Dipl.- Ing. Karin Bieske, Dr.-Ing. Stefan Wolf, Dipl.-Ing. Rainer Nolte
Technische Universität Ilmenau
Karin.Bieske@TU-Ilmenau.de

Wahrnehmung von Farbunterschieden von Licht- und Körperfarben

1. Einleitung

Für die Realisierung guter Beleuchtungskonzepte sind folgende Aspekte wesentlich:

(1) die Realisierung optimaler Sehbedingungen und eines angenehmen Raumeindrucks
(2) die Berücksichtigung photobiologischer Wirkungen des Lichtes
(3) die Beachtung ökologischer und ökonomischer Randbedingungen

Da sowohl die Sehaufgaben, die Raumatmosphäre und die Lichtverhältnisse bei Tageslicht variieren können und photobiologische Prozesse einer Rhythmik unterliegen, können statische Beleuchtungskonzepte dem nur eingeschränkt gerecht werden. Es ergibt sich die Notwendigkeit der dynamischen Beleuchtung, die Variationen des Beleuchtungsniveaus, der Lichtfarbe und der Lichtverteilung im Raum ermöglicht.

Für die Realisierung solch anspruchsvoller Beleuchtungskonzepte sind grundlegende Kenntnisse über die quantitative und qualitative Wirkung des Lichtes im Hinblick auf das Beleuchtungsniveau und die Lichtfarbe und deren zeitliche Modulation und das Farberscheinungsbild erforderlich. Im Beitrag werden die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zu dieser Problematik vorgestellt.

2. Versuchsaufbau und Methodik

Die Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe, zur Wahrnehmung von Lichtfarbenunterschieden und zur zeitlichen Lichtfarbenvariation wurden in Lichtsimulatoren (Abbildung 1) mit einer Fläche von 80 x 130 cm² durchgeführt. In diesen Simulatoren wurden als Lichtquellen sechs symmetrisch angeordnete RGB-Leuchtstofflampen verwendet, deren Steuerung digital über das DALI Protokoll (**D**igital **A**ddressable **L**ighting **I**nterface) erfolgte. Zur Vermeidung von Reflexionen der farbigen Lampen auf den Begrenzungsflächen wurden die Seitenwände mit Kartonage verkleidet. Die Arbeitsfläche wurde mit einem speziellen Papier ausgelegt, das sich durch nahezu aselektives, diffuses Reflexionsverhalten auszeichnet und hohe Gleichmäßigkeiten ermöglicht.

Mit Hilfe eines geeigneten Farbmisch-Algorithmus war es möglich, Beleuchtungsniveaus zwischen 300 lx bis 1000 lx auf einer Arbeitsfläche von 60 x 80 cm² mit einer maximalen Abweichung von 2 % zu realisieren und auf definierten Farbkurven zwischen 3000 K und 10000 K mit einem mittleren Farbabstand zwischen dem Ist-Farbort und dem Soll-Farbort und $\Delta u'v' = 0{,}001$ zu variieren [1].

Für die Durchführung der Untersuchungen zur Lichtfarbenkombination wurde ein Versuchsraum eingerichtet (Abbildung 2). Die installierten Leuchten waren mit unterschiedlichen Lampenkombinationen bestückt und über ein DALI-Steuermodul separat ansteuerbar. Auf diese Weise war es möglich, definierte Beleuchtungsniveaus und Lichtfarben auf einer Arbeitsfläche zu erzeugen.

Abbildung 1: Proband am Lichtsimulator

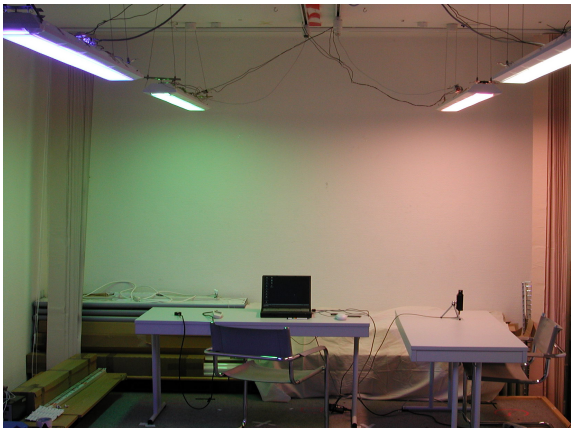

Abbildung 2: Raum für Laboruntersuchungen

Durch zahlreiche Parametervariationen und mehrmalige Wiederholungen wurden umfangreiche Versuchsreihen realisiert. Die Teilversuche erfolgten mit durchschnittlich 20 Probanden in alters- und geschlechtsgemischten Versuchsgruppen. Die erhobenen umfangreichen Daten wurden mittels statistischer Verfahren analysiert und zu Ergebnissen zusammengefasst.

3. Ergebnisse

3.1 Zusammenhang zwischen Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe

Den Probanden wurden für die Beleuchtungsniveaus 300 lx, 500 lx und 1000 lx Lichtfarben im Bereich zwischen 3000 K und 8100 K in Abstufungen von ΔCCT = 300 K entlang des Planckschen Kurvenzuges dargeboten. Von den Versuchspersonen wurde jeweils die angenehmste Lichtfarbe auf der Arbeitsfläche ausgewählt. Ausgangsbedingungen waren die Farbtemperaturen von 3000 K und 8100 K, um den Einfluss der Adaptationsbedingungen einschätzen zu können. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse.

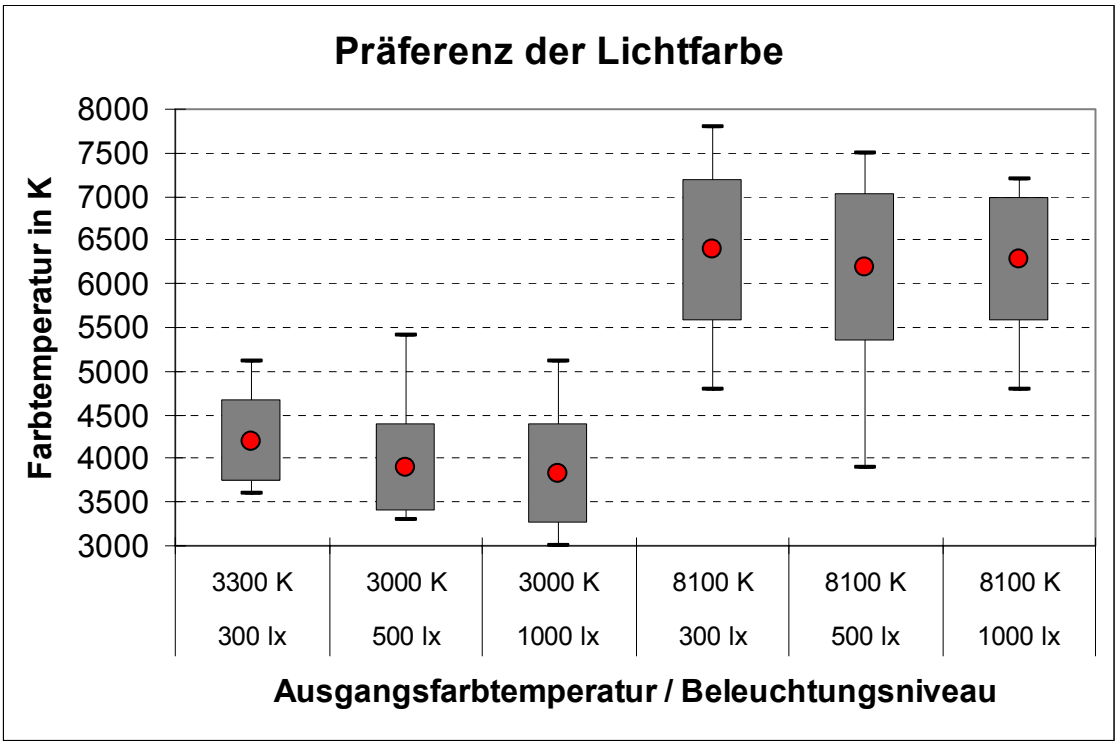

Abbildung 3: Einfluss der Adaptationsbedingungen und des Beleuchtungsniveaus auf die Wahl der bevorzugten Lichtfarbe (Maximalwert, Mittelwert mit +/- Standardabweichung, Minimalwert), 21 Probanden

In den Versuchsreihen konnten die Erkenntnisse von Kruithof, wonach bei niedrigen Beleuchtungsniveaus niedrigere Farbtemperaturen bevorzugt werden und bei höheren Beleuchtungsstärken mit höheren Farbtemperaturen zu beleuchten ist, nicht bestätigt werden. Es ließ sich kein signifikanter Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die Wahl der bevorzugten Lichtfarbe nachweisen, jedoch zeigte sich eine starke Abhängigkeit der gewünschten Lichtfarbe von den Ausgangsbedingungen. Der Variations-

bereich für die Farbtemperatur liegt unter dem Gesichtspunkt des Gefallens im Arbeitsbereich im Mittel zwischen 3800 K und 6500 K, aber es werden auch 3000 K und 7800 K akzeptiert. Die Erkenntnisse decken sich mit den Ergebnissen der Arbeiten von Han und Boyce [2]. Darin wurde die Empfindung von Bürobeleuchtung bei verschiedenen Beleuchtungsniveaus, Lichtfarben und Ausstattungen untersucht und mit den Ergebnissen von Kruithof verglichen. Han und Boyce kamen zu dem Schluss, dass das Beleuchtungsniveau, die Lichtfarbe und die Raumausstattung die Wahrnehmung und Empfindung beeinflussen und dass sich die Abhängigkeit der bevorzugten Lichtfarbe vom Beleuchtungsniveau nicht bestätigt hat. Vielmehr ist der akzeptierte Beleuchtungsstärkebereich zwischen zu hell und zu dunkel im Farbtemperaturbereich zwischen 3000 K und 6500 K stabil und beträgt minimal 300 lx bis maximal 900 lx. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch Bermann [3]. In den Arbeiten von Polle und Pickelein ergab sich auch ein Widerspruch bei warmen Lichtfarben und niedrigen Beleuchtungsstärken im Vergleich zu den Erkenntnissen von Kruithof. Nach ihren Empfehlungen sollten bei indirekter Beleuchtung Lichtfarben zwischen 4000 K und 6000 K bei einem Beleuchtungsniveau von 500 lx eingesetzt werden [4].

Damit ist eine Kopplung der Farbtemperatur an das Beleuchtungsniveau nicht sinnvoll. Eher sollten beide Parameter für den Nutzer frei einstellbar sein. Vor dem Hintergrund gezielter photobiologischer Lichtwirkungen sind Variationsbereiche für Farbtemperatur und Beleuchtungsniveau notwendig.

3.2 Lichtfarbenvariationen

Ermittlung von Lichtfarbensprüngen

In weiteren Untersuchungen stand Schwell- und Toleranzwerte von Lichtfarbenunterschieden bei den Farbtemperaturen 3000 K, 3700 K, 4700 K, 5700 K und 6700 K im Vordergrund. Dafür wurde bei gleichbleibendem Beleuchtungsniveau die Lichtfarbe entlang des Planckschen Kurvenzuges und der Juddschen Geraden variiert und die Wahrnehmungsschwelle für die Kriterien „gerade erkannt“, „sicher gesehen“ und als „störend empfunden“ bestimmt. Dabei wurde die sprunghafte Änderung von einer Ausgangssituation betrachtet. Im Bereich von Beleuchtungsstärken zwischen 300 lx und 1000 lx zeigten sich dabei keine signifikanten Unterschiede [5]. Die Farbortdifferenz bei konstanter Beleuchtungsstärke $\Delta u'v'$ und der Farbabstand ΔE^*_{ab} wurden

nach Gleichung 1 und Gleichung 2 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 und den Abbildung 4 und Abbildung 5 zusammengefasst.

Gleichung 1

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_2 - u'_1)^2 + (v'_2 - v'_1)^2}$$

u'_1, v'_1 *Bezugslichtfarbe*

u'_2, v'_2 *bewertete Lichtfarbe*

Gleichung 2 nach [6]

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2}$$

a^*_1, b^*_1, L^* *Bezugslichtfarbe*

a^*_2, b^*_2, L^* *bewertete Lichtfarbe*

Variation entlang	des Planckschen Kurvenzuges		der Juddschen Geraden	
Kriterium	**Δu'v'**	**ΔE^*_{ab}**	**Δu'v'**	**ΔE^*_{ab}**
gerade erkannt	0,0016	1,9	0,0010	1,6
sicher gesehen	0,0024	3,0	0,0019	2,5
störend empfunden	0,0070	8,0	0,0033	6,0

Tabelle 1: Schwellen- und Toleranzwerte für die Erkennung von Farbunterschieden bei der Variation entlang des Planckschen Kurvenzuges und der Juddschen Geraden, 21 Probanden

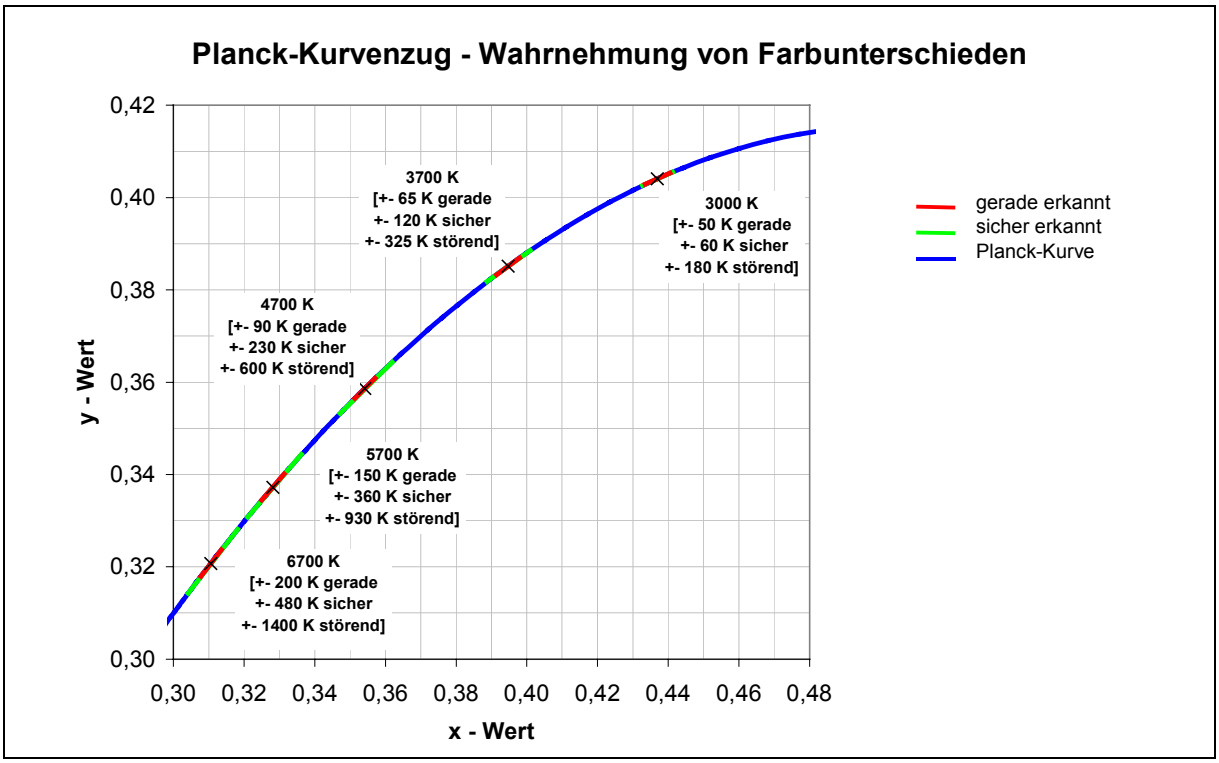

Abbildung 4: Wahrnehmung von Farbunterschieden bei Variation entlang dem Planckschen Kurvenzug (Mediane), 21 Probanden

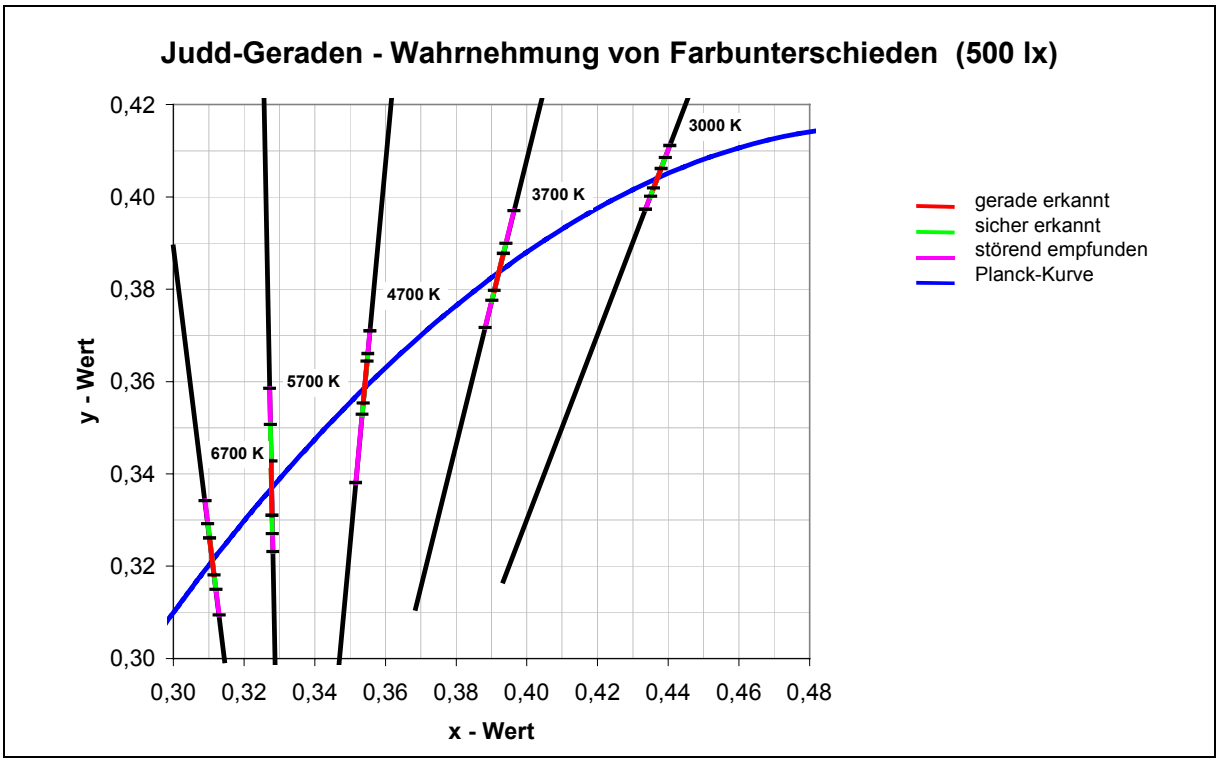

Abbildung 5: Wahrnehmung von Farbunterschieden bei Variation entlang der Juddschen Geraden (Mediane), 21 Probanden

Dynamische Lichtfarbenvariation

Probanden bewerteten die dargebotenen sprunghaften Farbwechsel auf der Arbeitsfläche anhand einer vorgegebenen Bewertungsskala von nicht wahrnehmbar bis unerträglich (Abbildung 6).

1	2	3	4	5	6	7
nicht wahrnehmbar	gerade wahrnehmbar	sicher wahrnehmbar	zunehmend störend	störend	zunehmend unerträglich	unerträglich

Abbildung 6: Skala zur Bewertung der Empfindung

Die Darbietung von Farbsprüngen erfolgte randomisiert mit äquidistanter Schrittwerte mit Sprungweiten von $\Delta u'v' = 0{,}0025$ bis $\Delta u'v' = 0{,}01$ mit einer Stufung von $\Delta u'v' = 0{,}0005$. Für die Untersuchungen wurde die Lichtfarbe im Bereich zwischen 3000 K und 8000 K variiert, wobei beide Änderungsrichtungen in die Untersuchungen einbezogen wurden. Dabei wurden identische Farbwechsel in umgekehrter Reihenfolge dargeboten. Um eine Beeinflussung der Farbadaptation auf die Ausgangslichtfarbe während der Testreihen möglichst gering zu halten, wurden die Haltezeiten

zwischen den Farbwechseln mit konstant 3 s vorgegeben. Die Untersuchungen wurden für die Beleuchtungsniveaus von 300 lx, 500 lx und 1000 lx durchgeführt. Die Variation der Lichtfarbe erfolgte entlang des Planckschen Kurvenzuges.

Im Ergebnis zeigte sich, dass es keinen einfachen Bezug zwischen dem Farbabstand der Sprünge und der Empfindung gibt. Große Farbabstände führen nicht in jedem Fall zu hohen Werten in der Bewertung. Ein signifikanter Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die Farbempfindung konnte nicht nachgewiesen werden und bestätigte damit die Ergebnisse der Untersuchung zur Lichtfarbenpräferenz. Über alle Farbabstände und für beide Änderungsrichtungen zeigten sich nahezu identische Kurvenverläufe [5]. Auffällig war bei einigen Probanden jedoch, dass die Änderungen um so störender empfunden wurden, je weiter man sich von der Start-Farbvalenz entfernt. Hier wirkt sich die nachlaufende Farbadaptation negativ aus. Langsamere Farbveränderungen und eine Einschränkung des Dynamikbereichs können hier Abhilfe schaffen.

Um Aussagen über mögliche Variationswege ableiten zu können, erfolgte die Variation der Lichtfarbe von 3000 K zu 8000 K entlang des Planckschen Kurvenzuges, auf einem linearen Weg und entlang eines Polygons 2. Grades, das sich an die Funktion der +5 Schwelleneinheiten anschmiegt (Abbildung 7). Die Haltezeit zwischen den Farbwechseln betrug 3 s und wurde für einen weiteren Test auf 0,1 s verkürzt.

Die mittlere Bewertung der Farbsprünge für die verschiedenen Wege der Lichtfarbenvariation verlaufen sehr ähnlich, unabhängig von der Variationsrichtung. Innerhalb der +/- 5 Schwellenwert-Einheiten um den Planckschen Kurvenzug ist der Gesamtverlauf der Lichtfarbenvariation bei einer Haltezeit von 3 s demnach für die Beurteilung sprunghafter Farbwechsel nicht entscheidend (Abbildung 8).

Einzelne Probanden gaben bei der Bewertung von Variationswegen, die vom Planckschen Kurvenzug abweichen, Farbnuancen an. Für längere Haltezeiten ist anzunehmen, dass eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Wegen aufgrund der nachlaufenden Farbadaptation unmöglich ist. Bei kurzen Haltezeiten zeigte sich, dass die Farbigkeit des Gesamtverlaufs erfasst wird. In diesem Fall wurde die Variation über dem Planckschen Kurvenzug eindeutig bevorzugt [5].

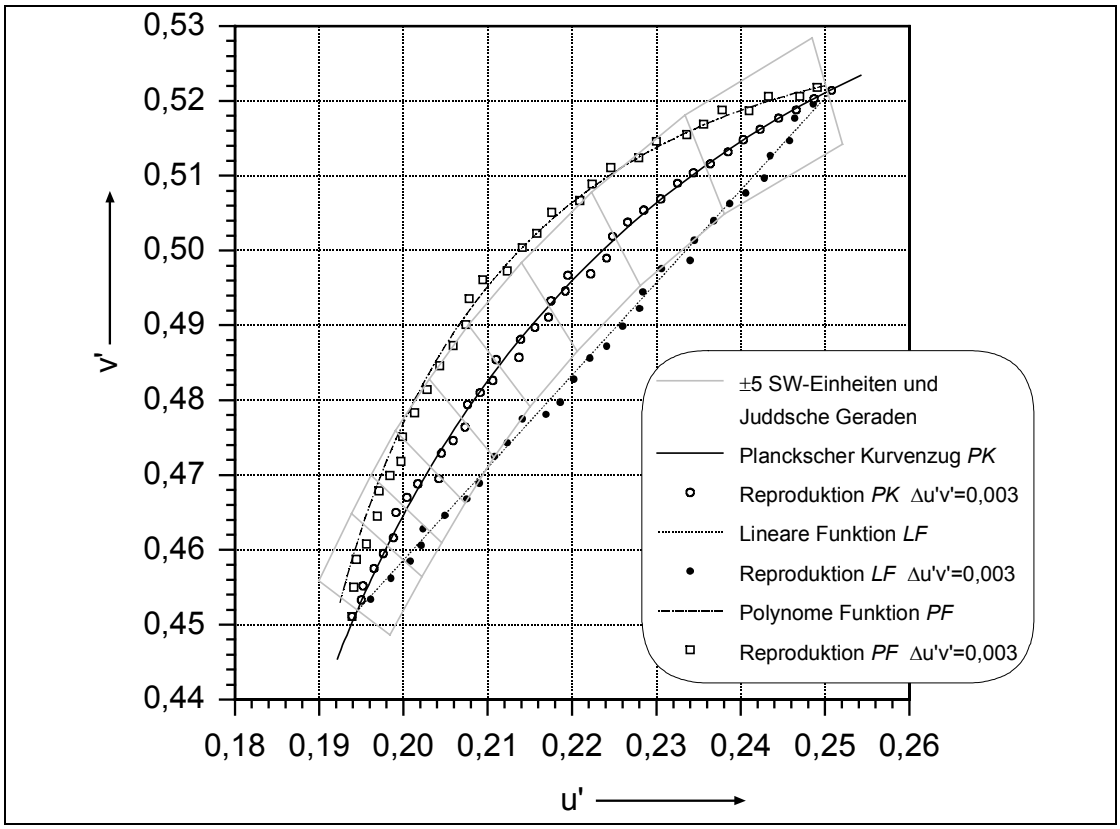

Abbildung 7: Wege zur Variation der Lichtfarbe

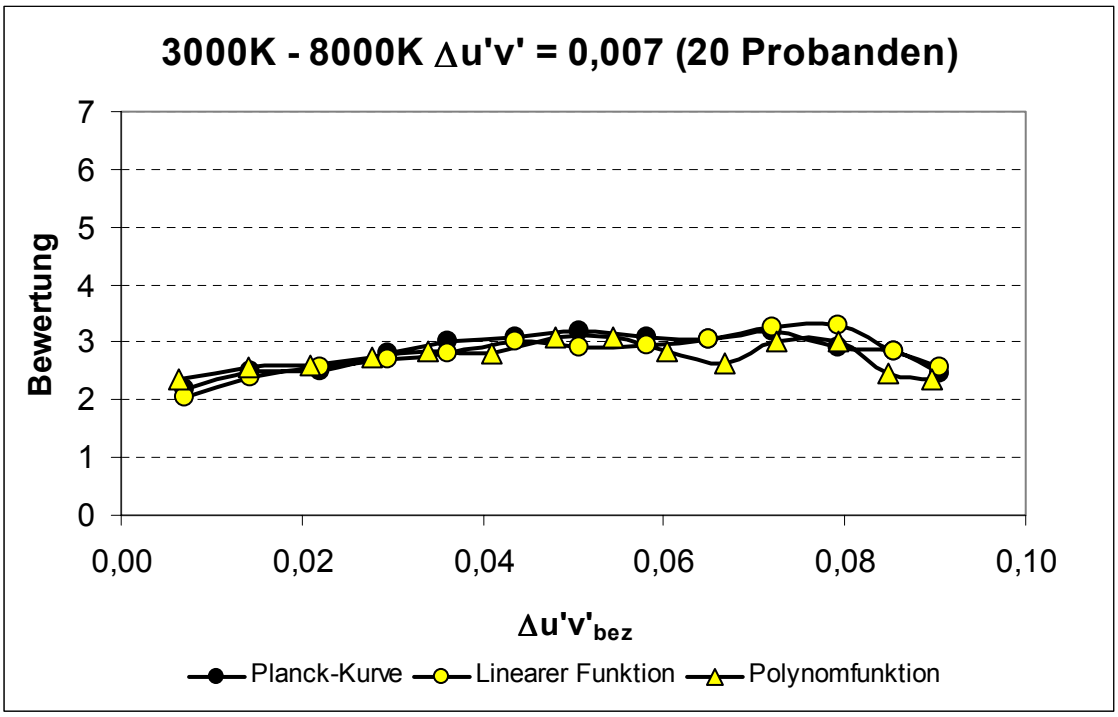

Abbildung 8: Vergleich der mittleren Bewertung für verschiedene Wege der Lichtfarben-variation

3.3 Lichtfarbenkombinationen

Weitere Umgebungslichtfarben wirken sich auf die Lichtfarbenpräferenz so aus, dass große Lichtfarbenunterschiede zwischen den Leuchten innerhalb eines Arbeitsbereichs nicht akzeptiert wurden, sondern ähnliche Lichtfarben für die arbeitsplatzbezogene Beleuchtung und die Allgemeinbeleuchtung bevorzugt wurden [7], [8].

Der Einsatz von mehreren Leuchten in einem Arbeitsbereich, die es erlauben, den Farbort zu variieren, kann je nach Toleranzen in der Fertigung, je nach Anordnung und Ansteuerung der Leuchten im Raum unterschiedliche Farberscheinungen verursachen und zur Bildung farbiger Schatten führen. Mit einem Probandenkollektiv wurden Schwell- und Toleranzwerte für die Schattenbildung auf homogenen Flächen anhand eines Sehobjektes (Abbildung 9) und für Farberscheinungen benachbarter Leuchten in einem Laborraum (Abbildung 2) bestimmt.

Farbige Schatten

Durch die unterschiedliche Ansteuerung benachbarter Leuchten wurden auf einer 200 x 200 mm² großen senkrecht gestellten Fläche auf einer homogenen Referenzfläche mit aselektiven Eigenschaften farbige Schatten erzeugt und von den davor sitzenden Probanden bewertet (Abbildung 9).

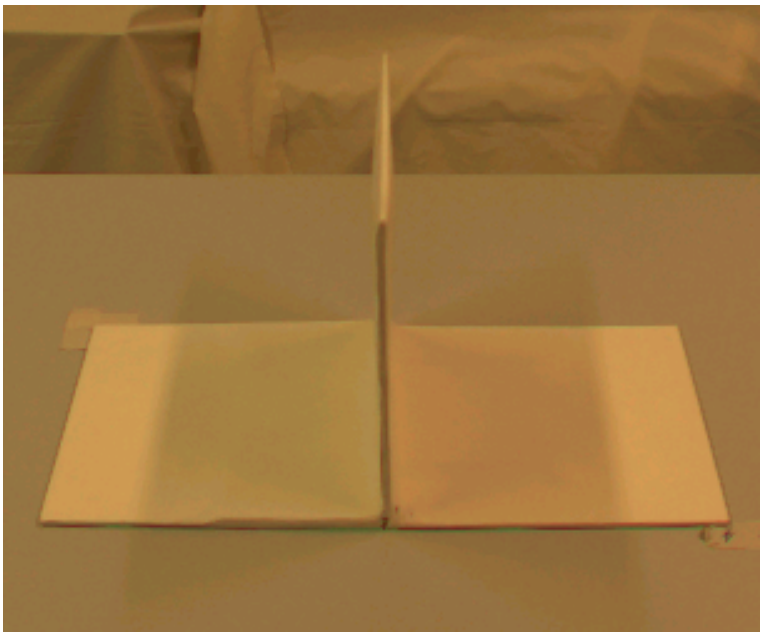

Abbildung 9: Auswirkung der farbigen Schattenbildung an einem Sehobjekt in der Arbeitsebene, für das die Bewertung durch die Probanden erfolgte

Ausgangswerte für die Untersuchung waren ein Beleuchtungsniveau von E = 500 lx und eine Farbtemperatur von CCT = 4000 K, die in die Richtungen rot, grün und blau variiert werden konnte. Die Stufung wurde an der kleinstmöglichen Schrittweite (ΔCCT = 10 K bis 20 K) orientiert, wobei Grenzen durch das digitale Steuerungssystem und die Lichtströme der einzelnen Lampen gesetzt waren. Der Variationsbereich ist in Abbildung 10 dargestellt.

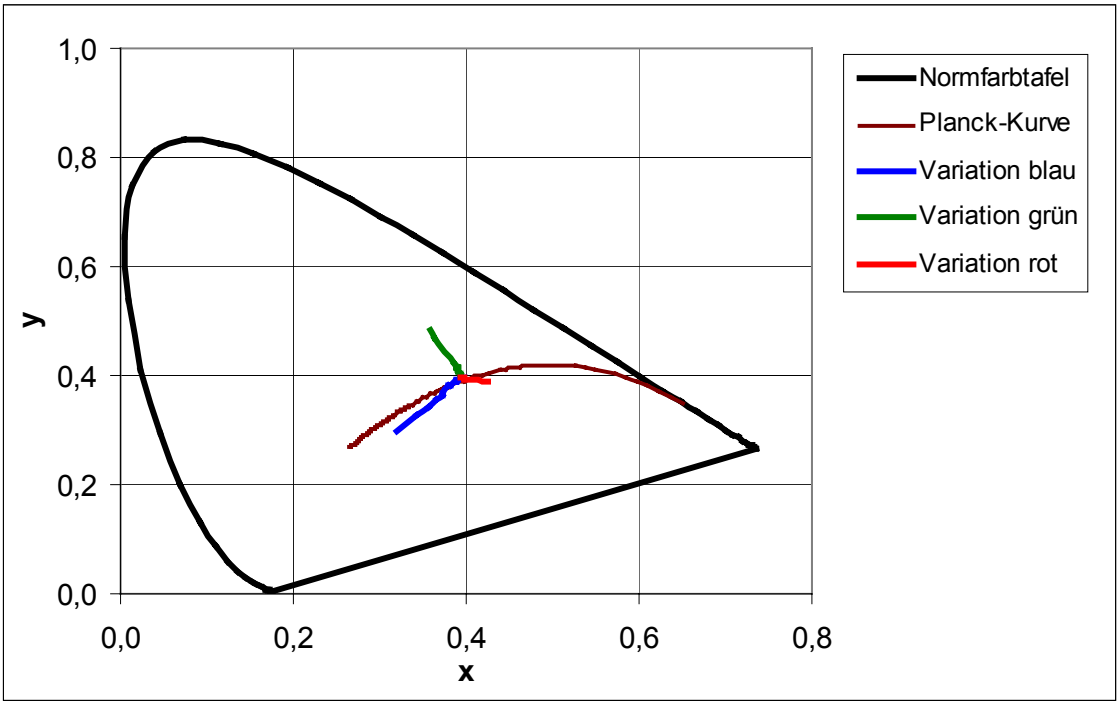

Abbildung 10: Variationsbereich bei der Untersuchung zu farbigen Schatten auf dem Sehobjekt

Tabelle 2 und Abbildung 11 fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen. Die angegebenen Werte wurden aus zwei Versuchsdurchgängen gemittelt.

Kriterium	gerade gesehen	sicher erkannt	störend empfunden
Δu'v' * farbige Schatten	0,0007	0,0020	0,0072
ΔE^*_{ab} farbige Schatten	1,6	2,4	8,9

* Leuchtenabstand: 1,6 m, Höhe über der Arbeitsfläche: 1,4 m

Tabelle 2: Schwellen- und Toleranzwerte für die Erkennung von farbigen Schatten

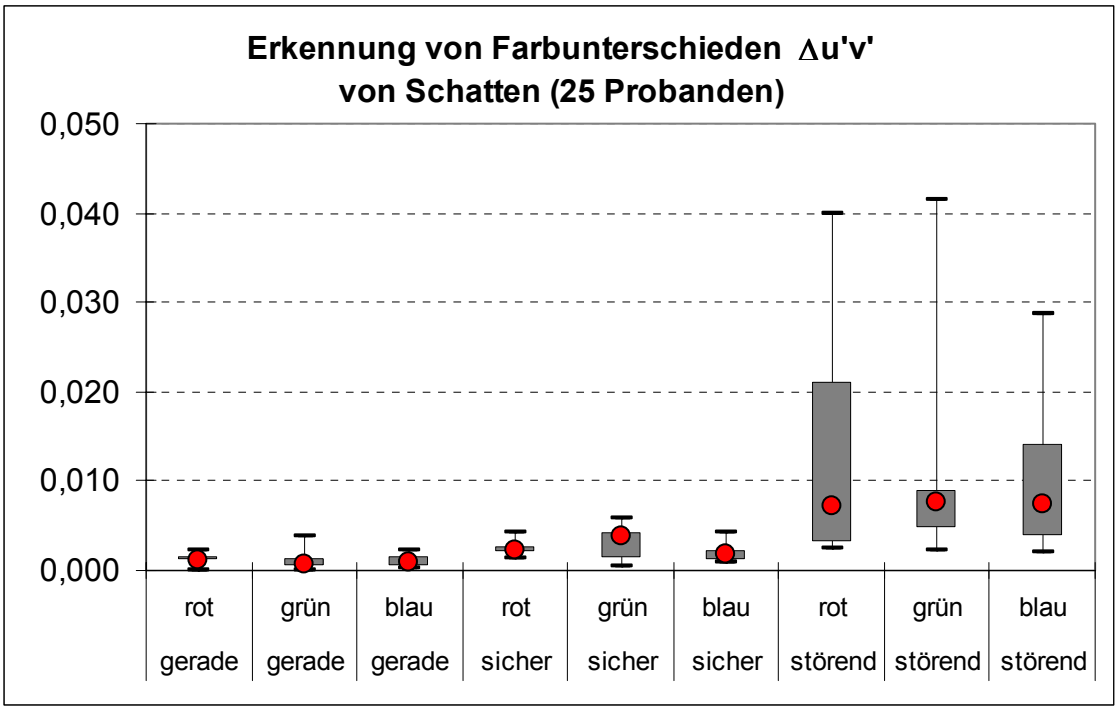

Abbildung 11: Schwellenwerte und Toleranzbereiche bei der Farbunterscheidung farbiger Schatten

Farberscheinungen zwischen Leuchten

In der Mitte des Raumes stehend wurden nebeneinander liegende Leuchten bewertet. Die mittlere Leuchtdichte auf den Leuchtenoberflächen betrug L = 9300 cd/m². Als Vergleichslichtfarbe diente eine Farbtemperatur von CCT = 4000 K. Bezogen auf die weiße Referenzleuchte wurde die Lichtfarbe einer Vergleichsleuchte durch eine Zumischung von Licht roter, grüner oder blauer Leuchtstofflampen schrittweise verändert. Abbildung 12 stellt den Variationsbereich dar. Tabelle 3 und Abbildung 13 fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen. Die angegebenen Werte wurden aus zwei Versuchsdurchgängen gemittelt.

Kriterium	gerade gesehen	sicher erkannt	störend empfunden
Δu'v' * zwischen Leuchten	0,0016	0,0049	0,0100

* Leuchtenabstand: 1,6 m, Höhe über der Arbeitsfläche: 1,4 m

Tabelle 3: Schwellen- und Toleranzwerte für die Erkennung von Farbunterschieden zwischen benachbarten Leuchten

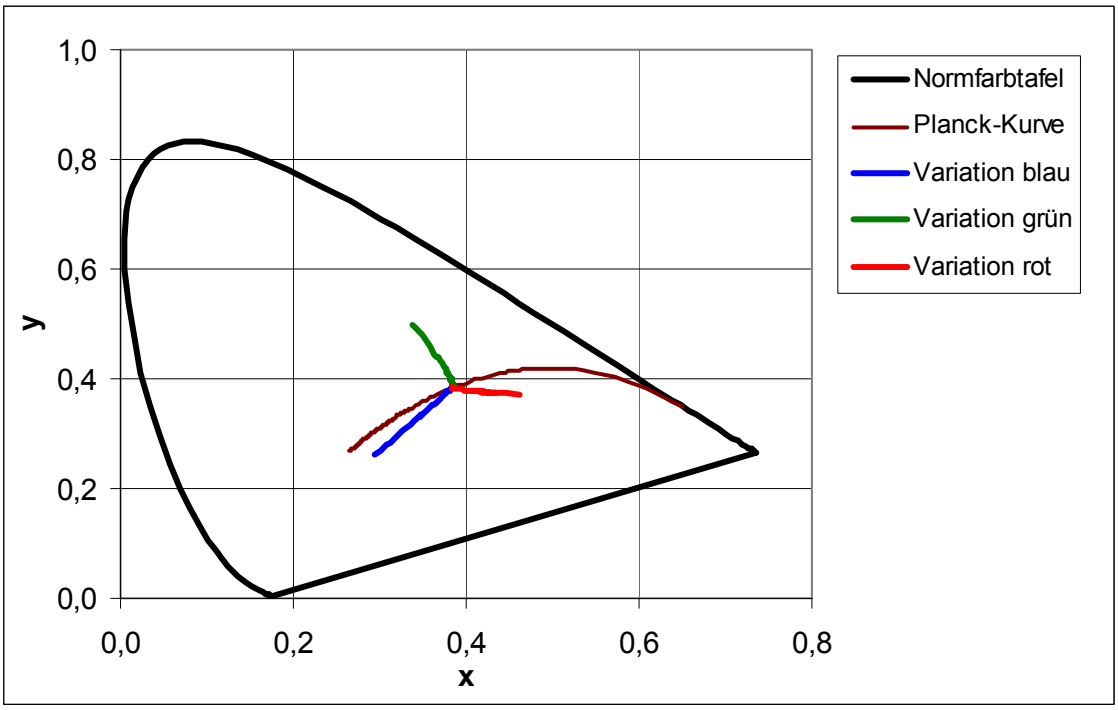

Abbildung 12: Variationsbereich bei der Untersuchung zu Farberscheinungen zwischen benachbarten Leuchten

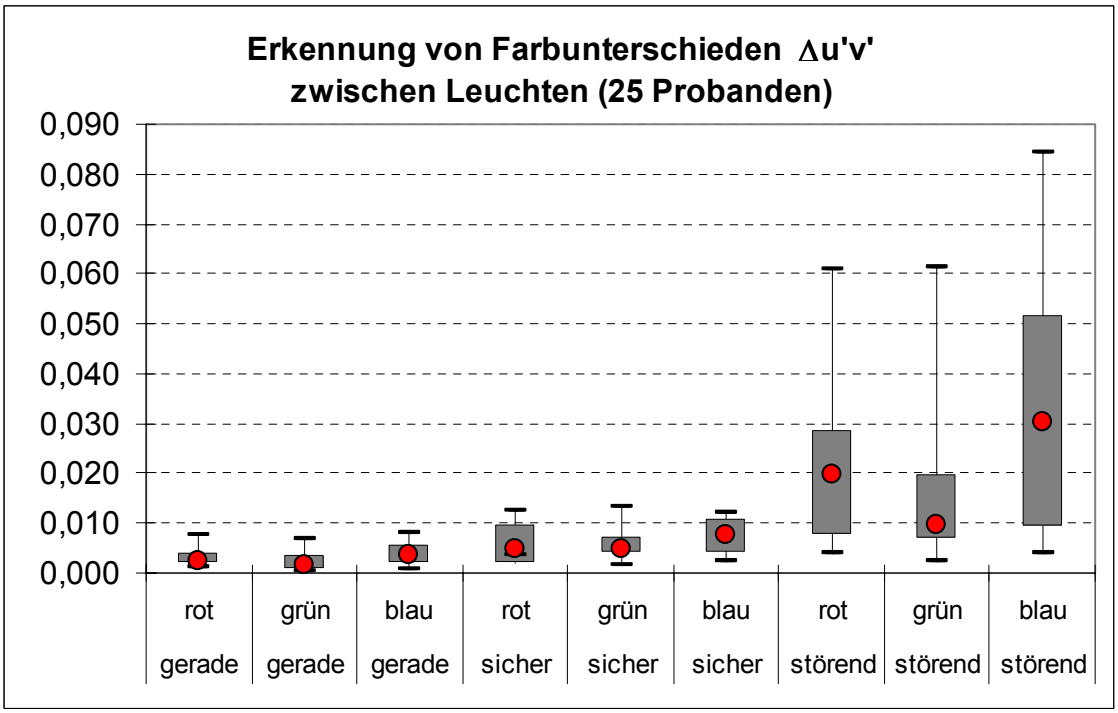

Abbildung 13: Schwellenwerte und Toleranzbereiche bei der Farbunterscheidung zwischen benachbarten Leuchten

Die Schwellen- und Toleranzwerte weisen für Farbunterschiede im Grünen die geringsten Werte auf. Sobald der Blick direkt in Leuchten möglich ist, sollten Farbunterschiede zwischen benachbarten Leuchten nicht größer als $\Delta u'v' = 0{,}010$ sein. Der Blick in die Leuchten erwies sich dabei als weniger kritisch in der Untersuchungssituation, als die Entstehung farbiger Schatten.

4. Zusammenfassung

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen können Steueralgorithmen für dynamische Beleuchtungssysteme entworfen werden.

Die Farbtemperatur sollte zwischen 3000 K und 8000 K liegen. Da kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der präferierten Lichtfarbe nachgewiesen werden konnte, sollten beide Parameter variierbar sein. Für den Farbgang der Lichtfarbenvariation ist eine Abbildung des Planckschen Kurvenzuges nicht zwingend erforderlich, im Hinblick auf schnelle Variationen jedoch empfehlenswert. Prozesse der Farbadaptation müssen bei der Lichtfarbenvariation berücksichtigt werden. Die nachlaufende Farbadaptation kann sich sonst negativ auswirken.

Die Untersuchungsergebnisse müssen jedoch mit neuen Erkenntnissen der chronobiologischen Forschung abgeglichen werden und bedürfen der Überprüfung unter realen Bedingungen.

5. Danksagung

Die im Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des vom VDI geförderten Forschungsprojektes „Effizientes, inkohärentes Beleuchtungssystem zur Erzeugung von Weißlicht mit großer Lichtleistung und intelligenter Steuerung“ im Rahmen der Richtlinie „Kompakte, innovative Photonen-Strahlungsquellen“ erarbeitet.

6. Literaturverzeichnis

[1] KALTENBACH, A.
Demonstratorentwicklung einer circadianen Beleuchtungssteuerung und Untersuchung zur Farbwahrnehmung von Lichtfarbenänderungen.
Diplomarbeit Technische Universität Ilmenau 2005

[2] HAN, S.; BOYCE, P.
Illuminance, CCT, decor an the Kruithof curve.
Proceedings 25th Session of the CIE San Diego 2003, S. D3-178ff

[3] BERMAN, S.M. at all
Photopic luminance does not always predict perceived room brightness.
Lighting Research an Technology 22 (1990)

[4] POLLE, D.; PICKELEIN, A.I
Beleuchtungsniveau und Lichtfarbe
Proceedings Lux Europa 2005, S.379 ff

[5] BIESKE, K.; KALTENBACH, A.
Untersuchungen zur Wahrnehmung von Farbunterschieden.
Lux junior 2005 / Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 23. bis 25. September 2005 Dörnfeld/Ilm

[6] DIN 6174
Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel.
Beuth Verlag Berlin, Januar 1979

[7] MARKYTAN, A.
Untersuchung zur Zonalen-Beleuchtung an Büroarbeitsplätzen.
Forschungsbericht Technische Universität Ilmenau 2003

[8] GALL, D.; VANDAHL, C. u.a.
Einzelplatzbeleuchtung und Allgemeinbeleuchtung am Arbeitsplatz.
Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Fb 753, Wirtschaftsverlag NW Bremerhaven 1996