeptanz vorherrscht, so wie es Kruithof beschreibt. In Bezug auf die Beleuchtungsstärke widerspricht die o.g. Auswertung der von Kruithof angegebenen Tendenz.

Kruithof konnte demnach nicht bestätigt werden, aber auch nicht widerlegt werden. Beim Vergleich beider Studien ist zu beachten, dass das Projekt nicht auf eine Überprüfung abzielte und die sechs Lichteinstellungen nur einen Teilbereich der relevanten Einstellungen abdeckt. Zudem lag keine reine Kunstlichtsituation wie bei Kruithof vor, sondern Ausblick und Kontakt zum Außenraum war für die Probanden jederzeit gegeben und erwünscht.

#### 4.2.3 Zeitliche Varianz:

Eine Sondergruppe von Befragungen fand zu fünf Uhrzeiten am Tag statt. Dabei wurden nur zwei Einstellungen (750 lx/4.000 K und 750 lx/10.000 K) variiert (Bild 30).

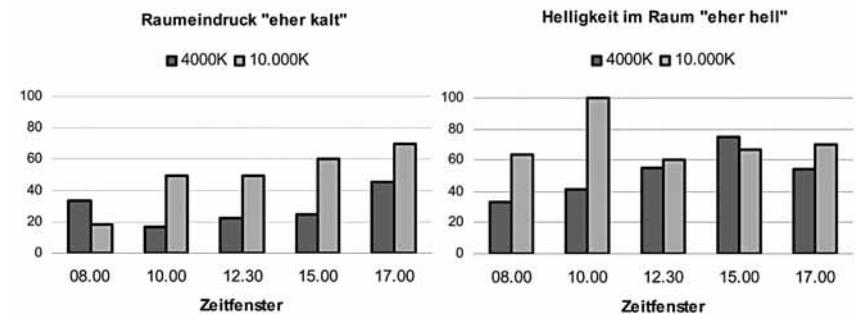


Bild 30: Antworten auf die Fragen "Wie wirkt der Gesamtraum im Moment für Sie?" und "Wie beurteilen sie die Helligkeit im Raum insgesamt?"

## 4. Ergebnisse

Es zeigt sich der Trend, dass die Lichtsituation im Tagesverlauf generell als zunehmend kälter empfunden wird, was auf eine Erwartungshaltung zu wärmeren Lichtfarben am Abend schließen lässt. Bei der Frage nach der Helligkeit im Raum zeigt sich eine stärker ausgeprägte Farbempfindlichkeit am Vormittag.

### 4.2.4 Bezug zum Tageslicht

Ein besonderes Merkmal der hier durchgeführten Untersuchung besteht in der Tatsache, dass die Probanden jederzeit durch das Fenster den visuellen Bezug zur Außensituation hatten. Es konnte also untersucht werden, welchen Einfluss der Himmelszustand (bedeckt - schön) auf die Wahrnehmung der Farbleuchte hatte (siehe Bild 31). Die Ergebnisse lassen einen deutlichen Einfluss des Angebots an Tageslicht auf die Antworten erkennen.

Die Versuchsanordnung stellte sicher, dass der Anteil des Tageslichtes an der Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene bei maximal 50 lx lag. Der tatsächlich mögliche Helligkeitsunterschied war demnach sehr gering.

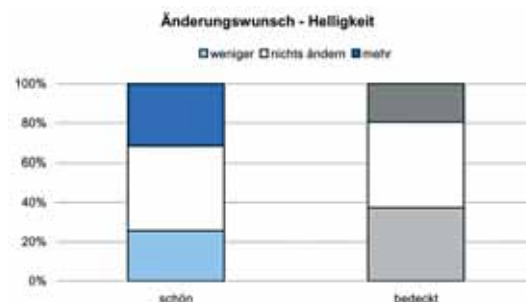


Bild 31: Antworten auf die Frage "Änderungswunsch Helligkeit", gruppiert nach Wettersituation

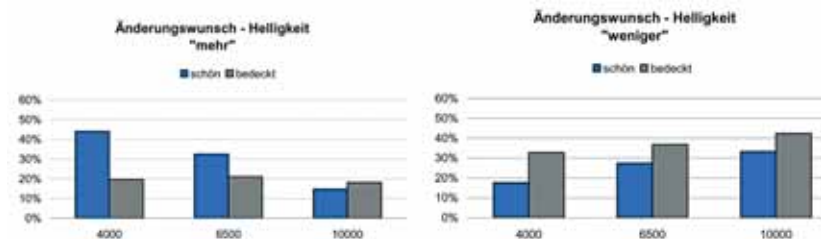


Bild 32: Befragungsergebnis "Änderungswunsch Helligkeit", gruppiert nach Wettersituation und Lichtfarbe

Während bei bedecktem Himmel der Wunsch nach mehr Helligkeit mit nur ca. 20 % der Befragten weitgehend unabhängig von der Lichtfarbe geäußert wird, wird bei schönem Wetter insgesamt "mehr Helligkeit" gewünscht (siehe Bild 32), und zwar um so mehr je "röter" die angebotene Lichtfarbe war. Die Antwort "nichts ändern" wurde bei 10.000K Farbtemperatur und schönem Wetter am häufigsten genannt (vgl. Bild 33).

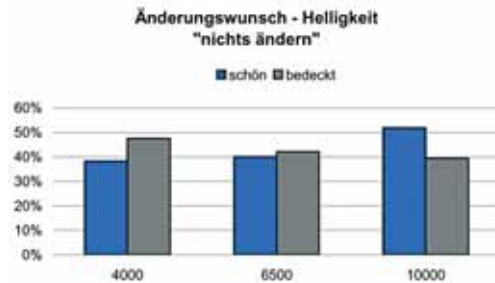


Bild 33: Befragungsergebnis "Helligkeit nicht ändern", gruppiert nach Wettersituation und Lichtfarbe

Offenbar besteht bei den Befragten tendenziell das Bedürfnis, die Innenraumbeleuchtung in dem hier untersuchten, nach Norden orientierten Raum den Außenbedingungen anzupassen: Bei schönem Wetter mit blauem Himmel werden sehr hohe Farbtemperaturen insgesamt bevorzugt. Diese werden interessanterweise bei gleicher Beleuchtungsstärke als heller wahrgenommen. Dieses Indiz bestätigt die Tatsache, dass Lichtfarben über die reine V(?)-Empfindlichkeit hinaus zumindest unterbewusst wahrgenommen werden.

#### 4.2.5 Weitere Auswertungen

In den oben dargelegten Auswertungen zu den vier wichtigsten Themenbereichen ist lediglich eine kleine Auswahl der insgesamt 24 Fragen diskutiert worden. Diese dargestellten Frageauswertungen zeigten die ermittelten Tendenzen in besonderer Ausprägung. Bei den meisten anderen Fragen wurden keine aussagekräftigen Trends festgestellt. Dies war insbesondere bei der Gruppe der emotional bestimmten Fragen der Fall. Als Ursache dafür wird vermutet, dass bei

derartigen Fragestellungen persönliche Randbedingungen die Einflüsse durch die Beleuchtung deutlich überlagern. Zudem führen möglicherweise individuelle Werteskalen der Probanden zu einer großen Streuung der Befragungsergebnisse.

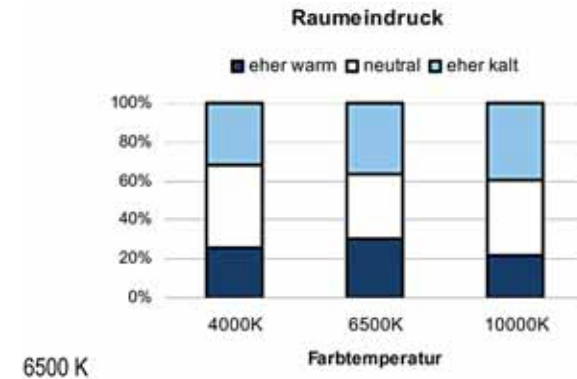


Bild 34: Antworten auf die Frage: "Wie wirkt der Gesamtraum im Moment für Sie?"

Eine häufig festzustellende Tendenz bei vielen Fragen, ist die Tatsache, dass die Einstellungen mit 6.500 K oft gegen einen zu erwartenden linearen Trend oftmals die günstigste Bewertung erhielten. Ein Beispiel dafür ist die Frage nach dem Raumeindruck (warm - kalt) wie Bild 34 darstellt. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass diese Farbtemperatur auch beim natürlichen Licht mit der höchsten Häufigkeit auftritt (vgl. Kap. 3.3).

## 4. Ergebnisse

### 4.3 Empfehlungskatalog

Aus den Erkenntnissen der Befragung lässt sich ableiten, dass es erstrebenswert ist, die Lichtintensität und die Lichtfarbe auf Basis des Tageslichtangebots zu steuern. Eine detaillierte systematische Bewertung dynamischer Lichtsituationen war im Rahmen dieses Projektes noch nicht möglich. Dennoch wurde in einzelnen Situationen festgestellt, dass auch kleine Änderungen der Lichtfarbe bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke wahrgenommen werden und die Aufmerksamkeit erhöhen. Zusammenfassend lassen sich die folgenden Empfehlungen aussprechen:

- Höhere Beleuchtungsstärken werden bevorzugt
- Höhere Farbtemperaturen werden als heller empfunden
- Im Tagesverlauf wird zunehmend wärmeres Licht (niedrigere Farbtemperatur) bevorzugt
- Die Empfindlichkeit für unterschiedliche Farbtöne ist vormittags höher als nachmittags
- Bei schönem Wetter (blauem Himmel, u.U. auch mit einzelnen Wolken) werden höhere Farbtemperaturen und hohe Beleuchtungsstärken bevorzugt

Auf Basis der vorliegenden Untersuchungen lassen sich nur grobe Vorgaben für eine automatische Farblichtsteuerung definieren, die etwa einen linearen Verlauf der Farbtemperatur in Abhängigkeit z. B. der Außenbeleuchtungsstärke als Maß für die Wettersituation vorgibt. In jedem Fall muss die Möglichkeit bestehen, über ein klar strukturiertes Bedienelement manuelle Änderungen vornehmen zu können.



## 5. Diskussion

Mit diesem Forschungsprojekt wurden grundlegende Fragestellungen behandelt, um die Beleuchtung mit künstlichem Licht in dem wichtigen Aspekt der Lichtfarbe zu optimieren. Es konnten sowohl Abhängigkeiten der Beleuchtungswahrnehmung von der Lichtfarbe und -intensität als auch eine zeitlich variable Farbempfindlichkeit in Abhängigkeit von Tageszeit und Wettersituation belegt werden. Die identifizierten Präferenzen unterschiedlicher Beleuchtungssituationen können wichtige Hilfestellungen für die Leuchtenindustrie darstellen.

Angesichts der Komplexität der Fragestellung und der benötigten großen Datenbasis zur Erzielung statistisch signifikanter Ergebnisse konnte nur ein beschränktes Spektrum an Situationen und Fragestellungen berücksichtigt werden. Insbesondere die Fragen nach der Wirkung auf die Leistungsfähigkeit und der Wirkung variabler Lichtfarbverläufe können erst in zukünftigen untersucht werden.

Mehrere Leuchtenhersteller arbeiten derzeit an einer Optimierung ihrer Produkte bezüglich der Lichtfarbeinstellung und deren Dynamik.

Die technische Optimierung der im Projekt entwickelten Leuchte erscheint im Hinblick auf die Aspekte Energieeffizienz und Farbwiedergabe sinnvoll

## 6. Ausblick

Es steht zu erwarten, dass die im Projekt festgestellten subjektiven Präferenzen sich darin widerspiegeln, dass auch die Leistungsfähigkeit von der Lichtfarbe beeinflusst werden kann. Wie auch andere Projekte (Iguzzini; TU Berlin) zu diesem Themenumfeld zeigen, besteht über dieses Projekt hinaus Bedarf nach weiterer Forschung, in deren Rahmen diese These untersucht werden sollte. Dabei ist der Focus zusätzlich auf die Wahrnehmung und Wirkung dynamischer Prozesse der Beleuchtung zu legen.

## 7. Summary

Colour and intensity of light sources can have a significant influence on work efficiency and comfort. Only recently receptors in the human eye have been discovered, which govern the human balance of hormones and which are highly sensitive in the blue spectral region. Therefore daylight is generally preferred to artificial lighting. However, in numerous situations, daylight must be complemented by artificial light in order to achieve sufficiently high illuminance levels.

As the light colour of daylight varies, the artificial light source should be capable of adjusting its colour in a similar range of correlated colour temperatures (CCT) as is observed in daylight studies.

A prototype lamp was designed which allows illuminance

levels at the working plane up to 750 lx at CCT ranging from 4000 K to 10000 K. Both light intensity and light colour may be varied continuously. The lamp appears uniform as light from different sources (fluorescent lamps and LEDs) is mixed by a large-area diffuser (1 m x 2 m).

User acceptance studies were carried out in a north-facing windowed room allowing the mixed influence of daylight and static artificial light. 285 questionnaires were evaluated. Test persons had to adjust to the light situation for 20 minutes before filling in the forms. Results show that changes in light colour are well perceived. Time-dependent lighting preferences were derived. Further studies using an optimised lamp design and dynamically changing light colour are under preparation.

## 8. Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde im Rahmen des TRAFO-Programms des Landes NRW, Projektträger Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF), durchgeführt.

Die Arbeiten wurden materiell, personell und finanziell von der Fa. Bocom GmbH unterstützt.

## 9. Quellenverzeichnis

ASR	Arbeitsstättenrichtlinien
Bocom	Fa. Bocom GmbH, Korschenbroich, Wankelstrasse 13, 41352 Korschenbroich, Tel.: 02182 570 59-0, Fax: 02182 570 59-29, Homepage: <a href="http://www.bocom-farblicht.de">www.bocom-farblicht.de</a> , e-Mail: <a href="mailto:post@bocom-energy.de">post@bocom-energy.de</a>
Boyce	Boyce, Beckstead, et al.: Lighting the graveyard shift: The influence of a daylight-simulating skylight on the task performance and mood of night-shift workers; Lighting Research and Technology; Vol.29; No.3; 1997
DIAL	DIAL GmbH (HG): Licht und Mensch, Ergebnisse eines Experiments; Lüdenscheid, 2003
DIN EN 12464	Licht und Beleuchtung, Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen
DIN 5035	Tageslicht in Innenräumen; Teile 1 bis 6
Ehrenstein	Ehrenstein, Wolfgang: Management der Retinabelichtung (MRL) in viertes Symposium Licht und Gesundheit, Berlin, 2004
Fleischer	Fleischer, Krüger, Schierz: Einfluss von Helligkeit und Lichtfarbe auf den Menschen im Büro; Tagungsband Otti Energie Kolleg - Innovative Lichttechnik in Gebäude, 2000

9. Quellenverzeichnisse

**9. Quellenverzeichnis**

FLG	Informationen zur Lichtanwendung: Schriftenreihe der Fördergemeinschaft Gutes Licht (FGL), Frankfurt/Main
Gall	D. Gall, Welche Lichtfarbe braucht der Mensch ?, Light for Vitality, 7. Nov. 2003, Dresden
Göttsche	Goettsche, Joachim; e.a.: Ergebnisbericht Solar-Campus Jülich, CD-ROM, Solar-Institut Jülich, Fachhochschule Aachen, 2005
Guth	Guth, Angelika; Roenneberg, Till: Können gezielte Lichtbedingungen eine Umstellung auf Nachtschicht erleichtern? In Tagungsband licht, Dortmund 2004
HfB	Lange (Hg.): Handbuch für Beleuchtung, Landsberg 2005
iguzzini	<a href="http://www.iguzzini.com/photos/highres/lucebio/LuceBio_de.pdf">http://www.iguzzini.com/photos/highres/lucebio/LuceBio_de.pdf</a>
Kaase	Kaase (Hrsg.): Erstes Symposium Licht und Gesundheit, Berlin, Februar 2000
Nicklas	Nicklas, M.G.; Bailey, G.B. (1997). "Daylighting in Schools", Strategic Planning for Energy and the Environment; Vol. 17, No. 2; pp. 41-61
Osram	<a href="http://www.osram.de/pdf/service_corner/messe_2004_bunt.pdf">http://www.osram.de/pdf/service_corner/messe_2004_bunt.pdf</a>

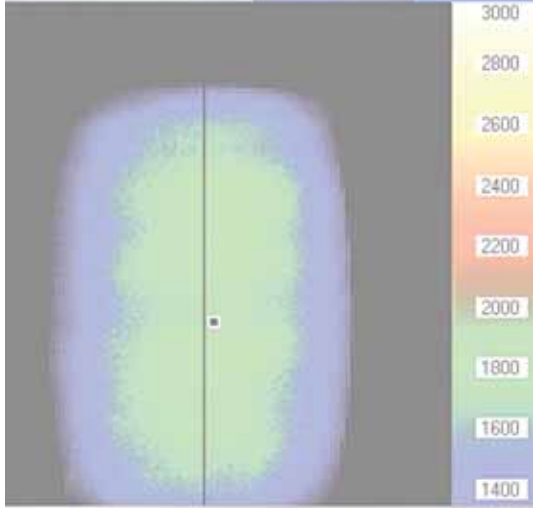
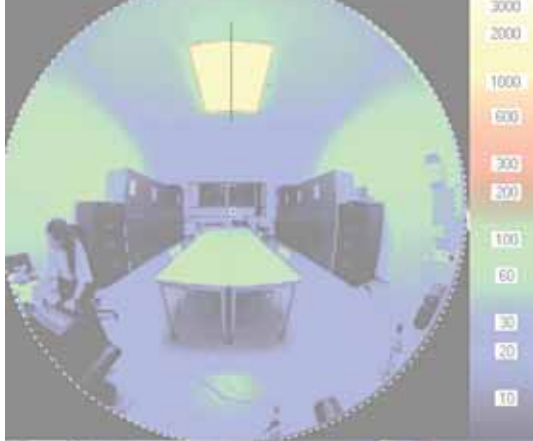
## 9. Quellenverzeichnis

Phillips	<a href="http://www.lighting.philips.com">http://www.lighting.philips.com</a>
Romm	Romm, J.J; Browning, W.D. (1994). "Greening the Building and the Bottom Line: Increasing Productivity Through Energy-Efficient Design," Snowmass, CO: Rocky Mountain Institute.
Rosemann	Rosemann, A.: An den natürlichen Himmel angepasste RGB - Leuchten steuerung; in Elfes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2005
Ross	<a href="http://www.ross-licht.de/pages/fs_dayni.html">http://www.ross-licht.de/pages/fs_dayni.html</a>
Sauer	Markus Sauer: Photobiologische Lichtplanung - Von der Lichttherapie zur Lichthygiene, Tagungsband Otti Energie Kolleg - Innovative Lichttechnik in Gebäude, 2000
Schwarzer	Schwarzer, Klemens; Goettsche, Joachim; Jellinghaus, Sabine; e.a.: Abschlussbericht Licht in Büroräumen - Sonnenschutz, AG Solar NRW, 2004
Truelight	<a href="http://www.ross-licht.de/pages/fs_geslicht.html">http://www.ross-licht.de/pages/fs_geslicht.html</a>
Velasun	VELASUN Solarien & Design GmbH Gottlieb-Daimler-Str. 3, 69514 Laudenbach





# Abschlussbericht März 2006



**bocom**  
Lichttechnik  
Energiespar-Technologien GmbH

**FACH**  
Hochschule Aachen

  
Solar-Institut Jülich