

3. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs

26. bis 28.9.1997
Freizeitzentrum
Dörnfeld/Ilm



Tagungsberichte

Inhaltsverzeichnis

Schulungsvorträge

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Lindner , Universitätsaugenklinik Magdeburg Sehen und Beleuchtung am Arbeitsplatz	7
Doz. Dr. M. Eckert , TU Dresden Optische Wahrnehmungsprobleme bei der Entstehung und bei der Begutachtung von Dunkelheitsunfällen im Straßenverkehr	13
Dipl.-Ing. D. Lindner , Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig Photometrie in der PTB und Weitergabe photometrischer Einheiten	24
Dr.-Ing. habil. S. Kokoschka , TU Karlsruhe Das $v(\lambda)$ -Dilemma in der Photometrie	34
Doz. Dr.-Ing. habil. W. Richter , TU Ilmenau Geometrische Optik und das Verhalten lichttechnischer Größen	43
Prof. Dr. med. habil. D. Müller , Arztpraxis Ilmenau Licht in der Psychiatrie	51
Dr.-Ing. T. Q. Khanh , München Photobiologisch wirksame Strahlung: Generelle Aspekte - Stand der Normung - Meßverfahren	58

Vorträge

A. Smola , Bratislava (SK) Rationalisierung des Verbrauchs der elektrischen Energie in der öffentlichen Beleuchtung	68
T. Vassileva, N. Yaneva , Sofia (BG) Energy Saving Potential of Electrical Lighting in Bulgaria	74
B. Junghans , Dornbirn (A) Wartung von Beleuchtungsanlagen - eine spezifische Berücksichtigung bei der Planung spart Kosten	82
M. Górczewska, K. Zaranek , Poznań (PL) Energy-Efficient Lighting Program for Power-Station	90
N. Gochev, T. Peycheva , Sofia (BG) Energy-Efficient Luminaires for Residential and Pedestrian Areas	95

D. Gasparovsky, Bratislava (SK) Mathematische Modellierung der Reflektoren von Leuchten	100
B. Kránicz, Veszprém (H) Neue numerische Methoden für Verarbeitung von spektralen Meßdaten	110
O. Schütz, Villingen-Schwenningen Gedanken zur (Ent-)Blendung für Bildschirmarbeitsplätze, insbesondere im Hinblick auf die Umsetzung der EU-RL 90/270	117
P. Schaeffer, Köln Dynamische Blendungsbewertung in Innenräumen	129
S. Wolf, Ilmenau Praktische Messung von Blendungsparametern am Beispiel des UGR	133
R. Lickert, Villingen-Schwenningen Unterschiede im individuellen Blendungsempfinden	139
J. Kuma, Bratislava (SK) Beleuchtung der Jesuitenkirche in Bratislava	146
I. D. Costea-Marcu, A. B. Grad, S. M. Ilie, Bukarest (RO) A new Electronic Ballast	156
M. Košík, O. Vaněk, P. Němeček, Bratislava (SK) Modelling of SiC photodiode by SPICE	160
S. Drawert, Strullendorf Das EVM-Gesetz und seine Probleme in der Praxis für Leuchtenhersteller ..	170
W. Kędziora, M. Zalesińska, M. Sadowska, Poznań (PL) Computer measurement system of deformed courses for discharge lamps ..	177
A. Freiding, Darmstadt Visuelle Führung im Bereich von Arbeitsstellen kürzerer Dauer im nächtlichen Straßenverkehr	182
S. Dietz, Darmstadt Untersuchungen zur Optimierung eines Kraftfahrzeugscheinwerfers bei ein- geschränkter Sichtweite (Nebelsituation)	192
I. Sischka, Aachen Bewertung des Streulichtanteils von beschichteten Lampen beim Einsatz im Kfz-Scheinwerfer	202
M. Sc. P. Orreveteläinen, Helsinki (F) Development of Standard Measurement Methods for Luminous Characterization of Sea Signals	208
S. Völker, Ilmenau Subjektiv gewünschte Beleuchtungsniveaus an Arbeitsplätzen mit geringen Sehanforderungen	216

J. Minnerup, Arnsberg Beleuchtungstechnik im OP-2000.	221
L. Radeva, Sofia (BG) Dimming of the Integral Lighting in Public Buildings.	227
J. Nevoigt, Ilmenau Aspekte der Nutzerakzeptanz bei der Tageslichtbewertung im Innenraum ..	236
K. Wandachowicz, Poznań (PL) Illumination of office romma by the utilisation of daylight	245

Postervorträge

I. Fischbach, Ilmenau Anwendungen angepaßter CCD-Sensortechnik in der orts aufgelösten Lichtmeßtechnik.	250
W. Jordanow, N. Todorov, Ilmenau; O. Schütz, Villingen-Schwenningen Individualität par excellence - oder Eine flexible Technologie zur Erstellung von anpassungsfähigen Softwarelösungen für die Lichtbranche	260

weitere Beiträge

J. Laur, B. Pourat, Reckmingen Photometrische Untersuchungen im extremen Nahfeldbereich	269
---	-----

Sehen und Beleuchtung am Arbeitsplatz

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Ing. H. Lindner
Universitätsaugenklinik
Magdeburg
Leipziger Str. 44
D - 39120 Magdeburg
Tel. 0391-6713585
Fax 0391-6713570

Die Produktions- und Informationstechnologien befinden sich in einer rasanten Entwicklung, die durch Automatisierung und Miniaturisierung verbunden mit höchsten Anforderungen an das Sehorgan gekennzeichnet ist.

Dieser Trend setzt sich gegenwärtig verstärkt in den Schlüsseltechnologien der Mikroelektronik sowohl im Produktionsbereich (Ship-Herstellung) als auch im Anwendungsbereich (Bildschirmarbeit) fort.

Dabei werden die Grenzen der Leistungsfähigkeit des Sehorgans erreicht und oft überschritten. Bis zu 40 - 60 % der in solchen Technologien Beschäftigten geben Sehbeschwerden bei der Arbeit an.

Nur durch Ausschöpfung aller augenoptisch- ophthalmologischen, ergonomischen und licht- und beleuchtungstechnischen Möglichkeiten sind die geforderten Höchstleistungen beschwerdefrei und ohne bleibende Schäden am Sehorgan zu erbringen.

Das Auge ist mit Abstand das wichtigste Sinnesorgan des Menschen, 80-90 % aller Informationen aus der Umwelt sind optischer Natur. Die Kapazität des visuellen Kanals wird mit 65 Mbit/s, die des auditiven Kanals mit 6,025 Mbit/s, die des pallästhetischen Kanals mit 0,05 Mbit/s geschätzt.

Ohne Licht kein Sehen. So kommt dem Licht im allgemeinen und der Beleuchtung im besonderen eine erhebliche Bedeutung für eine optimale Funktion des Sehorgans zu.

Das Licht ist einerseits eine physikalische Größe, die der Beleuchtung und somit einer Optimierung der Sehbedingungen dient. Andererseits ist es über den energetischen Anteil der Sehbahn und die *Formatio reticularis* ein allgemeiner Aktivator, der den Menschen in einen ergotropen Zustand versetzen kann und somit zu einer Allgemeinerhöhung der Leistung, einer Verringerung der Unfallhäufigkeit und einer geringeren Ermüdung beiträgt.

Für die Erkennbarkeit von Sehobjekten (*Visibility*) im Arbeitsprozeß sind eine Reihe von Faktoren wirksam, die sich zu drei Hauptbereichen - Sehleistung, Schwierigkeit der Schaufgabe und Gütefaktoren der Beleuchtung - verdichten lassen. Die nachstehende Tabelle gibt eine komprimierte Übersicht.

Tab. 1 Erkennbarkeit von Sehobjekten (Visibility)

Sehleistung des Beschäftigten	Schwierigkeit der Sehaufgabe	Güte der Beleuchtung
Kontrastempfindlichkeit	Kontrast	Beleuchtungsstärke
Sehschärfe	Sehobjektgröße	Leuchtdichte- verteilung
Wahrnehmungsgeschwindigkeit	Dynamik	Blendungs- begrenzung
Flimmerempfindlichkeit	Farbgebung	Lichtqualität
Gesichtsfeld, Blickfeld, Sehfeld	Darbietungsdauer	Schattengebung
Akkommodation		Beleuchtungssystem
Adaptation		
Farbsehen		

Sehleistung

Die Sehleistung ist eine komplexe Größe, die sich nur durch Ihre Komponenten beschreiben läßt. Dabei besteht das Problem vor allem darin, daß der Anteil der einzelnen Komponenten je nach Spezifität der Sehaufgabe unterschiedlich sein kann.

So ist im nächtlichen Straßenverkehr die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit (oder Kontrastempfindlichkeit) die bestimmende Größe, während es beim Lesen am Tage die Trennsehschärfe ist.

Die *Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit* und die daraus resultierende Wahrnehmung von Leuchtdichte-Unterschieden ist die wichtigste Funktion und die Grundvoraussetzung für das Sehen im Arbeitsprozeß überhaupt. Die Empfindlichkeit des Auges für Leuchtdichteunterschiede ist sehr stark von der Umfeldleuchtdichte und damit von der Arbeitsplatzbeleuchtung abhängig. Sie erreicht zwischen 10^2 und 10^4 cd/m² Maximalwerte.

Die *Sehschärfe* ist die wohl bekannteste Komponente der Sehleistung. Es ist die Fähigkeit, feine Strukturen als solche zu erkennen, das heißt sie aufzulösen. Als Maß wird der Visus verwendet. Ein Fernvisus von 1 bedingt, das auf 5m Entfernung zwei Striche oder Punkte im Abstand von 1,45 mm noch getrennt wahrgenommen werden. Man unterscheidet die Trennsehschärfe, das minimum separabile und die Lesesehschärfe, das minimum legibile. Für viele Schaufgaben im Arbeitsprozeß ist die Noniussehschärfe von Bedeutung. Darunter versteht man die Fähigkeit, die seitliche Versetzung zweier Linien zu erkennen. Die Noniussehschärfe ist 3-10 mal größer als die Trennsehschärfe. Das wird für viele technische Prozesse z.Bsp. bei der Mikrometerschraube genutzt. Mit steigender Umfeldleuchtdichte steigt auch die Sehschärfe.

Die dritte elementare Komponente der Sehleistung ist die *Wahrnehmungsgeschwindigkeit*. Das ist der reziproke Wert der Zeit, der von der Darbietung des Objektes bis zu seiner bewußten Wahrnehmung vergeht.

Sie ist um so größer - je höher das mittlere Leuchtdichteniveau im Gesichtsfeld ist

- je besser das Auge auf das vorhandene Leuchtdichteniveau adaptiert ist
- je größer die zu erkennenden Leuchtdichteunterschiede sind.

Zu den zeitinduzierten Problemen der Wahrnehmung gehört auch die *Flimmerempfindlichkeit*. Auf das Auge periodisch einwirkende Lichtreize werden als getrennte Reize empfunden, sofern die Frequenz der Reizfolge klein genug ist. Die kritische Flimmerverschmelzungsfrequenz (CFF) ist von sehr vielen Faktoren abhängig : z. Bsp. vom Alter, vom Gesichtsfeldort, von der Leuchtdichte, von der Größe der leuchtenen Fläche, vom Verhältnis der Hell - zur Dunkelzeit. Ergophthalmologische Bedeutung hat die Flimmerempfindlichkeit für die Arbeitsplatzbeleuchtung mit wechselladungsbetriebenen Entladungslampen und bei der Bildschirmarbeit. Hier sind Lichtfrequenzen von ≥ 100 Hz anzustreben damit die Flimmerschwelle sicher überschritten wird.

Für eine gute Sehleistung am Arbeitsplatz sind eine Reihe weiterer visueller Faktoren notwendig. Dazu hören das *Gesichtsfeld*, das *Blickfeld* und das *Sehfeld*. Das binoculare Gesichtsfeld erreicht horizontale Werte von 180° und vertikale von 120° . Es wird zum Blickfeld erweitert durch Augenbewegungen. Komfortabel sind Werte für die Augenbewegung von $18-20^\circ$ um die Sehachse. Die dritte Erweiterungsmöglichkeit zum Sehfeld ergibt sich durch Bewegungen des Kopfes. Unter Beachtung dieser Gegebenheiten hat es sich als zweckmäßig erwiesen, das Arbeitsfeld in drei Bereiche zu teilen - das Zentralfeld ($3-4^\circ$), das Infeld (40°) und das Umfeld ($40-160^\circ$).

Voraussetzung für eine beschwerdefreie Arbeit besonders im Nahbereich ist eine ausreichende Akkommodationsfähigkeit bzw. deren Unterstützung durch optische Korrekturen (Brillen) und/oder optische Hilfen (Lupen, Mikroskope).

Um gute Sehleistungen zu erreichen muß das Sehorgan in seinem optimalen *Adaptationsbereich* arbeiten. Dieser liegt bei Hellarbeitsplätzen immer im photopischen Bereich zwischen 10^2 und 10^4 cd/m².

Farbsehen ist für viele Berufe unumgänglich z.Bsp. für alle, die mit Farbänderungen oder Sortierungen zu tun haben. Da sich die Farbe durch drei Komponenten : Farbton, Sättigung, Helligkeit beschreiben läßt, gibt es aber auch für Farbsinngestörte (8% der Männer, 0,5 % der Frauen) Ausgleichsmechanismen.

Schwierigkeit der Sehaufgabe

Die Schwierigkeit der Sehaufgabe läßt sich durch mehrere Komponenten beschreiben. Der *Kontrast* ist eine Beschreibung der Helligkeitsdifferenz der Sehaufgabe gegenüber ihrem unmittelbaren Umfeld. Ist die Leuchtdichte der Sehaufgabe L_1 und die der des Umfeldes L_2 dann lautet eine geläufige Kontrastdefinition

$$K = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2}$$

Man unterscheidet positive - oder negative Kontraste. Bei ersteren ist die Sehaufgabe heller als das Umfeld (Ampel im Straßenverkehr). Beim Negativkontrast ist das Sehobjekt dunkler als das Umfeld (Zeitungsdruck). Der minimal wahrnehmbare Leuchtdichteunterschied unter Tageslichtbedingungen beträgt etwa 1%.

Die *Größe des Sehobjektes* wird durch den Blickwinkel beschrieben, unter dem er dem Beobachter erscheint. Ist a die Größe der Sehaufgabe und l die Sehentfernung dann ergibt sich der Blickwinkel in Minuten zu

$$\alpha = \frac{a \times 360^\circ \times 60'}{l \times 2\pi} = \frac{a \times 10800}{l \times \pi}$$

Die Wahrnehmungsgrenze liegt je nach Visus bei 0,5' bis 1'. Das entspricht bei 33 cm Sehabstand einer minimalen Objektgröße von 0,05-0,1 mm.

Der Schwierigkeitsgrad einer Sehaufgabe wird noch durch eine Reihe weiterer Faktoren gekennzeichnet. Zu diesem gehören die *Dynamik*, das heißt handelt es sich um ein stillstehendes oder ein bewegtes Objekt. Die *Farbe*, die zu einer Verstärkung der Leuchtdichteunterschiede beitragen kann. Die *Dauer der Darbietung* - die Grenzen liegen bei einer Darbietungszeit $< 0,01$ s . Wichtig ist auch, ob der Ort an dem sich das Sehobjekt befindet bekannt ist oder nicht.

Güte der Beleuchtung

Von großer Bedeutung für die Sehleistung am Arbeitsplatz ist die Güte der Beleuchtung. Die Qualität der Beleuchtung wird durch ihre Gütefaktoren bestimmt, die in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Die Anforderung an die Beleuchtungsstärke sind je nach Tätigkeit unterschiedlich und in Normenwerten vorgegeben. Prinzipielle Angaben finden sich in Tabelle 2 .

Tab.2 Arbeitsplatzbeleuchtung nach DIN 5035 - Teil 2

Höhe der Sehanforderung	Nennbeleuchtungsstärke	Beispiel
sehr gering	25 lx	Gänge in Hochregallagern
gering	50 lx	Lagerräume
mäßig	200 lx	Warteräume
stark	500 lx	Buchhaltung
sehr stark	1000 lx	Feinmontage
außerordentlich	1500 lx	optische Prüfung

Die Höhe der Leuchtdichte bei Hellarbeitsplätzen sollte immer im photopischen Bereich liegen und die *Verteilung der Leuchtdichten* zwischen Sehfeld und Umfeld sich in den Grenzen 3 : 1 bis 10 : 1 bewegen.

Jede Lichtquelle kann auch als Blendquelle wirken deshalb ist eine konsequente *Blendungsbegrenzung* sowohl als Begrenzung der Reflektionsblendung als auch der Direktblendung notwendig. Dafür stehen Leuchten mit Spiegelreflektoren zur Verfügung mit denen fast jede Lichtstärkeverteilung erzeugt werden kann.

Die *Lichtqualität* wird wesentlich durch das Spektrum der Lampen bestimmt. Neben der altbekannten Glühlampe und ihrer modernen Nachfolgerin, der Halogenleuchte, gibt es ein weitreichendes Angebot an Entladungslampen mit denen fast jede gewünschte Lichtfarbe realisiert werden kann.

Wegen des möglichen Zusammenhanges zwischen Lichtwelligkeit und asthenopischen Beschwerden sollten Entladungslampen an Hochfrequenzvorschaltgeräten betrieben werden. Damit geht die Lichtwelligkeit praktisch gegen Null.

Für das Erkennen körperlicher Objekte ist auch eine richtige *Schattengebung* von Bedeutung. Eine ausreichende Schattigkeit ist gegeben, wenn die zylindrische Beleuchtungsstärke (das ist die Beleuchtungsstärke, die man als Integral auf einer senkrechtstehenden zylindrischen Empfängerfläche messen kann) das mindestens 0,3- fache der horizontalen Beleuchtungsstärke beträgt.

Schließlich ist auch noch die Art des *Beleuchtungssystems* zu beachten: Es ist zu unterscheiden zwischen Arbeitsplatzbeleuchtung, Allgemeinbeleuchtung, Direktbeleuchtung, Indirektbeleuchtung.

Literatur

1. Meyer Eppler, W.: Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer, 1959
2. Lindner, H.: Der Einfluß des Beleuchtungsniveaus auf geistige Leistungen. Ztschr. gesamte Hygiene - Berlin 19 (1973) 116-119
3. Lindner, H.: Einfluß des Beleuchtungsniveaus auf visuell-motorische Leistungen. Lichttechnik - München 28 (1976) 229-305
4. Lindner, H.: Lichtwelligkeit von Gasentladungslampen (GEL). Licht-München 44 (1992) 631-638

Optische Wahrnehmungsprobleme bei der Entstehung und bei der Begutachtung von Dunkelheitsunfällen im Straßenverkehr

Eckert, Martin, Dr.-Ing. habil. , TU Dresden

1 Einleitung

Dunkelheitsunfälle haben spezifische Merkmale, die sich überwiegend aus den veränderten objektiven Wahrnehmungsbedingungen und den psychophysischen Leistungsvermögen des Menschen unter diesen Bedingungen erklären lassen. Verkehrsunfälle besitzen immer einen komplexen Charakter, d.h. es wirken immer mehrere Komponenten zusammen, die unfallbegünstigend oder unfallauslösend wirken können. Ist bei Tageslicht meist ein Überangebot an visuellen Informationen festzustellen, aus denen der Fahrzeugführer die verkehrsrelevanten Informationen herausfiltern muß, so ist bei Dunkelheit oft ein Mangel an visuellen Informationen vorhanden.

Die Aussage, daß die meisten Unfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen sind, läßt sich aus der Sicht der optischen Wahrnehmungssicherheit folgendermaßen charakterisieren:

- Echtes Versagen des Sinnesorgans in der betreffenden Situation; die optische Information und die Leistungsfähigkeit des Auges reichen nicht aus:

$$\Delta L_{\text{vorh}} < \Delta L_S$$

- Die optische Information reicht aus, aber der Verkehrsteilnehmer nimmt sie infolge Unaufmerksamkeit (subjektiv) oder mangelnder Auffälligkeit des Sehobjekts (objektiv) nicht auf.
- Die optische Information und die Informationsverarbeitung sind vorhanden, der Verkehrsteilnehmer überschätzt jedoch die eigene Leistungsfähigkeit oder diejenige seines Fahrzeugs bzw. unterschätzt die jeweilige Situation.

Die Spezifik der Dunkelheitsunfälle zeigen u.a. folgende statistische Zahlen:

Über 40% aller im Straßenverkehr Getöteten werden in den Dunkelstunden getötet. Die Unfallrate, d.h. die auf die Verkehrsmenge bezogene Anzahl der Verkehrsunfälle (Anzahl der Unfälle pro 10^6 Fahrzeug - km), ist in den Dunkelstunden doppelt so hoch wie in den Hellstunden, was ein doppelt so hohes Unfallrisiko bedeutet.

Auch die Schwere der Unfälle ist in starkem Maße von den visuellen Wahrnehmungsbedingungen beeinflusst und ist in den Dunkelstunden erheblich höher als in den

Hellstunden. Das zeigen u.a. auch die Zahlen der Verunglückten je 1000 Unfälle, die folgende Tendenz aufweisen:

Verunglückte bei Tageslicht	24
Verunglückte bei Dämmerung	32
Verunglückte bei Dunkelheit	52

2 Psychophysische Grundlagen zur Bewertung der Unfallursachen

2.1 Allgemeines

Bei der Untersuchung von Unfällen muß man den gesamten Ablauf des Wahrnehmungsvorganges im Vorfeld eines Unfalls analysieren, d.h. von der ersten Informationsaufnahme bis hin zur motorischen Reaktion. In allen Phasen dieses Vorgangs sind Einflüsse der optischen Wahrnehmung feststellbar.

Die visuellen Aufgaben beim Führen eines Kraftfahrzeugs lassen sich in folgende Phasen unterteilen:

- visuelle Aufmerksamkeit
- visuelles Wahrnehmen (Detektion)
- visuelles Erkennen (Diskrimination)
- Treffen der Entscheidung
- visuell geleitete Reaktion

Bei der *visuellen Aufmerksamkeit* geht es um den Grad der Fähigkeit, sich einer Aufgabe vollständig und konzentriert zu widmen, und zwar mit weniger als der "gesamten" Aufmerksamkeit. Die visuellen Informationen werden periodisch empfangen, und der Fahrzeugführer hat ihre Relevanz für seine Aufgabe, das Fahrzeug sicher zu führen, einzuschätzen. Dabei ist der unerfahrene Fahrzeugführer weniger fähig, die aufgenommenen Reize in dieser Weise schnell zu bewerten. Das Herausfiltern wichtiger Informationen führt zu einer hohen Belastung im Prozeß der Informationsaufnahme und reduziert die visuelle Aufmerksamkeit.

Die Aufmerksamkeit kann somit als Fähigkeit des selektiven Einstellens auf bestimmte Reize und Vernachlässigen anderer Reize verstanden werden. Das ist notwendig, da für ein Verfolgen aller ankommenden Informationen die Informationskapazität nicht ausreicht.

Die *visuelle Detektion (Wahrnehmen)* und das "*Erkennen*" müssen als kontinuierlicher Prozeß aufgefaßt werden. Die Detektionsschwelle eines wahrzunehmenden Gegenstandes wird als minimaler Leuchtdichtekontrast dieses Gegenstandes zur unmittelbaren Umgebung verstanden: Es ist etwas vorhanden, aber es kann nicht identifiziert werden. Für die Detektion sind folgende Größen maßgebend:

- Leuchtdichte des Objekts L_o
- Leuchtdichteunterschied des Gegenstandes zur Umgebung ΔL_{vorh}
- Beobachtungsdauer (Darbietungsdauer)

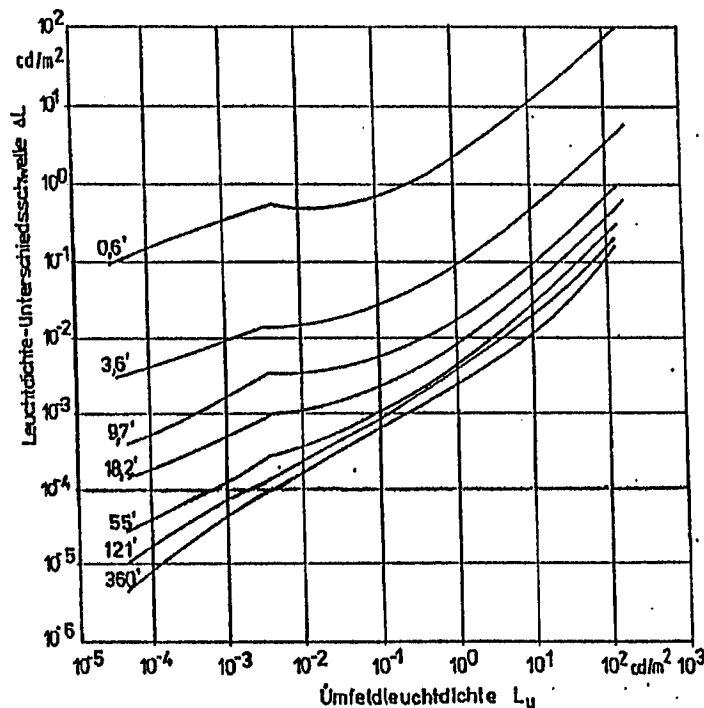


Bild 1 Leuchtdichteunterschiedsschwelle für 50% Wahrnehmungswahrscheinlichkeit als Funktion der Umfeldleuchtdichte und der Testfeldgröße (nach Blackwell/Adrian)

Der in Bild 1 dargestellte Zusammenhang ist die Grundlage für das Wahrnehmen von äußeren Kontrasten. Adrian /1/ hat eine Berechnungsgleichung für die Leuchtdichteunterschiedsschwellen angegeben, die auch bei der Unfallbegutachtung angewendet wird, wobei hier noch ein Praxisfaktor (C) angefügt wird:

$$\Delta L_S = K \left(\frac{A}{\alpha} + B \right)^2 (C) \quad (1)$$

A, B Konstanten

Für den hier interessierenden Bereich gelten folgende Abhängigkeiten:

$$\log A = -0,072 + 0,3372 \log L_u / \text{cd/m}^2 + 0,0866 (\log L_u \text{ cd/m}^2)^2$$

$$\log B = -1,256 + 0,319 \log L_u \text{ cd/m}^2$$

K = 3,1 für nahezu 100%ige Wahrnehmungswahrscheinlichkeit und zur besten Übereinstimmung mit den Berek - Daten

α Schwinkel des Objekts in Winkelminuten

C Praxisfaktor (4 . . . 10)

Dieser gilt für den Unterschied des Schwellenwertes zwischen Labormessungen und praktischen Bedingungen, insbesondere für die Unerwartetheit und die begrenzte Darbietungsdauer im Straßenverkehr

Das *visuelle Erkennen* beinhaltet mehr kognitive Aktivität, das Gedächtnis spielt bei dem Vergleich mit gespeicherten Mustern eine wesentliche Rolle. Dafür reichen "äußere Kontraste" nicht mehr aus. Hier müssen für eine Identifikation "innere Strukturen" erkannt werden. Insbesondere durch die Forderung nach Gesichtserkennung aus einer bestimmten Entfernung ergibt sich hier die Notwendigkeit neuer Gütekriterien für Straßen geringer Verkehrsbelastung, d.h. für Straßen mit dominierendem Fußgängerverkehr, die nicht nach den Kriterien der Leuchtdichtetechnik beleuchtet werden. Diese Forderung hat auch Auswirkungen auf die Gestaltung der Lichtstärkeverteilung der hier zum Einsatz kommenden Leuchten, die bisher häufig nur nach dem Design ausgewählt werden. Auch das *Treffen von Entscheidungen* und die *Reaktion* der Verkehrsteilnehmer sind von den herrschenden Wahrnehmungsbedingungen abhängig, wie neuere Untersuchungen zur Reaktionsdauer in Abhängigkeit von den herrschenden Wahrnehmungsbedingungen zeigen /2/.

2.2 Bestimmung der Erkennbarkeitsweite

Bei der Analyse von Dunkelheitsunfällen, die einerseits der wissenschaftlichen

Erforschung der Unfallursachen dient und andererseits eine praxisrelevante Bedeutung bei der Fragestellung an den Gutachter bei der Unfallrekonstruktion hat:

- Erkennbarkeitsentfernung in der betreffenden Situation ?
- Fahrgeschwindigkeit während der Informationsaufnahme und -verarbeitung ?
- Anhalteweg unter Beachtung eines wahrnehmungsbedingten Reaktionsablaufs ?

Diese drei Faktoren sind eng verknüpft.

Die *Erkennbarkeitsentfernung* wird vom Kontrastsehen abgeleitet. Als Erkennbarkeitskriterien gelten:

$$K_{\text{vorh}} > K_s \quad \text{oder} \quad \Delta L_{\text{vorh}} > \Delta L_s$$

K_s und ΔL_s sind die Schwellenwerte des Kontrastes bzw. des Leuchtdichteunterschieds, wobei ein Sicherheitsfaktor (Praxisfaktor) zu berücksichtigen ist. Dieser wird umso kleiner sein, je genauer die Einflußfaktoren erfaßt werden können.

Setzt man den vorhandenen Kontrast bzw. den vorhandenen Leuchtdichteunterschied gleich dem entsprechenden Schwellenwert, so erhält man die Erkennbarkeitsweite.

Diese läßt sich nach Umstellung der Gleichung (1) bestimmen:

$$\alpha = \frac{A}{\sqrt{\frac{\Delta L_{\text{vorh}}}{KC} - B}} \quad (2)$$

Aus der maßgebenden Ausdehnung des wahrzunehmenden Objekts m erhält man dann die Erkennbarkeitsweite s :

$$s = \frac{m}{\tan \alpha} \quad (3)$$

Voraussetzung für diese Berechnung ist allerdings, daß ΔL_{vorh} und L_u keine Funktionen der Annäherungsentfernung sind. Ist dies nicht gegeben, und das ist häufig der Fall, so läßt sich die Berechnung nur für eine schrittweise Annäherung, d.h. für jeweils einen statischen Fall ausführen oder es gelingt eine dynamische Rekonstruktion mit kontinuierlicher Aufzeichnung der notwendigen Daten (L_u ; L_o).

In jüngster Zeit wurde von Adrian /3/ eine erweiterte Gleichung für die Bestimmung des Schwellenleuchtdichteunterschieds angegeben.

Diese lautet:

$$\Delta L_S = 2,6 \left(\frac{A}{\alpha} + B \right)^2 \frac{a(L_u; \alpha)}{t} CP AF \quad (4)$$

Der Faktor $K = 2,6$ entspricht nach praktischen Versuchen einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 99,9 %. Die Funktion der Darbietungsdauer t ist von der Blondel-Rey-Gleichung abgeleitet. Darin sind die Objektgröße α und die Umfeldleuchtdichte L_u berücksichtigt. CP steht für den "Polarity - Faktor", d.h. ob es sich um einen Positiv - Kontrast oder einen Negativ - Kontrast handelt. AF berücksichtigt das Alter des Beobachters. Alle Abhängigkeiten sind bekannt und werden von Adrian angegeben.

2.3 Einfluß der physiologischen Blendung

Beim Einfluß der Blendung auf den Wahrnehmungsvorgang im Straßenverkehr interessiert in erster Linie die Beeinträchtigung der Sehleistung, d.h. die physiologische Blendung. Üblicherweise wird diese mit der Holladay-Gleichung, d.h. über die Berechnung der äquivalenten Schleierleuchtdichte, berechnet:

$$L_v = K \frac{E_{Bl}}{\Theta^2} \quad (5)$$

Bestimmt man danach die Schwellenwerterhöhung des Leuchtdichteunterschieds ΔI , so treten häufig erhebliche Diskrepanzen zu den visuellen Beobachtungsergebnissen auf. Eben solchen Widerspruch konnte bereits Carraro /4/ bei seinen Laborversuchen zur Adaptationsleuchtdichte feststellen. Er ermittelte dabei folgende funktionelle Abhängigkeit:

$$L_A = 6,1 E_{Bl}^{0,46} \Theta_1^{-0,48} \quad (6)$$

Der Unterschied zur Holladay-Gleichung wird auch in Bild 2 deutlich.

Der Blendwinkel Θ_1 gilt bei 2 Blendquellen für die näher an der Blicklinie liegende Blendquelle. Es zeigte sich, daß eine zweite Blendquelle ($\Theta_2 = 10^\circ$) nur bei relativ hohen Blendbeleuchtungsstärken einen merklichen Einfluß auf die Blendwirkung hat.

Fahrversuche von Kronesser /5/ mit Begegnungssituationen auf der Straße haben ergeben, daß die geringsten Erkennbarkeitsweiten s bei Begegnungsentfernungen von 50 m . . . 100 m je nach Scheinwerfertyp auftraten (Bild 3). Vergleichbare Versuche sind bisher für Kfz - Scheinwerfer mit Xenonlampen nicht bekannt.

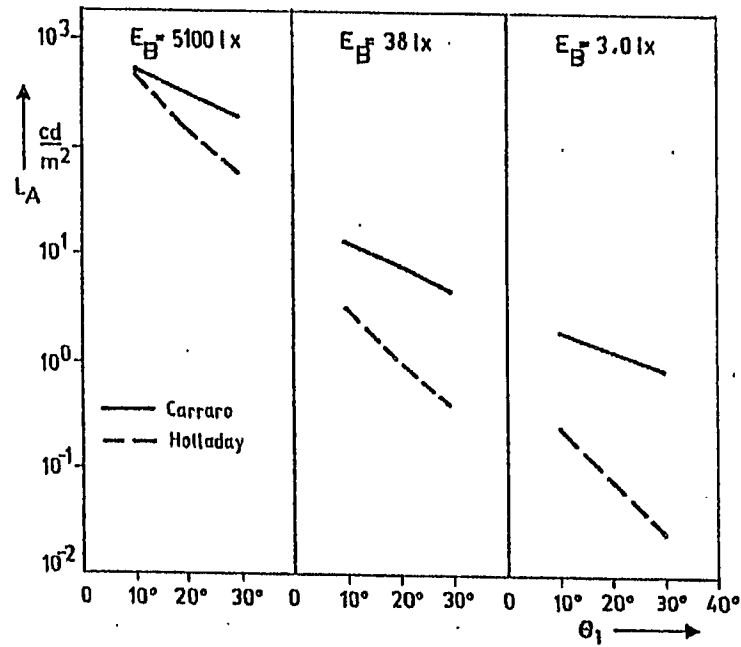


Bild 2 Adaptationsleuchtdichte als Funktion des Blendwinkels Θ_1 mit E_{Bl} als Parameter

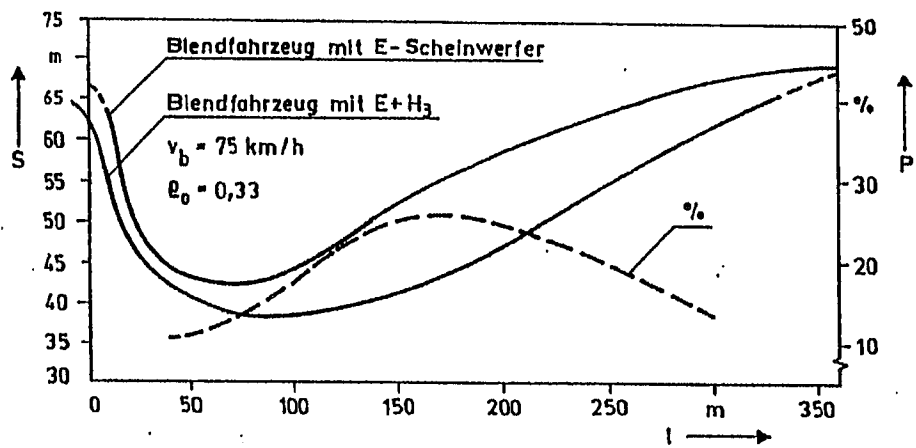


Bild 3 Erkennbarkeitsweite s in Abhängigkeit von der Begegnungsentfernung l bei verschiedenen Kfz-Scheinwerfertypen.

Eine Qualifizierung der Blendungsbewertung auf der Grundlage neuer meßtechnischer Möglichkeiten kann zu einer realeren Bewertung, insbesondere bei Dunkelheitsunfällen,

führen. Die Leuchtdichtemessung mittels CCD-Videokamera scheint hierfür gut geeignet zu sein.

2.4 Blickbewegung

Die visuelle Wahrnehmung geschieht in einer Folge von sprungartigen Augenbewegungen (Sakkaden) und Fixationen (Blicke). Die Dauer einer Sakkade beträgt im Mittel etwa 1/3 s. Der diskontinuierliche Prozeß von "Informationspaketen" und "Lücken" verschmilzt bei der Verarbeitung im Gehirn zu einem scharfen Objektbild. Dabei bildet sich ein trichterförmiges Sichtbarkeitsfeld um die Blicklinie heraus, in dem das wahrzunehmende Objekt fixiert wird und außerdem eine extrafoveale Vorinformation erfolgt. Der Wahrnehmungsprozeß geht folgendermaßen vor sich:

- spontane (meist extrafoveale) Wahrnehmung entsprechend des Blickverhaltens
- sakkadische Augenbewegung hin zum wahrgenommenen Objekt
- foveale Fixation

Aus diesem Ablauf erwächst die Notwendigkeit der Berücksichtigung einer Blickzuwendungszeit bei der Analyse eines Verkehrsunfalls.

Von dem gesamten Gesichtsfeld von etwa 200° wird nur ein kleiner Teil im situationsbedingten Sichtbarkeitsfeld effektiv genutzt. Nach einer Untersuchung von Fleck /6/ beträgt dieser extrafoveale Radiuswinkel $\beta \approx 10^\circ$ (Bild 4).

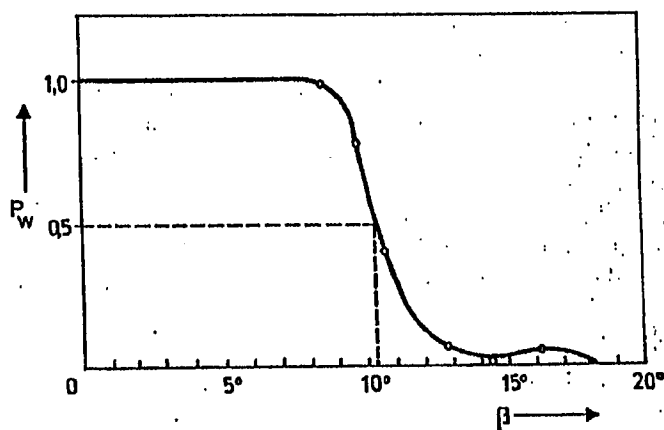


Bild 4 Wahrnehmungswahrscheinlichkeit als Funktion des außeraxialen Seh winkels β
Eine weiteres Ergebnis der Untersuchungen von Fleck bezog sich auf auf die Winkelabhängigkeit von Detektion und Diskrimination (Bild 5). Daraus lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Die Detektion eines Gegenstandes ist durch Kontrasterhöhung bis weit in die Peripherie möglich
- Das Sichtbarkeitsfeld der Diskrimination kann auch durch starke Kontrasterhöhung nicht über einen bestimmten außeraxialen Winkel ausgedehnt werden
- Hintergrundstrukturen stören die periphere Formenwahrnehmung
- Die Helligkeitsvalenz eines peripher wahrgenommenen Gegenstandes kann durch innere Strukturen gesteigert werden

Für den Wahrnehmungsvorgang im Straßenverkehr heißt dies, daß sowohl das periphere Sehen als auch ein möglich großes Sichtbarkeitsfeld von großer Bedeutung sind. Optimale Bedingungen ergeben sich bei strukturierten Infeldern (Objekten) vor neutralen Umfeldern und beim Fernhalten konkurrierender Sehobjekte.

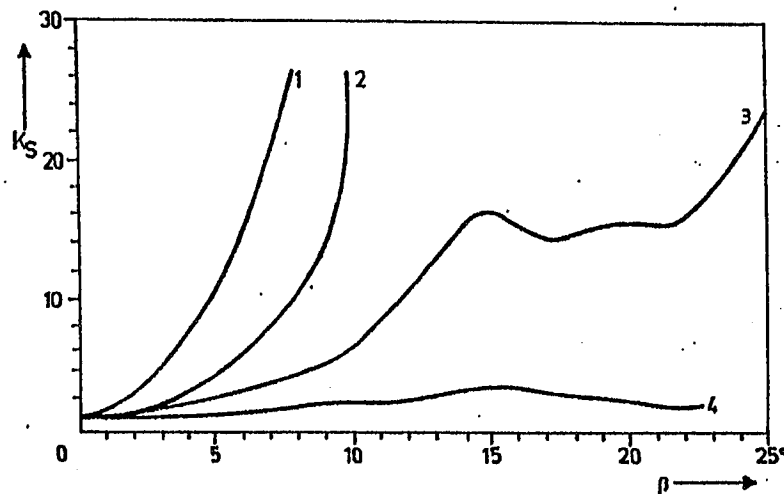


Bild 5 Relativer Schwellenkontrast K_s als Funktion des außeraxialen Winkels β

1 Diskrimination mit Störzeichen; 2 Diskrimination; 3 Detektion Umrisszeichen

4 Detektion Vollzeichen

2.5 Reaktionsdauer in Abhängigkeit von den Wahrnehmungsbedingungen

Eine ganz entscheidende Frage bei der Bewertung von Verkehrsunfällen, im besonderen Maße von Dunkelheitsunfällen, ist diejenige nach der Reaktionsdauer. Fixationsdauer und Amplitude der sakkadischen Blickbewegungen hängen von der herrschenden Gesichtsfeldleuchtdichte ab (Bild 6). Die mittlere Fixationsdauer nimmt bei Dunkelheit zu und gleichzeitig verringern sich die Amplituden der Sakkaden.

Untersuchungen in unserer Einrichtung brachten Ergebnisse über die Abhängigkeit der Reaktionsdauer von den lichttechnischen Bedingungen (Adaptationsleuchtdichte, Kontrast, Sehwinkel, Blickwinkel) /2/. Ein Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt Bild 7.

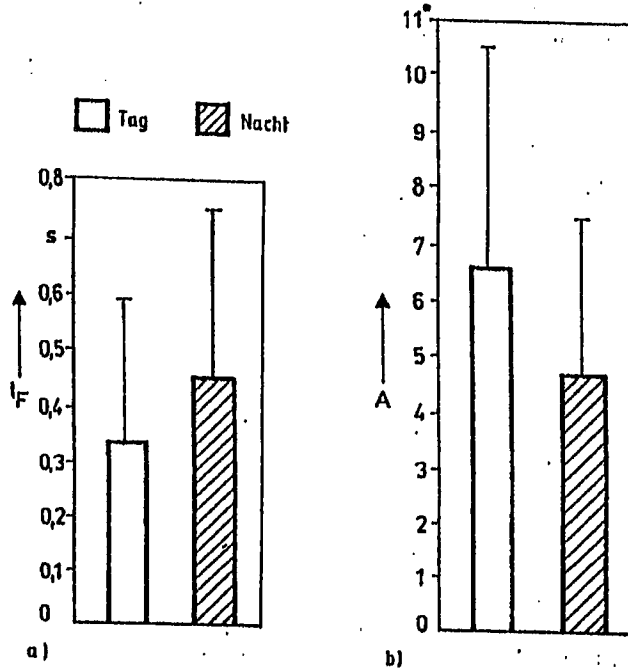


Bild 6 Mittlere Fixationsdauer (a) und mittlere Amplitude (b) der Sakkaden

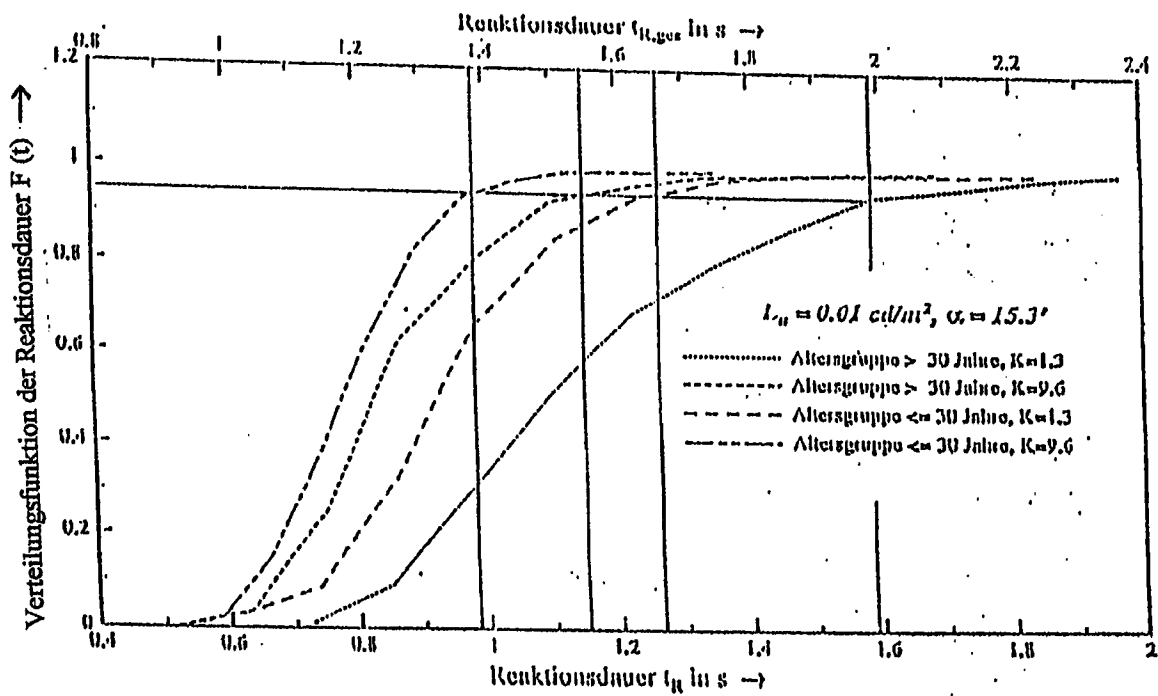


Bild 7 Verteilungsfunktionen von Reaktionsdauern

3 Beispiele für Unfälle bei Dunkelheit

Im Vortrag werden zwei Beispiele von Dunkelheitsunfällen dargestellt, die besonders den Einfluß verschiedener Beleuchtungsvarianten zeigen.

4 Literatur

- /1/ Adrian, W.
Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung
Lichttechnik 21(1969) H. 1 S. 1A - 7A
- /2/ Eckert, M.; Carraro, U.; Rönitzsch, H.
Untersuchung zur Analyse und Bewertung von Dunkelheitsunfällen im Straßenverkehr
Wiss. Zeitschrift Techn. Univers. Dresden 42 (1993) H. 5 S. 29 - 34
- /3/ Adrian, W. und Enzmann, J.
Über die Berechnung der Sichtbarkeit
Tagungsberichte "Licht 94"
Interlaken, 1994 S. 334 - 344
- /4/ Carraro, U.
Untersuchungen zur Adaptionsleuchtdichte für inhomogene Leuchtdichteverteilungen unter Einbeziehung dynamischer Komponenten der Sehaufgabe
Der Ophthalmologe 92(1995) H. 2 S. 148 - 155
- /5/ Kronesser, H.
Der Einfluß der Adaptation des Auges auf die Sichtweite bei der Kraftfahrzeug-Scheinwerferbeleuchtung
Forschungshefte zur Verkehrssicherheit Nr. 2 / 1978
- /6/ Fleck, H.-J.
Periphere Wahrnehmung und Gesichtspunkte für die Darbietung visueller Informationen
Licht 40(1988) H. 5; S. 380 - 384

Photometrie in der PTB und Weitergabe photometrischer Einheiten

Lindner, Detlef, Dipl.-Ing., Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Fachlaboratorium 4.12 / Photometrie, Postfach 3345, 38023 Braunschweig

Ausgehend von den Aufgaben des Fachlaboratoriums Photometrie werden Realisierung der Einheiten wichtiger photometrischer Größen skizziert, Meßmethoden beschrieben und ausgewählte Eigenschaften photometrischer Normale dargestellt.

1. Einleitung

1.1. Aufgaben der PTB

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt ist das nationale Metrologie-Institut der Bundesrepublik Deutschland mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben, also die technische Oberbehörde für das Meßwesen sowie für Teile der Sicherheitstechnik. Sie schafft die Grundlagen für das wissenschaftliche, technische und gesetzliche Meßwesen und übt Kontrollaufgaben auf diesem Gebiet und in der Sicherheitstechnik aus. Die PTB stellt die gesetzlichen Einheiten im Meßwesen dar, betreibt dafür Forschungs- und Entwicklungsarbeiten und führt Prüfungen bzw. Kalibrierungen an Meßgeräten und -einrichtungen durch. Sie wirkt mit in Fachgremien und gesetzgebenden Körperschaften, die sich mit Fragen des Meß-, Normen- und Prüfwesens, der Qualitätssicherung und Sicherheitstechnik befassen. Die PTB ist gegliedert in Fachabteilungen, Fachgruppen und Fachlaboratorien. Weitere Informationen sind auch im Internet unter "<http://www.ptb.de>" abrufbar.

1.2. Aufgaben des Fachlaboratoriums Photometrie

Das Fachlaboratorium Photometrie ist dem Fachbereich 4.1 Licht und Strahlung in der Fachabteilung 4 Optik zugeordnet. Es werden im wesentlichen drei Aufgabenbereiche bearbeitet: Photometrie, Colorimetrie und Reflektometrie. Ansprechpartner sind:

Fachlaborleiter

Dr. Wolfgang Erb, Reg.Dir.
Kösters-Bau, Raum 248
Tel.: +49 531 592 4120
Fax: +49 531 592 4170
e-mail: Wolfgang.Erb@ptb.de

Dr. Georg Sauter, Oberregierungsrat
Kösters-Bau, Raum 110
Tel.: +49 531 592 4121
Fax: +49 531 592 4170
e-mail: Georg.Sauter@ptb.de

Nachfolgend werden die Aufgaben im Bereich Photometrie näher beschrieben. Am wichtigsten ist die Realisierung und Bewahrung der SI-Basis-Einheit für die Lichtstärke, die Candela, mit nationalen Normalen [1]. Darauf basierend werden weitere photometrische Einheiten z.B. für den Lichtstrom, das Lumen, die Beleuchtungsstärke, das Lux und für die Leuchtdichte abgeleitet. Zur Vereinheitlichung im Meßwesen werden durch

die PTB nationale Realisierungen der Einheiten international verglichen sowohl bilateral [2], [3] als auch im Rahmen verschiedener Organisationen, in denen das Fachlaboratorium mitwirkt:

- International: CCPR, ISO, CIE, CORM, OIML, CEN, Euromet, Coomet

- National: DKD, DIN

Außerdem werden Dienstleistungen im Rahmen der technischen Zusammenarbeit des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) erbracht.

Grundsätzlich werden vom Fachlaboratorium Photometrie Einheiten mit Hilfe von Transfer-Normalen, für jedermann, auf Antrag, gegen Gebühr weitergegeben.

2. SI-Basis-Einheit der Lichtstärke

2.1. Realisierung und Bewahrung

Die Definition der Lichtstärke-Einheit wurde - wie bei anderen SI-Einheiten auch - in der Vergangenheit mehrfach geändert, wobei jedoch die Einheit selbst unverändert blieb, d.h. die physikalische Eigenschaft einer Lichtquelle konnte jeweils mit demselben Zahlenwert angegeben werden. Seit 1979 gilt folgende Definition:

Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt durch Steradian beträgt.

Diese Definition ist die spektro-radiometrische Fassung der früheren spektral-integralen Definition (Hohlraumstrahler bei der Temperatur des erstarrten Platins), die Zusammenhänge sind z.B. in [4] dargestellt. Bemerkenswert ist, daß in der Definition selbst keine spektrale Bewertung angegeben ist, ihre Anwendung in der Photometrie aber eine Bewertungsfunktion erfordert [5], z.B. den vereinbarten Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges für Tagessehen $V(\lambda)$.

In der PTB wird die Candela als Ergebnis verschiedener Teilaufgaben realisiert [1]. Einige grundlegende und für die Praxis wichtige Zusammenhänge werden hier angegeben. Die Lichtstärke I_v ist durch das (vereinfachte) photometrische Grundgesetz mit der Beleuchtungsstärke E_v verknüpft, wobei d den Abstand zur Lichtquelle und Ω_0 einen Raumwinkel von 1 sr bezeichnet.

$$I_v = \frac{E_v \cdot d^2}{\Omega_0} \quad \Omega_0 = 1 \text{ sr} \quad (1)$$

Photometrische Größen werden durch Bewertung der entsprechenden spektro-radiometrischen Größen mit $V(\lambda)$ und Multiplikation mit dem Maximalwert des Strahlungsäquivalents $K_m = 683 \text{ lm/W}$ berechnet. Die Lichtstärke ergibt sich so aus der spektralen Bestrahlungsstärke $E_{e,\lambda}(\lambda)$.

$$I_v = K_m \cdot \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \int_0^\infty E_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

Ein Photometer mit einer spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda)$, die sich als Produkt aus einem absoluten Faktor $s(\lambda_d)$ und einer relativen Funktion $s_r(\lambda)$ darstellen lässt

$$s(\lambda) = s(\lambda_d) \cdot s_r(\lambda) \quad \text{mit } s_r(\lambda_d) = 1 \quad (3)$$

liefert ein Ausgangssignal y :

$$y = s(\lambda_d) \cdot \int_0^\infty E_{e,\lambda}(\lambda) \cdot s_r(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

In der PTB werden zur Realisierung der Candela Glühlampen verwendet, deren relative spektrale Bestrahlungsstärke durch eine Strahlungsfunktion $S(\lambda, T)$ für die Verteilungstemperatur T gekennzeichnet ist. Befindet sich die Lampe außerhalb der photometrischen Grenzentfernung im Abstand d zum Photometerkopf und beleuchtet dessen Lichteintrittsfläche senkrecht, so liefert die Kombination von Gleichung (2) und (4) ihre Lichtstärke $I_v(T)$:

$$I_v(T) = \frac{K_m}{s(\lambda_d)} \cdot \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot y \cdot F(T) \quad F(T) = \frac{\int_0^\infty S(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda, T) \cdot s_r(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (5)$$

Die Anpassungskorrektur $F(T)$ ist eine Funktion der Verteilungstemperatur T die den Photostrom so korrigiert, als wäre mit einem ideal an $V(\lambda)$ -angepaßten Photometerkopf gemessen worden. In der Praxis ist die Anpassungskorrektur meist eine monotone Funktion der Verteilungstemperatur und kann z.B. durch ein logarithmisches Polynom ersten Grades hinreichend gut angenähert werden:

$$F(T) = \frac{\int_0^\infty S(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda, T) \cdot s_r(\lambda) \cdot d\lambda} \cong a \cdot \left[\frac{T}{2856 \text{ K}} \right]^m \quad (6)$$

Der Koeffizient a gibt den Wert der Anpassungskorrektur für Normlichtart A an (entsprechend $T = 2856 \text{ K}$), dabei hat die Klammer den Wert Eins.. Den Verlauf der Funktion mit der Verteilungstemperatur beschreibt die Klammer mit dem Anpassungsindex m als Exponenten, der somit eine charakteristische Größe eines Photometerkopfes ist. Eine weitere Charakterisierung ist seine photometrische Empfindlichkeit s_v :

$$\frac{1}{s_v} = \frac{K_m \cdot a}{s(\lambda_d)} \quad (7)$$

Aus den Gleichungen (5) bis (7) folgt die im Fachlaboratorium Photometrie der PTB für die Realisierung der Lichtstärke-Einheit grundlegende Beziehung:

$$I_v(T) = \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \frac{y(T)}{s_v} \cdot \left[\frac{T}{2856 \text{ K}} \right]^m \quad (8)$$

Demnach müssen neben dem Photostrom $y(T)$ folgende Größen bekannt sein:

- photometrische Empfindlichkeit s_v des Photometerkopfes
- Anpassungsindex m zur Korrektur einer spektralen Fehlanpassung
- Wert der Verteilungstemperatur T der verwendeten Lichtquelle
- Abstand d zwischen Lichtquelle und Photometerkopf

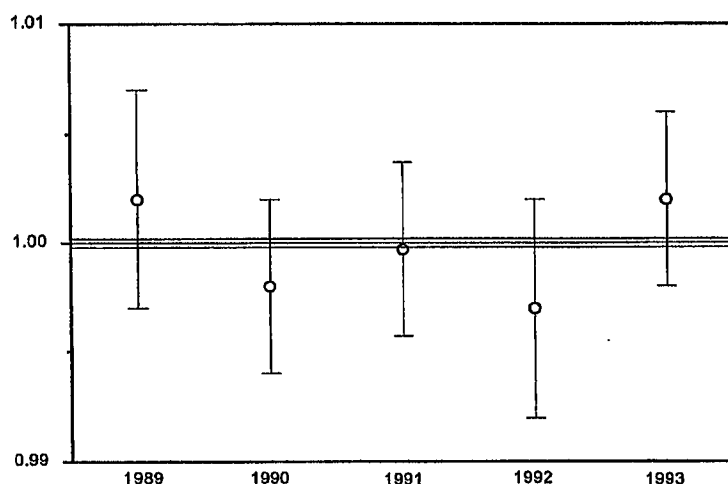
Die Gesamtmeßunsicherheit einer Realisierung der Lichtstärke-Einheit in der PTB beim Vertrauensniveau $k=2$ berechnet sich so zu 0,4 %.

Eine Gruppe von 17 hochstabilen Glühlampen, deren Strahlungsfunktionen der eines Hohlraumstrahlers von 2042 K sehr ähnlich sind, repräsentiert und bewahrt die Einheit der Lichtstärke der PTB. Bei einem Betrieb dieser Lampen von nur 20 Minuten jährlich ergab in den letzten 12 Jahren sich eine Änderung in der Lampenspannung von

$$|\Delta U / U| \leq 3 \cdot 10^{-5}$$

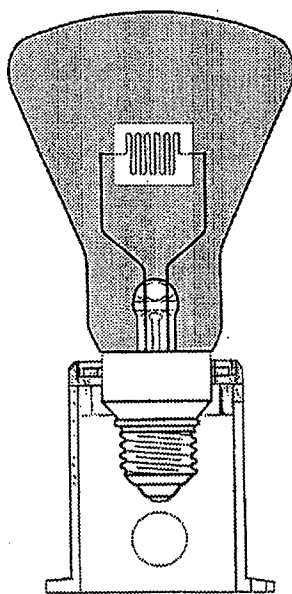
und eine Reproduzierbarkeit für die mittlere Gruppenlichtstärke von

$$\left| \frac{\Delta I_v(2042 \text{ K})}{I_v(2042 \text{ K})} \right| \leq 2 \cdot 10^{-4}.$$



Nebenstehende Abbildung zeigt Ergebnisse jährlicher Realisierungen der Lichtstärke-Einheit $I_v(T)$ der PTB mit Meßunsicherheiten für $k=2$, dargestellt als Verhältnis zur bewahrten Lichtstärke $I_v(2042 \text{ K})$ einer Lampengruppe.

2.2. Weitergabe der Lichtstärke-Einheit



Als Lichtstärke-Normale werden speziell gefertigte Glühlampen mit besonderen optischen, geometrischen und elektrischen Eigenschaften verwendet; z.B. die Lampe Typ OSRAM Wi41/G. Nebenstehende Abbildung zeigt eine solche Lampe, die zur Reduzierung der mechanischen Justierunsicherheit, mit einem Spezialsockel der PTB ausgestattet wurde.

Zur Weitergabe der Lichtstärke-Einheit werden Gruppen solcher Lampen als Lichtstärke-Normale verwendet, wobei auf Verteilungstemperaturen zwischen 2000 K und 2856 K eingestellt werden kann.

Zur Durchführung einer Kalibrierung sind Angaben zur Art der Kalibrierung, zur elektrischen Versorgung der Lampe und zur Geometrie erforderlich. So sollten für die Kalibrierung einer Wi41/G in der PTB z.B. folgende Angaben im Kalibrierantrag enthalten sein: (i) Art der Kalibrierung:

Bestimmung der Lichtstärke bei Normlichtart A und Angabe der Werte für die Lampenstromstärke und Lampenspannung, (ii) Lampenstellung: Sockel unten, in Meßrichtung erscheint die Lampenachse senkrecht, (iii) Meßrichtung: horizontal, durch das Maskenfenster, zentrisch und normal zur Leuchtkörperfläche, (iv) Versorgung: konstanter Gleichstrom, positives Potential am Gewinding; Einstellgröße ist die Lampenstromstärke.

In der PTB erfolgt dann die Bestimmung der Lichtstärke $I_v(T)$ durch den Vergleich mit der Lichtstärke $I_v(T_R)$ eines nationalen Normals und mit Hilfe eines an $V(\lambda)$ -angepaßten Photometers mit den zugehörigen Photoströmen $y(T)$ und $y(T_R)$:

$$I_v(T) = I_v(T_R) \cdot \frac{y(T)}{y(T_R)} \cdot \left[\frac{T}{T_R} \right]^m \quad (9)$$

3. Ableitung und Weitergabe weiterer photometrischer Einheiten

Neben der Einheit für die Lichtstärke sind die Einheiten für Lichtstrom und Leuchtdichte wichtig zur Angabe von Lampeneigenschaften sowie die Einheit der Beleuchtungsstärke zur Kalibrierung von Photometern [6].

3.1. Beleuchtungsstärke

In der PTB werden Beleuchtungsstärke-Meßgeräte mit einem Referenzphotometer in Substitutionsmethode kalibriert, wobei die Lichteintrittsflächen der Photometerköpfe an der selben Stelle, senkrecht und gleichmäßig beleuchtet werden. Dazu wird zunächst das Referenzphotometer (Linearität und Anpassungsindex m bekannt) mit Lichtstärke-Normallampen beliebiger Verteilungstemperatur T kalibriert. Durch Umstellung von Gleichung (8) folgt für seine photometrische Empfindlichkeit:

$$s_v = \frac{d^2}{\Omega_0} \cdot \frac{y(T)}{I_v(T)} \cdot \left[\frac{T}{2856 \text{ K}} \right]^m \quad (10)$$

Auf einer 26 m langen Photometerbank können dann mit beliebigen Glühlampen unterschiedlicher elektrischer Leistung aber bekannter Verteilungstemperatur geforderte Beleuchtungsstärken zwischen 0,001 lx und 10000 lx erzeugt werden. Die Kalibrierung von Beleuchtungsstärke-Meßgeräten erfolgt meistens mit Licht der Normlichtart A. Die Anzeige des zu kalibrierenden Beleuchtungsstärke-Meßgerätes wird mit dem Meßwert der Beleuchtungsstärke E_v des Referenzphotometers verglichen.

$$E_v = \frac{y(T = 2856 \text{ K})}{s_v} \quad (11)$$

3.2. Leuchtdichte

Leuchtdichten homogen leuchtender begrenzter Flächen können aus großem Abstand wie Lichtstärken gemessen werden. Wird z.B. eine kreisförmige Blendenöffnung (zentrisch und senkrecht zur Meßrichtung; Radius r_B) zwischen der leuchtenden Fläche und dem Photometerkopf angeordnet und damit ein Teillichtstrom ausgesondert, so

kann dieser in großem Abstand als Lichtstärke bestimmt werden, und es gilt für die Leuchtdichte L_v der prinzipielle Zusammenhang:

$$L_v = \frac{I_v}{A} = \frac{I_v}{\pi \cdot r_B^2} \quad (12)$$

In der PTB wird zunächst die photometrische Empfindlichkeit s_v des Referenzphotometers wie in Abschnitt 3.1 bestimmt, dann die Lichtstärke nach Gleichung (8) gemessen und schließlich die mittlere Leuchtdichte innerhalb der leuchtenden Fläche A nach Gleichung (12) berechnet.

3.3. Lichtstrom

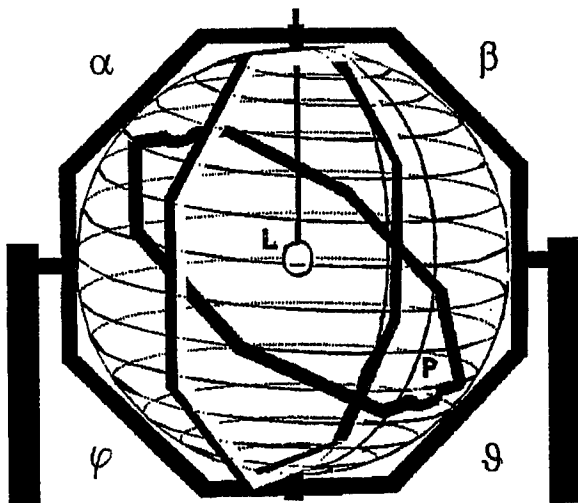
Der Lichtstrom ist die technisch und wirtschaftlich wichtigste photometrische Größe. In der PTB wird mit einem Goniophotometer die Einheit des Lichtstroms fundamental aus der Einheit der Lichtstärke abgeleitet.

Seine Realisierung erfolgt mit goniophotometrischen Methoden als Summe der zu allen Ausstrahlungsrichtungen der Lichtquelle gehörenden Teillichtströme. Führt man Polar-

koordinaten (r, ϑ, φ) ein, so ergibt sich der Gesamtlichtstrom aus der mit dem Goniophotometer (Radius r) gemessenen Beleuchtungsstärkeverteilung $E_v(\vartheta, \varphi)$ und anschließender Integration:

$$\Phi_v = r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi E_v(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta$$

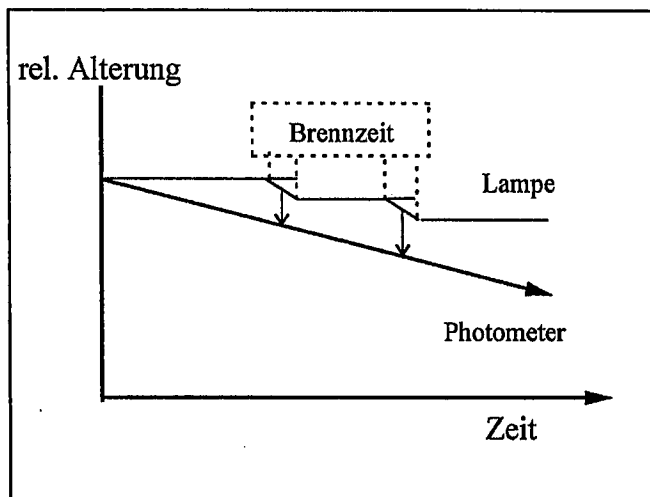
Nebenstehende Abbildung ist eine prinzipielle Darstellung des Goniophotometers der PTB. Es besteht aus drei kardanisch aufgehängten Rahmen, die Lampe L und Photometer P tragen. Äußerer Rahmen



und Lampenhalter geben der Lampe die richtige Brennstellung (α, β) . Die beiden anderen Rahmen (ϑ, φ) bewegen das Photometer auf der Oberfläche einer fiktiven Kugel. Der Radius von 2,5 m ist groß genug, um auch röhrenförmige Leuchtstofflampen bis 2,5 m Länge als Lichtstrom-Normallampen zu kalibrieren.

In der Praxis wird der Gesamtlichtstrom einer Lichtquelle durch Vergleich mit einer Lichtstrom-Normallampe in einer Ulbricht-Kugel bestimmt. Voraussetzung dafür sind große photometrische Ähnlichkeiten beider Objekte hinsichtlich Strahlungsfunktion und richtungsabhängiger Lichtstromverteilung.

4. Einige Eigenschaften ausgewählter photometrischer Normale



Nebensichende Abbildung verdeutlicht, daß Glühlampen praktisch nur während ihrer Brennzeit altern, demgegenüber können Photometer ihre Eigenschaften unabhängig vom Gebrauch verändern. Deshalb sollten photometrische Einheiten mit Normallampen verkörpert und bewahrt werden, sie dienen zum Kalibrieren von Photometern. Kalibrierte Photometer sollten vorzugsweise als Transfer-Normal verwendet werden.

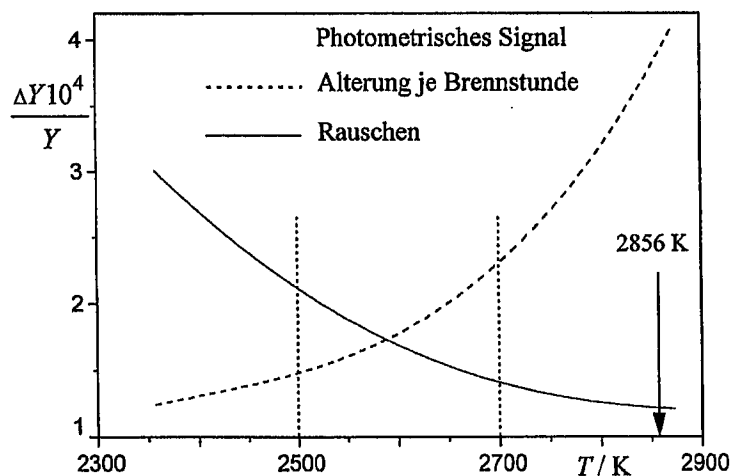
4.1. Lampen

Die von der PTB in Kalibrierscheinen angegebenen Werte für die photometrischen Größen beziehen sich immer auf einen definierten Betriebszustand der Lampe. Ihr momentaner Betriebszustand wird dagegen wesentlich bestimmt durch die

- Zeitspanne seit dem Einschalten
- Betriebszustände bei früheren Brennvorgängen und deren Dauer
- Veränderungen im Lampeninneren durch Lagerung und Transport
- Eigenschaften der verwendeten Meßapparatur

Zur Weitergabe der Lichtstärke-Einheit werden zumeist Lampen des Typs Wi41/G verwendet. Einige charakteristische Eigenschaften dieses Lampentyps werden nachfolgend angegeben.

- Kurzzeitstabilität: $|\Delta I_v / I_v| \leq 2 \cdot 10^{-4}$
- mechanische Justierunsicherheit:
 für Lampe mit E27-Sockel $|\Delta I_v / I_v| \leq 2 \cdot 10^{-3}$
 für Lampe mit Spezialsockel $|\Delta I_v / I_v| \leq 4 \cdot 10^{-4}$
- photometrisches Signal: Alterung je Brennstunde bzw. Rauschen



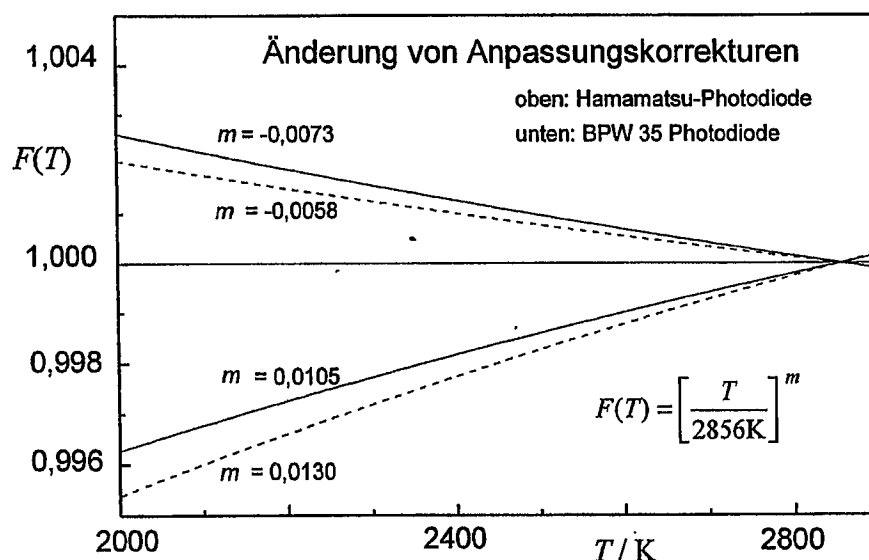
- Richtungsabhängigkeit der Lichtstärke bei Drehung um die vertikale und horizontale Achse in der Leuchtkörperebene: Abhängigkeit überwiegend bei Drehung um die horizontale Achse; für beide Winkel sollte der Justierfehler 1° nicht übersteigen.

4.2. Photometer

Die Beschreibung wesentlicher Eigenschaften von Photometern ist in [7] angegeben. Für die vielfältigen Meßaufgaben werden in der PTB verschiedene Typen von Photometerköpfen eingesetzt. Folgende Tabelle zeigt eine Auswahl bestimmter Eigenschaften. Alle hier aufgeführten Photometerköpfe sind mit Siliziumdioden ausgestattet und werden permanent thermostatisiert.

Lichteintrittsfläche Durchmesser	Bewertung		Empfindlichkeit nA/lx
	spektral	Richtung	
5 mm	Flüssigkeitsfilter		8
10 mm	Vollfilterung	cos-korrigiert	3
	Vollfilterung		25
	Vollfilterung	Streuscheibe	4
15 mm	Vollfilterung		50
30 mm	Vollfilterung	Streuscheibe	25
	Partialfilterung	Streuscheibe	15

$V(\lambda)$ -angepaßte Photometer zeigen häufig Alterungen sowohl ihrer photometrischen Empfindlichkeit als auch der spektralen Anpassung. Diese Veränderungen sind unabhängig vom Gebrauch und treten selbst bei permanenter Thermostatisierung auf. So nimmt die photometrische Empfindlichkeit in der Regel ab, wobei Werte von 0,1 % bis über 1 % pro Jahr beobachtet wurden. Die Alterung der spektralen Anpassung kann durch eine Änderung des Anpassungsindex m besonders einfach angegeben werden.



5. Einige Kalibriermöglichkeiten im Laboratorium Photometrie der PTB

Type of Calibration & Artefact	Units	Measurement Range	Best Measurement Capability ($k = 2$)	Measurement Method
luminous intensity <i>lamps</i>	cd	$1 \cdot 10^{-3}$ cd - 1 cd > 1 cd	0,015 - 0,005 0,004	lamps and photometers
luminous flux <i>lamps</i>	lm	$1 \cdot 10^{-3}$ lm - 1 lm 1 lm - $1 \cdot 10^2$ lm > $1 \cdot 10^2$ lm	> 0,015 0,015 - 0,006 0,006	gonio-photometer
illuminance <i>lamps</i>	lx	$1 \cdot 10^{-3}$ lx - 1 lx 1 lx - $1 \cdot 10^3$ lx > $1 \cdot 10^3$ lx	0,015 - 0,005 0,004 > 0,004	derived from luminous intensity: photometric bench
luminance <i>luminance standards</i>	cd/m ²	1 cd/m ² - $1 \cdot 10^2$ cd/m ² > $1 \cdot 10^2$ cd/m ²	0,02 - 0,008 0,008	derived from luminous intensity: photometric bench
distribution temperature <i>lamps</i>	K	2000 K - 2350 K 2350 K - 2800 K 2800 K - 3400 K	6 K - 3 K 3 K - 6 K 6 K - 15 K	spectral distribution
illuminance <i>meters</i>		$1 \cdot 10^{-3}$ lx - 1 lx 1 lx - $1 \cdot 10^3$ lx $1 \cdot 10^3$ lx - $1 \cdot 10^4$ lx	0,015 - 0,005 0,005 > 0,005	comparison with transfer standards
luminance <i>meters</i>		1 cd/m ² - $1 \cdot 10^2$ cd/m ² $1 \cdot 10^2$ cd/m ² - $1 \cdot 10^3$ cd/m ²	0,02 - 0,01 0,01	comparison with transfer standards
blue/red-ratio <i>meters</i>			equivalent to 6 K - 3 K	blue/red ratio for values of distribution temperature

6. Literatur

- [1] W. Erb, G. Sauter; PTB network for realization and maintenance of the candela; *Metrologia*, 1997, **34**, 115-124
- [2] Ohno Y., Sauter G., 1993, Intercomparison of photometric units maintained at NIST (USA) and PTB (Germany), *PTB-Bericht*, PTB-Opt-42, March 1994
- [3] D. Lindner, R. Stolyarevskaya, G. Sauter, M. Lindemann, Intercomparison of Photometric Units Maintained at VNIIOFI (Russia) and PTB (Germany), *PTB-Bericht*, PTB-Opt-53, December 1996
- [4] Sauter, G., Die Candela: Erläuterungen zum Verständnis der Definition und der Realisierung, 1997, (*PTB-Mitteilungen* im Druck)
- [5] *BIPM Com. Cons. Phot. Radiometrie*, 1982, **10**
- [6] Kohlrausch; *Praktische Physik*; 24. Auflage, 1996, Bd. 2, 196-218
- [7] DIN 5032, Teil 6; Begriffe, Eigenschaften und Kennzeichnung von Photometern

Das $V(\lambda)$ – Dilemma in der Photometrie

Siegfried Kokoschka¹

Zusammenfassung

Es wird das Problem der Leuchtdichte-Helligkeitsrelation farbiger Strahlungen sowie das Konzept zu seiner Lösung dargestellt.

1. Aufgabenstellung

Photometrie im allgemeinen heißt Bewertung der sichtbaren Strahlung gemäß dem Helligkeitseindruck des menschlichen Auges. Photometrie aus technischer Sicht ist enger gefaßt. Hier besteht die Aufgabe darin, die sichtbare Strahlung mit Hilfe von $V(\lambda)$ -angepaßten lichttechnischen Empfängern zu messen.

Nicht so klar ist die Forderung zu interpretieren, die Strahlung gemäß dem Helligkeitseindruck zu bewerten. Otto Reeb z.B. schreibt in seinem 1962 erschienenen Buch *Grundlagen der Photometrie*, ".....zwei photometrisch gleich bewertete Strahlungen sollten auch gleich hell aussehen". /1/. Idealerweise sollten danach 2 verschiedenfarbige Flächen gleicher Leuchtdichte, die nebeneinander unter gleichen Bedingungen direkt beobachtet werden, auch subjektiv gleich hell erscheinen. Heute wissen wir, daß diese strikte Leuchtdichte-Helligkeitsrelation tatsächlich bei weitem nicht erfüllt ist und auch nicht erfüllt sein kann.

Die Erwartung, von Leuchtdichtegleichheit auf Helligkeitsgleichheit schließen zu können, ist von vornherein nur auf den photopischen Bereich oberhalb etwa 10 cd/m^2 beschränkt, wo die Wirksamkeit der 3 Zapfentypen als unabhängig vom Adaptationsniveau angenommen wird. Infolge der Stäbchenwirksamkeit zusätzlich zu den Zapfen im mesopischen Bereich (etwa zwischen $0,001$ und 10 cd/m^2) und erst recht beim reinen Stäbchensehen im skotopischen Bereich (unterhalb etwa $0,001 \text{ cd/m}^2$) verschiebt sich die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion mit abnehmendem Adaptationsniveau kontinuierlich zu kürzeren Wellenlängen, um schließlich in die $V'(\lambda)$ -Funktion überzugehen. Dieser seit langem bekannte Purkinje-Effekt hat zur Folge, daß mehr kurzwellige Strahlung heller erscheint als mehr langwellige Strahlung gleicher Leuchtdichte. /2/.

Aufgabe dieser Arbeit ist, die Ursachen der Unzulänglichkeiten einer $V(\lambda)$ -gemäßen Helligkeitsbewertung und Auswege aufzuzeigen. Beginnen wollen wir im folgenden Abschnitt 2 mit einem kurzen Exkurs über die Methodik der physikalischen Photometrie. Anschließend wird in Abschnitt 3 auf den physiologischen Hintergrund der Helligkeitsbewertung farbiger Strahlung eingegangen. Abschließend wird in Abschnitt 4 das Konzept der äquivalenten Leuchtdichte skizziert, das eine direkte Helligkeitsbewertung bunter Strahlungen im gesamten Adaptationsbereich ermöglicht.

¹ Prof. Dr. Siegfried Kokoschka
Lichttechnisches Institut der
Universität Karlsruhe
Kaiserstr. 12
76 128 Karlsruhe

2. Physikalische Strahlungsbewertung

Lichttechnische Größen wie Leuchtdichte, Lichtstrom, Beleuchtungsstärke und Lichtstärke sind $V(\lambda)$ -bewertete Strahlungsgrößen. Zum Beispiel gilt dann für die Leuchtdichte einer Lichtquelle oder einer beleuchteten Fläche

$$L = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

wobei bedeuten:

L die Leuchtdichte der zu bewertenden Strahlung in cd/m^2

$L_{e\lambda}(\lambda)$ die spektrale Strahldichte der zu bewertenden Strahlung in $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ sr nm})$

$V(\lambda)$ die standardisierte spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges für das Tagessehen

K_m das maximale photometrische Strahlungsäquivalent, das zu 683 lm/W festgelegt wurde

λ_1, λ_2 vereinbarte Wellenlängengrenzen des sichtbaren Bereichs, z.B. $\lambda_1 = 380$; $\lambda_2 = 750$ nm.

Die im Jahre 1924 von der CIE festgelegte $V(\lambda)$ -Funktion wurde inzwischen interpoliert und extrapoliert, so daß ihre Zahlenwerte zwischen 380 und 780 nm im Abstand von 1 nm tabelliert vorliegen. /3/.

Zur Berechnung einer lichttechnischen Größe gemäß Gl.(1) wird die entsprechende spektrale Strahlungsgröße, z.B. die spektrale Strahldichte zur Leuchtdichteberechnung oder die spektrale Strahlungsleistung zur Lichtstromberechnung, Wellenlänge für Wellenlänge mit dem dazugehörigen $V(\lambda)$ -Wert multipliziert, im Bereich zwischen λ_1 und λ_2 aufaddiert und mit K_m multipliziert. Dieses Vorgehen wird auch als Spektralverfahren bezeichnet.

Zur direkten Messung lichttechnischer Größen gemäß Gl.(1) wird ein physikalischer Empfänger benötigt, der möglichst präzise mit Hilfe spezieller Farbfilter an $V(\lambda)$ spektral angepasst ist. Bei linearen Empfängern ist das elektrische Signal je nach Art des Meßgerätes proportional zur jeweiligen lichttechnischen Größe, d.h. zur Beleuchtungsstärke in Lux (lx), zum Lichtstrom in Lumen (lm), zur Lichtstärke in Candela (cd) oder zur Leuchtdichte in cd/m^2 .

Moderne Photometer ermöglichen heute sehr genaue, reproduzierbare und lineare Messungen der lichttechnischen Größen. Die Genauigkeit wird hauptsächlich begrenzt durch den Grad und die zeitliche Konstanz der $V(\lambda)$ -Anpassung.

3. Zur Physiologie der spektralen Hellempfindlichkeit

Die Frage nach der physiologischen Relevanz des photometrischen Systems hängt sicher mit den Eigenschaften und Meßbedingungen der $V(\lambda)$ -Funktion zusammen. Dazu folgende Anmerkungen:

Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen werden mit Hilfe von Helligkeitsabgleichen gemessen. Dabei hat der Beobachter die Aufgabe, in einem Photometerfeld die zu bewertende monochromatische Strahlung gleichhell wie eine konstante, spektral beliebig zusammengesetzte Vergleichsstrahlung einzustellen. Die relative spektrale Hellempfindlichkeit ist dann das Verhältnis der ins Auge gelangenden Strahlungsleistung bei

derjenigen Wellenlänge, bei der die Strahlungsleistung im Abgleichfall minimal ist zur Abgleich-Strahlungsleistung der zu bewertenden Wellenlänge.

Der Abgleich kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Beim sog. heterochromen Direktabgleich werden die im allgemein verschiedenfarbigen Test- und Vergleichsstrahlungen direkt nebeneinander bewertet. Die Problematik dieses Abgleichs war bereits Helmholtz bekannt: "Für mich selbst habe ich den sinnlichen Eindruck, daß es bei heterochromen Helligkeitsvergleichen nicht um eine Vergleichung einer Größe, sondern um das Zusammenwirken von zweien, Helligkeit und Farbglut, handelt, für die ich keine einfache Summe zu finden weiß und die ich auch wissenschaftlich nicht erklären kann". /4/. In der Tat, dieser Abgleich ist unsicher und nichtadditiv. Bei der Variante des sog. Kleinstufenverfahrens erfolgt der Abgleich in mehreren Schritten, bei denen die Vergleichsstrahlung z.B. durch Farbfilter an die Farbe der Teststrahlung angenähert wird. Damit erhofft man sich zuverlässigere Abgleichergebnisse.

Die Unzulänglichkeiten des heterochromen Direktabgleichs hat man von Beginn der wissenschaftlichen Photometrie mit dem sog. Flimmerverfahren zu umgehen versucht. Hier werden die zu vergleichenden Vergleichs- und Teststrahlungen nicht örtlich nebeneinander, sondern oberhalb der Farbverschmelzungsfrequenz aber unterhalb der Helligkeitsverschmelzungsfrequenz zeitlich nacheinander dargeboten. Abgleichkriterium ist minimales Helligkeitsflimmern der vom Beobachter gesehenen Mischfarbe. Die relativ geringen Meßstreuungen und vor allem die Additivität zeichnen dieses Verfahren aus.

Beim in neuerer Zeit entwickelten Trennkantenverfahren werden beide Abgleichfelder wieder örtlich nebeneinander dargeboten. Abgleichkriterium ist hier die minimale Sichtbarkeit der Kante, die beide Abgleichfelder trennt. Auch dieses Verfahren ist relativ zuverlässig und wie das Flimmerverfahren additiv. Bewertungen und Interpretationen der mit diesen und anderen Abgleichkriterien erzielten Ergebnisse waren in der Vergangenheit voller Widersprüche. Soweit der Exkurs über Helligkeitsabgleichungen.

Achromatische und chromatische Helligkeitskomponente

Die heutige Theorie des Sehens geht auf Grund psychophysikalischer und neurophysiologischer Untersuchungen davon aus, daß die elektrischen Signale der 3 Zapfentypen R, G, B in 2 Kanälen vom Auge ins Gehirn übertragen werden. Bild 1. Der sog. Luminanzkanal überträgt die Summe der 3 unterschiedlich gewichteten Zapfensignale, während im sog. Chrominanzkanal 2 antagonistische Farbdifferenzsignale übertragen werden. Wichtig ist, daß der Luminanzkanal für erheblich höhere Orts- und Zeitfrequenzen durchlässig ist als der Chrominanzkanal. Helligkeitssignale werden mit größerer Ortsauflösung und schnellerer Zeitauflösung übertragen als Farbsignale. Ferner wird angenommen, daß sich die wahrgenommene Helligkeit im Sinne der Helmholtz'schen Intuition aus einer achromatischen Komponente des Luminanzkanals und einer chromatischen Komponente des Chrominanzkanals zusammensetzt. Der Effekt, daß somit bunte Strahlung heller empfunden wird, als es ihrer Leuchtdichte entspricht, wird auch als Helmholtz-Kohlrausch-Effekt bezeichnet.

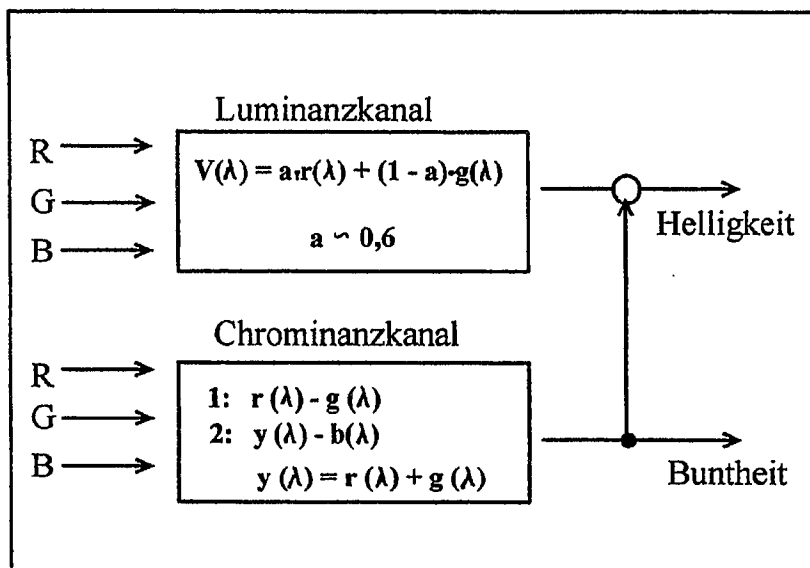


Bild 1:
Schema der 2 Übertragungskanäle des visuellen Systems.

Die hypothetischen spektralen Empfindlichkeiten der 3 Zapfentypen sind mit $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ bezeichnet.

Der Helligkeitsbeitrag der B-Zapfen wurde vernachlässigt.

Damit wird klar, warum die Abgleichergebnisse sich je nach Abgleichkriterium unterscheiden. Beim heterochromen Direktabgleich werden die achromatische und die chromatische Helligkeitskomponente erfaßt. Die Nichtadditivität rührt daher, daß bei einer Farbmischung die Buntheit und somit die chromatische Helligkeitskomponente geringer wird. Beim Flimmerabgleich verschwindet die chromatische Komponente, weil der Chrominanzkanal oberhalb der Farbverschmelzungsfrequenz keine oder nur geringe Rezeptorsignale überträgt.

Zusammenfassend lassen sich für das photopische Sehen 2 Typen von spektralen Hell-empfindlichkeits-Funktionen unterscheiden. Einmal $V(\lambda)$ -ähnliche, bei denen das Abgleichkriterium die Übertragung höherer Orts- und Zeitfrequenzen beinhaltet. Dazu gehören der Flimmerabgleich mit der Übertragung höherer Zeitfrequenzen sowie der Trennkantenabgleich, wo die Wahrnehmung der Kante die Übertragung höherer Ortsfrequenzen erfordert. Dazu gehören aber auch spektrale Empfindlichkeitsfunktionen der Sehschärfe, Kontrastempfindlichkeit und der Flimmerverschmelzungs-Frequenz. $V(\lambda)$ -ähnliche Empfindlichkeitsfunktionen werden auch bei sehr kleinen Abgleichfeldern unterhalb etwa $10'$ und bei extrem kurzen Darbietungszeiten unterhalb etwa 50 ms gemessen. /5/.

Der zweite Typ von spektralen Empfindlichkeitsfunktionen beruht auf der Wahrnehmung von niederfrequenten Vorgängen. Dazu gehört insbesondere der heterochrome Direktabgleich, der neben der achromatischen noch eine chromatische Komponente enthält. Bild 2 zeigt die kürzlich von der CIE eingeführten spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen $V_{b,2}(\lambda)$ und $V_{b,10}(\lambda)$, die nach der Abgleichmethode des heterochromen Direktabgleichs für ein 2° und 10° großes Gesichtsfeld bei fovealer Beobachtung des helladaptierten Auges ermittelt wurden. Wegen der chromatischen Helligkeitskomponente liegen diese Funktionen oberhalb der $V(\lambda)$ -Funktion.

Da die $V_{b,2}(\lambda)$ und $V_{b,10}(\lambda)$ Funktionen nichtadditiv sind, können damit auch keine Mischstrahlungen bewertet werden. Eine Leuchtdichtedefinition gemäß Gl.(1) auf der Basis des heterochromen Direktabgleichs ist nicht möglich.

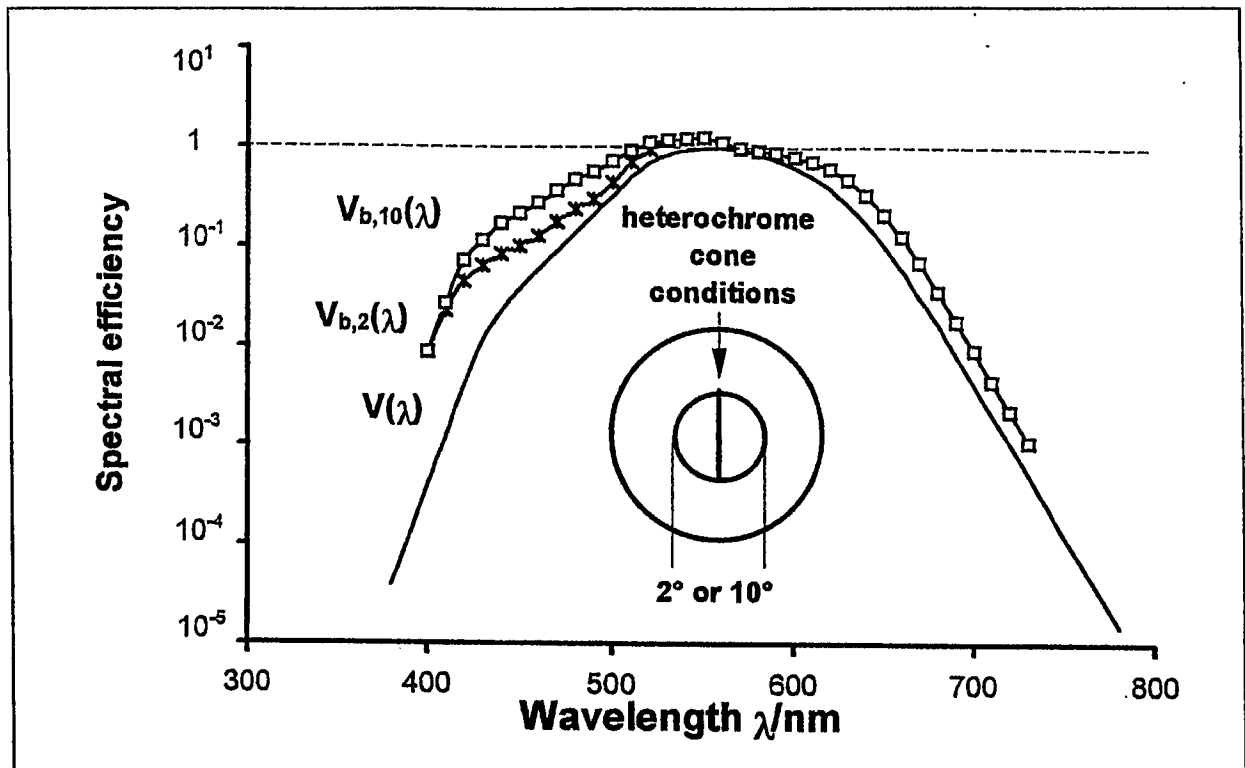


Bild 2:

Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $V_{b,2}(\lambda)$ und $V_{b,10}(\lambda)$ für ein 2° und 10° großes Gesichtsfeld auf der Basis des heterochromen Direktabgleichs. Aus /13/.

Zur $V(\lambda)$ -Bestimmung

Allerdings hat man Anfang der 20ziger Jahre bei der Festlegung der $V(\lambda)$ -Funktion die Dinge nicht so gesehen wie heute. Gibson, Tyndall, Ives und andere, die damals maßgeblich bei der Einführung von $V(\lambda)$ beteiligt waren, haben vermutlich nicht, so wie etwa Helmholtz, zwischen einer achromatischen und chromatischen Helligkeitskomponente unterschieden. Man ging damals davon aus, daß zwischen Flimmer- und heterochromem Direktabgleich kein prinzipieller Unterschied besteht, auch wenn durchaus die größere Zuverlässigkeit des flimmerphotometrischen Abgleichverfahrens gesehen wurde. /7/.

Tabelle 1 ist quasi die Geburtsurkunde der $V(\lambda)$ -Funktion. /8/. Sie enthält einmal je 2 Meßreihen, die flimmerphotometrisch und nach dem Kriterium des heterochromen Direktabgleichs gemessen wurden, wobei allerdings das Kleinstufenverfahren angewendet wurde. Wie ersichtlich, unterscheiden sich beide Kriterien kaum. Bildet man aus diesen 4 Meßreihen den Mittelwert, so erhält man abgesehen vom sehr kurzwelligen Spektralbereich, weitgehend die $V(\lambda)$ -Werte, die in der letzten Spalte enthalten sind.

Tatsächlich wurde also die $V(\lambda)$ -Funktion sowohl mit der Flimmer- als auch mit der heterochromen Abgleichmethode bei Anwendung des Kleinstufenverfahrens gewonnen. Heute interpretiert man die $V(\lambda)$ -Funktion meistens als "überwiegend flimmerphotometrisch" mit einem 2° -fovealen Gesichtsfeld bei hell adaptatierten Auge gemessen. Auch wenn dies im einzelnen nicht immer der Fall war, die $V(\lambda)$ -Funktion wurde durch spätere Untersuchungen im Kern klar bestätigt, wenn man von den zu geringen Werten im Kurzwelligen absieht. Die Annahme, daß Flimmerverfahren und Kleinstufenverfahren nahezu gleichwertig sind, ist aber umstritten. Kohlrausch /9/ sowie Wagner und Boynton /10/ z.B. fanden für das heterochrome Kleinstufenverfahren praktisch die gleichen Ergebnisse wie für das heterochrome Direktabgleichverfahren.

Tabelle 1:

Kopie aus dem Bericht eines Technischen CIE Komitees /8/, in dem die $V(\lambda)$ -Funktion vorgeschlagen wurde. Die Flimmerergebnisse beruhen auf 81, die heterochromen Abgleichsergebnisse auf 146 Versuchspersonen. Einige Versuchspersonen nahmen an mehreren Meßreihen teil. Die vorletzte Spalte enthält einen früheren Vorschlag, die letzte Spalte enthält die $V(\lambda)$ -Werte zwischen 400 und 760 nm im Abstand von 10 nm.

Wave length in milli-microns	Experimental data				Average data	
	Direct-comparison method		Flicker method		I.E.S. adopted mean values 1918†	Proposed revision of I.E.S. values by Gibson and Tyndall‡
	Hyde, Forsythe and Cady	Gibson and Tyndall	Average Ives-Nutting	Coblentz and Emerson		
400	0.00009	0.005	—	0.010	0.0004	0.0004
10	00062	012	—	017	0012	0012
20	0041	022	—	024	0040	0040
30	0115	033	—	029	0116	0116
40	022	043	—	033	023	023
450	036	051	—	041	038	038
60	055	069	—	056	060	060
70	087	103	—	083	091	091
80	138	143	0.152	125	139	139
90	216	196	225	194	208	208
500	323	318	339	316	323	323
10	515	523	527	503	484	503
20	698	732	721	710	670	710
30	847	878	865	862	836	862
40	968	964	953	954	942	954
550	996	998	995	994	993	995
60	995	991	994	998	996	995
70	944	947	950	968	952	952
80	855	863	875	898	870	870
90	735	754	764	800	757	757
600	600	634	636	687	631	631
10	484	511	505	557	503	503
20	341	339	378	427	380	381
30	238	279	271	302	262	265
40	154	184	171	194	170	175
650	094	1125	105	115	103	107
60	051	0642	—	0645	059	061
70	026	0349	—	0338	030	032
80	0125	0178	—	0178	016	017
90	0062	0092	—	0085	0081	0082
700	0031	0045	—	0040	0041	0041
10	0015	0022	—	00203	0021	0021
20	00074	00108	—	00097	0010	00105
30	00036	00051	—	00048	00052	00052
40	00018	00026	—	00028	00025	00025
750	00009	00014	—	00020	00012	00012
60	00005	00007	—	—	00006	00006

* Unity at wave length of maximum visibility.
† Maximum at 556 mμ.
‡ Maximum at 555 mμ.

Worin besteht das sog. $V(\lambda)$ -Dilemma

Einerseits hat die physikalische Photometrie mit Hilfe $V(\lambda)$ -angepaßter Empfänger einen hohen Stand der Technik erreicht. Das zweite Ziel der Photometrie, die Strahlung gemäß dem Helligkeitseindruck zu bewerten, ist jedoch bei weitem noch nicht in Sicht. Das ist letztlich ein unbefriedigender Zustand.

Die Ursache dafür liegt nicht in prinzipiellen Unzulänglichkeiten der $V(\lambda)$ -Funktion begründet. Man muß sich nur darüber im klaren sein, daß $V(\lambda)$ nur die achromatische Helligkeitskomponente enthält und daß damit die visuellen Grundfunktion wie Sehschärfe, Kontrastempfindlichkeit und Flimmerverschmelzungsfrequenz zumindest im photopischen Bereich spektral richtig beschrieben werden. Eine direkte Helligkeitsbewertung aber ist mit dem $V(\lambda)$ -System grundsätzlich nicht möglich.

4. Konzept der äquivalenten Leuchtdichte

Der Ausweg aus dieser Schwierigkeit kann nicht in der Einführung eines neuen photometrischen Systems liegen. Spektrale Hellempfindlichkeits-Funktionen auf der Basis eines heterochromen Direktabgleichs, z.B. unter mesopischen Adaptationsbedingungen oder im Photopischen bei größeren Gesichtsfeldern gemessen, sind nur zur Bewertung spektraler aber nicht zusammengesetzter Strahlung geeignet. Der Ausweg liegt allein darin, die direkte Helligkeitswirkung unter gegebenen, spezifischen Bedingungen nach dem Substitutionsprinzip durch eine gleichhelle Leuchtdichte auf der Basis der $V(\lambda)$ -Funktion zu beschreiben. Das ist das Konzept der äquivalenten Leuchtdichte. /11/, /12/, /13/.

Die äquivalente Leuchtdichte ist im Internationalen Wörterbuch der Lichttechnik definiert als die gleichhelle Leuchtdichte einer Vergleichsstrahlung der Verteilungstemperatur des erstarrenden Platins, heute 2045 K. Künftig wird vermutlich als primäre Vergleichsstrahlung eine monochromatische Vergleichsstrahlung von 555 nm definiert werden. Je nach Anwendungsfall kann aber eine äquivalente Leuchtdichte auch auf andere Vergleichsstrahlungen bezogen werden, z.B. bei der Bewertung von Körperfarben auf die beleuchtende Lichtart.

Die Messung der äquivalenten Leuchtdichte erfolgt, indem in einem Photometerfeld die Vergleichsstrahlung heterochrom gleich hell wie die zu bewertende Strahlung eingestellt wird. Die Leuchtdichte der Vergleichsstrahlung ist dann die äquivalente Leuchtdichte der Teststrahlung.

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Modellen zur Bestimmung der äquivalenten Leuchtdichte bei Berücksichtigung des Purkinje- und des Helmholtz-Kohlrausch-Effektes entwickelt, die vom CIE Komitee TC21/37 getestet werden. /14/.

Im Prinzip kann eine äquivalente Leuchtdichte einer zu bewertenden Strahlung durch spezielle Gewichtung der Leuchtdichte dieser Strahlung bestimmt werden, d.h.

$$L_{eq} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot L \quad (2)$$

Dabei bedeutet f_1 eine Funktion zur Beschreibung des Purkinje-Effektes, f_2 beschreibt den Helmholtz-Kohlrausch-Effekt und der Faktor f_3 hängt vom Spektrum der gewählten Vergleichsstrahlung ab. Er ist 1 für eine Vergleichsstrahlung von 555 nm./13/.

Bild 3 zeigt als typisches Beispiel die äquivalente Leuchtdichte von bunten Körperfarben bei Beleuchtungsniveaus zwischen 0,1 bis 1000 lx. Dabei hatten 12 Versuchspersonen die Aufgabe, diejenige Grauprobe auszuwählen, die gleichhell wie die zu bewertende Körperfarbe erscheint, deren Farbmaßzahlen Tabelle 2 enthält. Zum Beispiel wurde bei einer Beleuchtungsstärke von 1000 lx auf den Proben, also im Photopischen, für die blau aussehende Probe mit der Munsell-Notation 10B5/10 das Ergebnis $L_{eq}/L = 1,2$ erhalten. Das bedeutet, daß die Leuchtdichte der grauen Vergleichsprobe 20 % größer sein muß als die der blauen Probe, damit beide gleichhell erscheinen, bedingt durch die chromatische Helligkeitskomponente bzw. den Helmholtz-Kohlrausch-Effekt. Bei dem mesopischen Beleuchtungsniveau von 0,1 lx ist das Verhältnis L_{eq}/L auf etwa 1,9 angestiegen, bedingt durch die Verschiebung der spektralen Hellempfindlichkeit zum Kurzwelligen hin bzw. den Purkinje-Effekt.

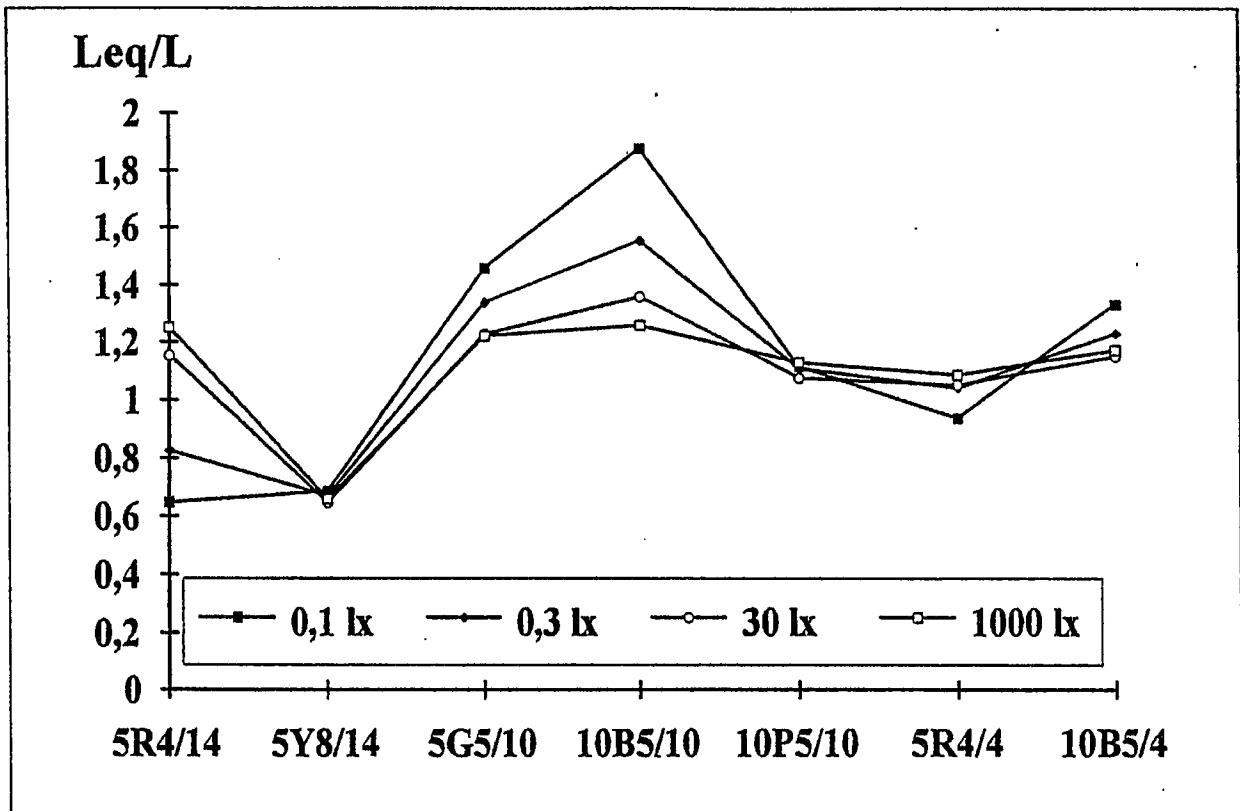


Bild 3:

Äquivalente Leuchtdichte von Körperfarben, die unter einem Gesichtswinkel von 10° direkt beobachtet wurden. Parameter ist die Beleuchtungsstärke auf den Proben. Die Proben, gekennzeichnet durch ihre Munsell Notation, wurden mit Leuchtstofflampenlicht einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6500 K beleuchtet. Diese Lichtart ist die Vergleichsstrahlung der äquivalenten Leuchtdichte. Aus /13/.

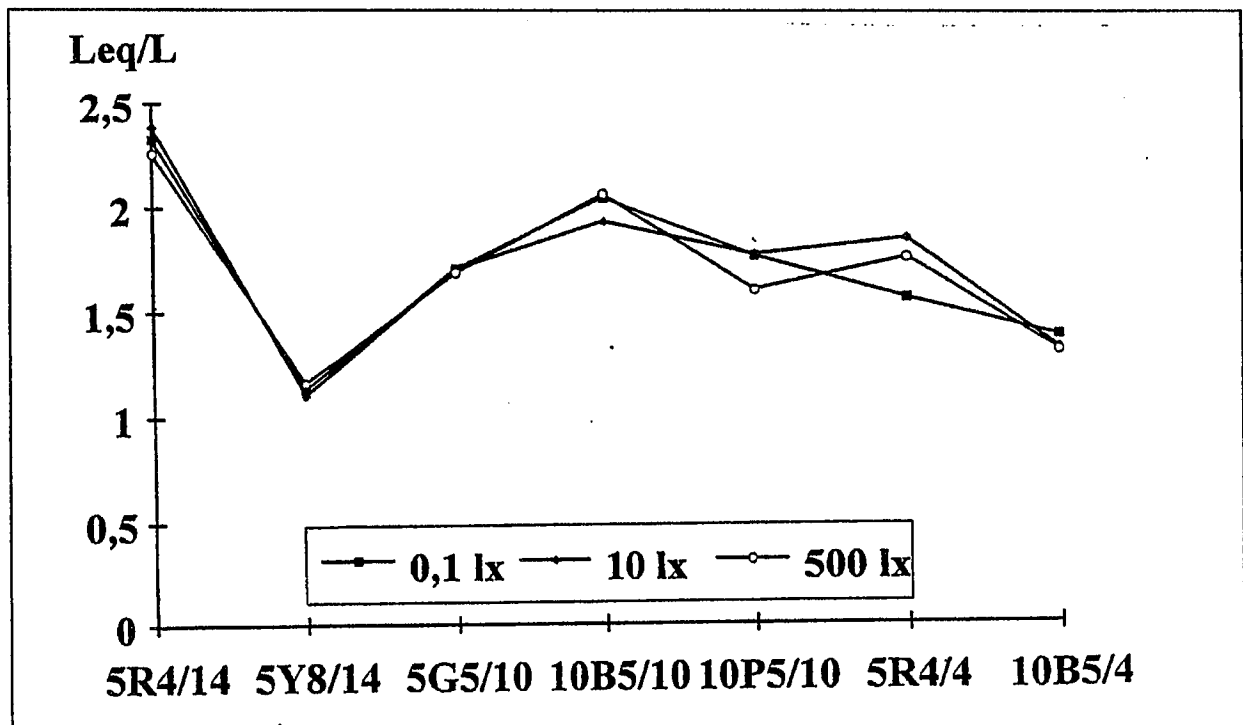


Bild 4:

Äquivalente Leuchtdichte von unter 10° gesehenen Bildschirmfarben. Parameter ist die Beleuchtungsstärke im Raum. Vergleichsstrahlung ist Bildschirmweiß bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6500 K. Aus /13/.

Entsprechende Ergebnisse wurden in Bild 4 für Bildschirmfarben erhalten. Allerdings wirkt sich hier das unterschiedliche Beleuchtungsniveau im Untersuchungsraum kaum aus, vermutlich weil die Leuchtdichten der Bildschirmfarben, die zwischen 10 und 30 cd/m² lagen, adaptionsbestimmend sind. Auch scheint hier der Helmholtz-Kohlrausch-Effekt ausgeprägter zu sein als bei beleuchteten Körperfarben der gleichen Farbart.

Tabelle 2:

Farborte der in Bild 3 und 4 untersuchten Farben, bezogen auf eine beleuchtende Lichtart mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6500 K

	5R4/14	5Y8/14	5G5/10	10B5/10	10P5/10	5R4/4	10B5/4
x	0,599	0,478	0,237	0,205	0,385	0,430	0,285
y	0,328	0,485	0,457	0,245	0,274	0,353	0,312

Es werden noch große Anstrengungen nötig sein, bunte Objekte helligkeitsmäßig nach dem Konzept der äquivalenten Leuchtdichte zuverlässig zu bewerten. Das liegt nicht zuletzt an der Komplexität des scheinbar einfachen Begriffs Helligkeit. Zwar steht uns jetzt eine plausible Theorie der Helligkeitsbewertung zur Verfügung. Das was der individuelle Beobachter unter Helligkeit versteht und wie er darüber informiert wird, ist immer noch unsicher. Davon zeugen die großen Unterschiede, die zwischen den experimentellen Untersuchungen verschiedener Autoren zu diesem spannenden Thema bestehen.

Referenzen

- /1/ Reeb, O., Grundlagen der Photometrie, Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1962
- /2/ Kokoschka, S., Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbewertung, DIE FARBE, 21, Nr. 1/6, S. 39-112, 1972
- /3/ DIN 5031, Teil 3, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik, Tabelle 3, 1982
- /4/ Helmholtz v., H., Handbuch der physiologischen Optik, 2. Auflage, S. 440, 1896
- /5/ Pokorny, J., Smith V.C., Scientific basic for visual performance, In: Proceedings of the CIE-Symposium on advances in photometry, CIE X009, S.80-88, 1995
- /6/ CIE-Publikation Nr. 75, Spectral luminous efficiency functions based upon brightness matching for monochromatic point sources, 2° and 10° fields, 1988
- /7/ Gibson, K.S., Tyndall, E.P., The visibility of radiant energy, Transactions of the Illuminating Engineering Society, 19, S.176-196, 1924
- /8/ CIE Proceedings der 6. CIE-Sitzung in Genf, S. 232-238, 1924
- /9/ Kohlrausch, A., Zur Photometrie farbiger Lichter, Das Licht, 5, S. 259-260, 275-280, 1935
- /10/ Wagner, G., Boynton, R.M., Comparison of four methods of heterochromatic photometry, Journal of the Opt.Soc. of Amer., 62/12, S. 1508-1515, 1972
- /11/ Kokoschka, S., Bodmann, H.W., Ein konsistentes System zur photometrischen Strahlungsbewertung im gesamten Adaptationsbereich, CIE Publ. No 36, S. 217-225, 1972
- /12/ Bodmann, H.W., The scientific basis of photometry, In: Proceedings of the CIE-Symposium on advances in photometry, CIE X009, S. 7-16, 1995
- /13/ Kokoschka, S., Concept and application of equivalent luminance in photometry, In: Proceedings of the CIE-Symposium on advances in photometry, CIE X009, S. 17-30, 1995
- /14/ CIE Report TC1-21, Testing of Supplementary Systems of Photometry, Draft 1996

Geometrische Optik und das Verhalten lichttechnischer Größen

Richter, Wolfgang, Dozent Dr.-Ing. habil.
wolfgang.richter@maschinenbau.tu-ilmenau.de

Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau,
Institut für Lichttechnik und Technische Optik, Fachgebiet Technische Optik
PF 100565, 98684 Ilmenau

1. Einführung

Die lichttechnische bzw. strahlungsphysikalische Beschreibung der Abbildung ist ein Aspekt der optischen Abbildung. Oft spricht man in diesem Zusammenhang auch von lichttechnischer bzw. strahlungsphysikalischer Abschätzung der Abbildung. Gegenstand der Licht- bzw. Strahlungstechnik ist in diesem Zusammenhang die Spezifizierung und Quantifizierung von Licht bzw. Strahlung. Im allgemeinen wird dabei vom geometrisch-optischen Modell der Abbildung ausgegangen, weil nur in diesem Falle einfache geschlossene Beziehungen ableitbar sind [1]. In diesem Beitrag wird vereinfachend ausschließlich von lichttechnischen Größen gesprochen, das Verhalten der entsprechenden strahlungsphysikalischen Größen ist analog. In [2] sind die vollständigen Ableitungen und weitere Darstellungen gezeigt.

2. Geometrisch-optische Zusammenhänge bei Brechung (bzw. Reflexion)

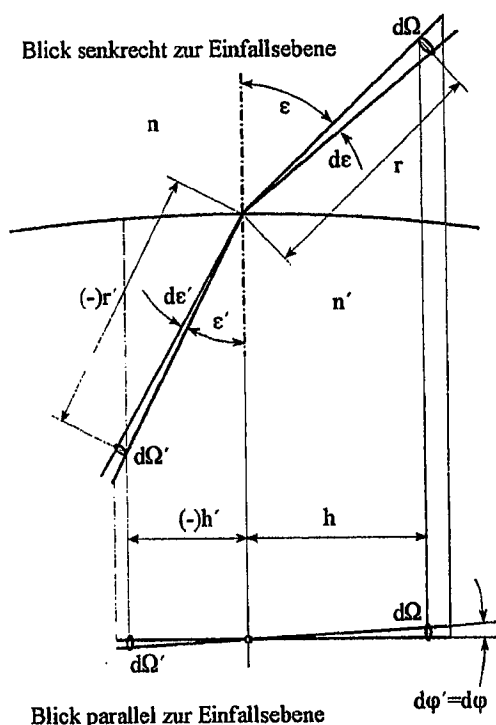


Bild 1

Grafische Darstellung der Brechung und der zweidimensionalen differentiellen Variation (differentielle Raumwinkel)
<licht_1.wpg>

In Bild 1 ist die Brechung an einer beliebigen optischen Fläche dargestellt. Die Darstellung für die Reflexion erfolgt analog. Folgende Formeln gelten allgemein, ohne spezielle Voraussetzungen an eine optische Abbildung

folgende Zusammenhänge (siehe Bild 2). Einmal gilt das fotometrische Grundgesetz

$$d^2\phi = L dA \cos(\epsilon) d\Omega = L dA' \cos(\epsilon') d\Omega' \quad (7)$$

mit dem objekt- bzw. bildseitigen differentiellen Lichtstrom $d^2\phi$, $d^2\phi'$ und der objekt- bzw. bildseitigen Leuchtdichte L , L' , zum anderen gilt auch

$$d^2\phi = L dA \cos(\epsilon) d\Omega = d^2\phi' = L' dA' \cos(\epsilon') d\Omega' \quad (8)$$

Daraus folgt die Konstanz der Leuchtdichte längs der Ausbreitung des Lichtbündels ohne Absorption, solange sich die Brechzahl nicht ändert

$$L' = L \quad (9)$$

D.h. für den Fall ohne Brechzahländerung und Absorption, daß die Leuchtdichte im gesamten Raum invariant ist.

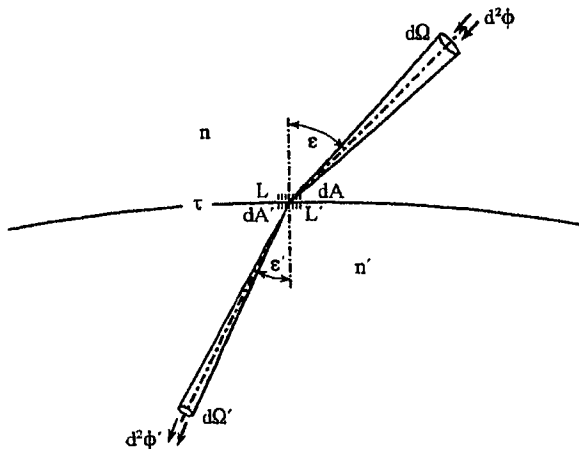


Bild 3

Fotometrische Interpretation des differentiellen Raumwinkelgesetzes
<licht_3.wpg>

Für den Fall, daß sich die Brechzahl ändert (Brechung oder Reflexion), muß ein anderer analytischer Ansatz zum Verhalten der Leuchtdichte verwendet werden (siehe Bild 3). Ausgangspunkt ist die Definition der Leuchtdichte (unmittelbar) vor der Brechung L bzw. nach der Brechung L'

$$L' = \frac{d^2\phi'}{dA' \cos(\epsilon') d\Omega'} \quad \text{und} \quad L' = \frac{d^2\phi}{dA \cos(\epsilon) d\Omega} \quad (10)$$

Über

$$\frac{d^2\phi'}{d^2\phi} = \tau \quad (11)$$

$$dA' = dA \quad (12)$$

$$\frac{L'}{L} = \frac{d^2\phi'}{dA' \cos(\epsilon') d\Omega'} \frac{dA \cos(\epsilon) d\Omega}{d^2\phi} \quad (13)$$

folgt dann mit dem Transmissionsgrad τ und Formel (5)

$$\frac{L'}{L} = \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \quad (14)$$

die "relativ konstante Größe" der Leuchtdichte.

4. Verhalten lichttechnischer Größen bei idealer Abbildung

Die optische Abbildung wird im folgenden als ideale rotationssymmetrische Abbildung (auf der optischen Achse) vorausgesetzt (siehe Bild 4, die in der Lichttechnik üblichen Indikatrixwinkel ϵ werden entsprechend der Optikkonvention durch σ ersetzt!). Wegen der Erfüllung der Abbeschen Sinusbedingung (siehe Abschnitt 6.) werden die Hauptebenen H, H' durch Hauptkugeln \hat{H}, \hat{H}' ersetzt.

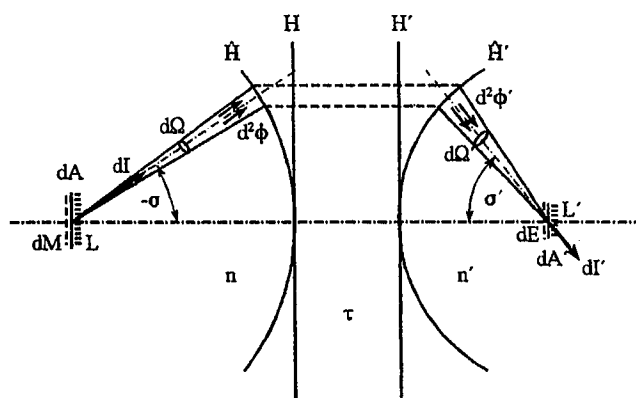


Bild 4

Geometrie und Bezeichnungen zur Abbildung der (differentiellen) lichttechnischen Größen
<licht_df.wpg>

Für das Verhalten des (differentiellen) Lichtstroms gilt analog zu Formel (11)

$$\frac{d^2\phi'}{d^2\phi} = \frac{d\phi'}{d\phi} = \frac{\phi'}{\phi} = \tau \quad (15)$$

für das Verhältnis der differentiellen Flächen gilt bei idealer Abbildung mit dem Abbildungsmaßstab β'

$$\frac{dA'}{dA} = \beta'^2 \quad , \quad (16)$$

und für das Verhältnis der differentiellen Raumwinkel gilt bei idealer Abbildung die Formel von Clausius [3] (folgt aus der differentiellen Schreibweise der erfüllten Abbeschen Sinusbedingung, siehe Abschnitt 6.)

$$\frac{d\Omega'}{d\Omega} = \left(\frac{n}{n'} \right)^2 \frac{1}{\beta'^2} \frac{\cos(\sigma)}{\cos(\sigma')} \quad . \quad (17)$$

Damit folgt wieder aus den Formeln (13) mit den Formeln (15) - (17) die Formel (14). D.h., die Leuchtdichte verhält sich bei einer (idealen) Abbildung genauso, wie im Falle reiner Brechung oder Reflexion. Die Leuchtdichte ist damit im Objektraum und im Bildraum konstant.

Aus Formel (13) folgt weiter einmal das Verhältnis der (differentiellen) Lichtstärken

$$\frac{dI'}{dI} = \frac{I'}{I} = \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \beta'^2 \frac{\cos(\sigma)}{\cos(\sigma')} \quad (18)$$

mit der objekt- bzw. bildseitigen differentiellen Lichtstärke dI, dI' und zum anderen das Verhältnis der differentiellen Beleuchtungsstärke dE zur differentiellen spezifischen Lichtausstrahlung dM

$$\frac{dE}{dM} = \tau \frac{1}{\beta'^2} \quad . \quad (19)$$

Allgemein läßt sich weiter für Lambert-Strahler das Verhältnis der Beleuchtungsstärke E zur spezifischen Lichtausstrahlung M berechnen.

$$\frac{E}{M} = \tau \frac{1}{\beta'^2} \quad (20)$$

5. Verhalten von Indikatrizen bei idealer Abbildung

Im folgenden werden die Formeln (14) und (18) hinsichtlich der Indikatrix grafisch veranschaulicht. Für die Leuchtdichte-Indikatrix wird folgender allgemeiner analytischer

Ansatz gewählt.

$$L(\sigma) = L_0 \cos^{(p-1)}(\sigma) \quad (21)$$

Aus Formel (21) ergibt sich damit für die Lichtstärke folgende Indikatrix

$$I(\sigma) = I_0 \cos^p(\sigma) \quad , \quad (22)$$

bzw. umgekehrt. $p \geq 1$ ist ein Maß für die "Keulung" der Indikatrizen, $p = 1$ entspricht dem Lambert-Strahler.

Es folgt dann aus Formel (14)

$$L'(\sigma') = \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 L(\sigma) \quad , \quad (23)$$

und aus Formel (18) folgt

$$I'(\sigma') = \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 I(\sigma) \beta'^2 \frac{\cos(\sigma)}{\cos(\sigma')} \quad (24)$$

mit dem Zusammenhang der Winkel σ, σ' aus der Abbeschen Invariante

$$\sigma = \arcsin \left(\frac{n'}{n} \beta' \sin(\sigma') \right) \quad . \quad (25)$$

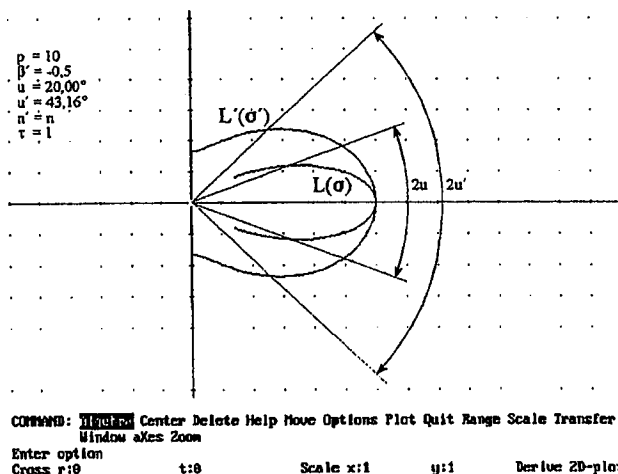


Bild 5

Leuchtdichte-Indikatrizen vor und nach der Abbildung für ein Abbildungsbeispiel mit $p = 10$ und $\beta' = -0,5$
 <1_ind_2.wpg>

Für $p = 10$ sind die entsprechenden Leuchtdichte-Indikatrizen für einen Abbildungsmaßstab $\beta' = -0,5$ vor der Abbildung $L(\sigma)$ und danach $L'(\sigma')$ im Bild 5 dargestellt. Die dazugehörigen Lichtstärke-Indikatrizen vor der Abbildung $I(\sigma)$ und danach $I'(\sigma')$ sind im Bild 6 dargestellt. Der Definitionsbereich der abgebildeten Leuchtdichte bzw. Lichtstärke ist durch den Abbildungsmaßstab und die Einhaltung der Abbeschen Sinusbedingung festgelegt.

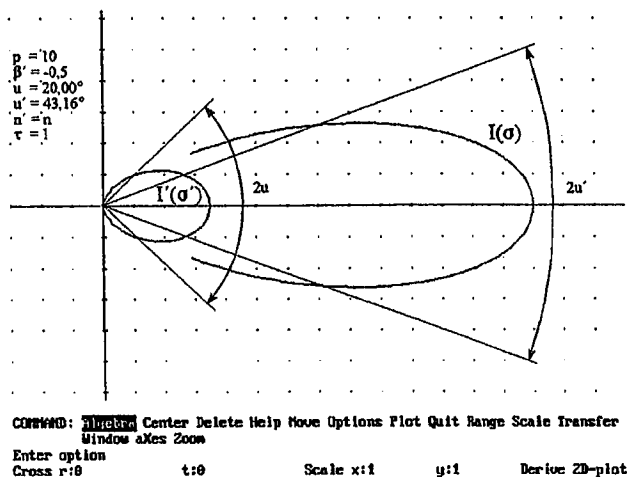


Bild 6

Lichtstärke-Indikatrizen vor und nach der Abbildung für ein Abbildungsbeispiel mit $p = 10$ und $\beta' = -0,5$
 <i_ind_2.wpg>

Nur im Falle eines Lambert-Strahlers oder/und für $n' \beta'/n = \pm 1$ bleibt die grundsätzliche Form der Indikatrizen erhalten.

6. Geometrisch-optische bzw. lichttechnische Invarianten für Strahlenbüschel und Strahlenbündel

Die notwendige Bedingung für eine ideale Abbildung eines differentiellen linearen Objektes dy bzw. eines differentiellen flächenhaften Objektes dA auf der optischen Achse ist die Einhaltung der Abbeschen Sinusbedingung.

$$n' \sin(\sigma') dy' = n \sin(\sigma) dy \quad (26)$$

Die Abbesche Sinusbedingung stellt die geometrische Invariante für Strahlenbüschel bei einer idealen Abbildung (scharfe Abbildung von dy zu dy') dar.

Aus der Abbeschen Sinusbedingung (26) folgt die differentielle Form der Abbeschen Sinusbedingung

$$n' \cos(\sigma') d\sigma' dy' = n \cos(\sigma) d\sigma dy \quad (27)$$

Analog der Formeln (4) gilt für die (ideale) Abbildung

$$d\Omega' = \sin(\sigma') d\sigma' d\varphi' \Omega_0 \quad \text{und} \quad d\Omega = \sin(\sigma) d\sigma d\varphi \Omega_0 \quad , \quad (28)$$

Schließlich folgt aus den Formeln (3) und (26) - (28) die geometrische Invariante für Strahlenbündel bei einer idealen Abbildung (scharfe Abbildung von dA zu dA'), die Clausiussche Formel.

$$n^2 dA' \cos(\sigma') d\Omega' = n^2 dA \cos(\sigma) d\Omega \quad (29)$$

Die Abbesche Invariante (26) und die Clausiussche Formel (29) sind damit die 2-dimensionale bzw. 3-dimensionale Beschreibung des gleichen Sachverhaltes: die notwendige Voraussetzung für eine scharfe Abbildung.

7. **Schlußbemerkungen**

Unabhängig von Voraussetzungen an die Abbildung wird allgemein die universelle Natur der Leuchtdichte als "relativ konstante" Größe abgeleitet. Es kann gezeigt werden, daß es technisch keine Möglichkeit gibt, durch irgendeine Maßnahme die Leuchtdichte zu erhöhen. Solange sich die Leuchtdichte durch reine Reflexion oder Brechung ausbreitet, bleibt sie bis auf Transparenzverluste und Brechzahlunterschiede konstant. Wenn sich allerdings die Leuchtdichte durch diffuse Medien ausbreitet, ist ein anderer theoretischer Ansatz zu wählen. Dann vermindert sich in jedem Falle in Abhängigkeit von der Diffusion die (sekundäre) Leuchtdichte.

Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen geometrischer-optischer Abbildung und dem Verhalten lichttechnischer Größen gezeigt. Allerdings basiert dieses Verhalten ausschließlich auf der idealen Abbildung ohne Berücksichtigung der Beugung. Im Falle der Berücksichtigung von Abbildungsfehlern und Beugung stellen die im Beitrag dargestellten Zusammenhänge nur Näherungen dar, da es dann eine scharfe Abbildung differentieller Flächen nicht mehr gibt [4].

Angeführte Literatur

- [1] Richter, W.: Grundlagen der Technischen Optik. Fakultative Vorlesung an der TU Ilmenau
- [2] Richter, W.: Geometrische Optik und das Verhalten lichttechnischer Größen. Vollständiges Manuskript zum Vortrag
- [3] Blanc, D. / Degeilh., A. / Fontan, J.: Physique MP1/PC1 / 3. Optique. Librairie Hachette 1970
- [4] Schuster, N. / Richter, W.: Stray light effect by diffraction on the aperture stop. Experimental Technique of Physics, Vol. 40 (1994) 1, p. 95-105

Licht in der Psychiatrie

Müller, Diethard, Prof. Dr. med. habil
98693 Ilmenau, Prof.- Schmidt- Str. 4

Der Einfluß von Licht auf körperliche und seelische Funktionen ist den Menschen seit Jahrhunderten bekannt. Die ersten wissenschaftlichen Mitteilungen dazu stammen von dem polnischen Arzt SNIADOCKI (1822), der rachitische Erkrankungen bei fehlendem Sonnenlicht beschrieben hat. HULDSCHINSKY (1919) war es, der zur Therapie der Rachitis eine Lampenbehandlung einsetzte. In der Folge wurden Tuberkulose und verschiedene Hautkrankheiten (Psoriasis) über Lichteinfluß therapiert. LEWY (1982) informierte in einer ersten Fallstudie über den Zusammenhang von *Depression* und Lichtmangel. In der Zwischenzeit sind besonders im amerikanischen Schrifttum zahlreiche Publikationen zu dieser Thematik erschienen, seit 1991 allein über 100 Veröffentlichungen.

Depressionen an sich

Natürlich ist es in der Psychiatrie schwerer als in den reinen Naturwissenschaften, Normabweichungen, Störungen bzw. Krankheiten und erst recht (therapeutische) Auswirkungen sicher zu belegen. Es gibt ethische Probleme, Doppelblindversuche sind schwierig, psychische und Placebowirkungen können oft nicht ausgeschlossen werden. Dennoch kann auch die Psychiatrie beanspruchen, mit wissenschaftlichen Instrumenten zu arbeiten. Ein Beispiel dafür ist die Internationale Klassifikation der Erkrankungen in der 10. Fassung, die im Kapitel „depressive Episode“ folgende Kriterien definiert:

Depressive Episode nach ICD 10

1. depressive Stimmung in einem für den Betroffenen deutlich abnormen Ausmaß, die meiste Zeit des Tages, fast jeden Tag, weitgehend unbeeinflusst durch äußere Umstände und mindestens 2 Wochen anhaltend.
 2. Verlust von Interesse oder Freude, an Aktivitäten, die normalerweise angenehm sind.
 3. Verminderter Antrieb oder erhöhte Ermüdbarkeit.
-
4. Verlust von Selbstvertrauen und Selbstwertgefühl.
 5. Unbegründete Selbstvorwürfe oder ausgeprägte und unangemessene Schuldgefühle.
 6. Wiederkehrende Gedanken an den Tod oder Suizid oder suizidales Verhalten.
 7. Klagen über oder Anzeichen für vermindertes Denk- und Konzentrationsvermögen wie Unentschlossenheit oder Unschlüssigkeit.
 8. Änderung der psychomotorischen Aktivität mit Agitiertheit oder Hemmung (subjektiv oder objektiv)
 9. Schlafstörungen jeder Art.
 10. Appetitverlust oder gesteigerter Appetit mit entsprechender Gewichtsveränderung

Entsprechend der Häufigkeit von Kernsymptomen (1-3) und Gesamtsymptomen (1-10) können die depressiven Episoden wie folgt graduiert werden:

	Symptome 1-3	Symptome 1-10
leicht	2	4
mittel	2	6
schwer	3	8

Damit ist dem Arzt ein Instrumentarium an die Hand gegeben, psychische Störungen als solche zu erfassen und auch zu quantifizieren.

Neben der Diagnostik an sich ergibt sich nun die Forderung, depressive Symptome auch über den Verlauf zu dokumentieren und über die Erfassung von Scorewerten zu belegen. Dazu hat sich die Hamilton- Depressions- Skala bewährt, die hier auszugsweise wiedergegeben wird:

Hamilton- Depressions- Skala (Auszug)

1. depressive Stimmung (Gefühl der Traurigkeit, Hoffnungslosigkeit, Hilflosigkeit, Wertlosigkeit)
 - keine(0)
 - nur auf Befragen geäußert(1)
 - vom Patienten spontan geäußert(2)
 - aus dem Verhalten zu erkennen (Gesichtsausdruck, Körperhaltung, Stimme, Neigung zum Weinen).....(3)
 - Patient drückt fast ausschließlich diese Gefühlszustände in seiner verbalen und nicht verbalen Kommunikation aus.....(4)
2. Schuldgefühle
 - keine.....(0)
 - Selbstvorwürfe, glaubt Mitmenschen enttäuscht zu haben.....(1)
 - Schuldgefühle oder Grübeln über frühere Fehler.....(2)
 - jetzige Krankheit wird als Strafe gewertet, Versündigungswahn.....(3)
 - anklagende oder bedrohende Halluzinationen.....(4)
3. Suizid
 - keine Suizidgedanken.....(0)
 - Lebensüberdruß.....(1)
 - Todeswunsch, denkt an den eigenen Tod.....(2)
 - Suizidgedanken oder entsprechendes Verhalten.....(3)
 - Suizidversuche.....(4)
4. Einschlafstörungen
 - keine.....(0)
 - gelegentlich (mehr als 30 Minuten).....(1)

Aus dem jeweils aktuellen Scorewert lassen sich Hinweise über den Schweregrad der Depression finden.

Die Beschäftigung mit dem Thema Depressionen ist aus ärztlicher Sicht zunehmend dringlicher. Analysen zeigen, daß Depressionen zunehmen.

So werden depressive Episoden erwartet:

- bei ca 5 % der Allgemeinbevölkerung
- bei ca 15 % aller Patienten der Hausarztpraxis
- bei ca 30 % aller Patienten der Nervenarztpraxis

Die Ursachen der Depressionen sind vielfältig:

- reaktiv
- persönlichkeitsbedingt
- endogen
- genetisch
- Folge von direkten oder indirekten Störungen der Hirnfunktion
- *saisonal abhängige Depressionen (SAD)*
- u. a.

Kombinierte Störungsursachen sind häufig.

Innerhalb der Gruppe der Depressionen scheinen die saisonalen Depressionen durch einige Besonderheiten ausgezeichnet zu sein:

- Jahreszeitliche Bindung der Episoden (zwischen Herbst und Frühjahr) über einige Wochen bis Monate Dauer.
- Frauen sind häufiger als Männer betroffen.
- In der depressiven Episode kommt es häufig zur Gewichtszunahme, verursacht durch ein starkes Verlangen nach Kohlehydraten (Süßigkeiten)
- Häufig verlängerte (nicht erquickliche) Gesamtschlafzeit.
- Zunahme der Symptome am Abend.

Interessant sind die Untersuchungen zur Epidemiologie, dargestellt als Anteil der saisonalen Depressionen an der Gesamthäufigkeit der Depressionen:

WILLIAMS (1993): 20 % in Nord- Canada

BRATLID (1990): doppelte Anzahl nördlich des Polarkreises im Vergleich zu südlich davon

BOOKER (1992): 9.2 % Praevalenz in Alaska

FAEDDA (1993): 9.7 % in Italien

WICKI (1992): 10.4 % in der Schweiz

POTKIN(1985) vermutete, daß die Häufigkeit abhängig von Breitengrad und Stunden an Sonnenscheindauer sei. Zumindestens wird ein Nord- Süd- Gefälle deutlich.

Licht und Depressionen

Unter dem Gesichtspunkt des Zusammenhangs Beleuchtungsabnahme und SAD-Zunahme wurden mehrere Hypothesen für die SAD erstellt:

- Melatoninhypothese: Nachweis der Regulation saisonaler Rhythmen in der Tierphysiologie
- photochemische Hypothese: Veränderungen im serotonergen System
- neuroendokrines Hypothese: Einfluß von Licht auf die Bereitstellung von Cortison und Prolactin

Eine überzeugende Hypothese steht derzeit noch aus.

Unabhängig davon wurden bereits an mehreren Hundert Patienten Behandlungen bei depressiven Störungen mit Licht durchgeführt. Die wesentlichen Parameter und Ergebnisse sind:

Einsatz von fluoreszierendem Licht des gesamten Spektrums
6 - 8 Leuchtstoffröhren a 40 Watt, 90 cm von Augen entfernt,
einige Sekunden/pro Minute in das Licht sehen
(Ein kopfmontiertes Gerät nach STEWART soll mit gleichem Erfolg verwendet werden können.)

Lichtintensität:

2500 Lux am Auge (individuelle Schwelle?)

Dämmerlicht vermutlich weniger wirksam

Ausnahme: 10 000 Lux (MAGNUSSON 1991) über 30 Minuten, besser wirksam (?)

Dauer:

zwei Stunden /Tag, bei geringem Erfolg bis 4 Stunden

Zeitpunkt:

vermutbar am Morgen günstiger als am Abend

Wellenlänge:

volles Spektrum gleiche Wirkung wie ohne UV- Licht (?)

weißes Licht wirksamer als rotes oder blaues Licht, grünes Licht wirksamer als rotes

Beachtet werden sollte, daß beim Einsatz der Lichttherapie unbedingt den Empfehlungen der „Society for Light Treatment and Biological Rhythms“ (SLTBR) zu folgen ist, die über breite internationale Erfahrungen verfügt und Therapiestandards entwickelt und kontrolliert.

Die bisherigen Untersuchungen an Patienten zeigen, daß Lichttherapie

- in 80 % bei SAD wirksam ist,
- klassische Depressionen wenig beinflußt werden.

In Einzelfällen wurde die Phototherapie erfolgreich eingesetzt bei

- Jet-Lag Syndrom
- gesundheitlichen Folgen der Schichtarbeit
- prämenstruellem Syndrom
- Alkoholentzugssyndrom

Nebenwirkungen (LEWITT 1993) sind derzeit noch unbedeutend und reversibel:

19 % Kopfschmerzen

17 % Augentränen

13 % Übelkeit

11 % Schwindel

UV- Schaden der Hornhaut und Linse sind möglich,
Hautkrebs noch nicht sicher ausgeschlossen.

Leichte manische Nachschwankungen sind ohne Bedeutung.

Eigene Untersuchungen

In Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der Technischen Universität Ilmenau (Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Lichttechnik) wurden - um den Einfluß der Lichttherapie zu erkunden -

je 20 Patienten über 6 Wochen behandelt mit

- Johanniskraut (3 x 1 Kapsel Turineurin^o von Jenapharm)

- Johanniskraut (3 x 1 Kapsel Turineurin^o und täglich einer Stunde

Lichttherapie mit 5000 lux mit dem medilight^o von Reiher)

Es handelte sich dabei um Patienten mit einer klassischen, also *nicht- saisonabhängigen* Depression.

Untersucht wurde vor Medikamentengabe sowie 2, 4 und 6 Wochen nach Start. Die psychischen Symptome wurden nach der HAMD- Skala klassifiziert, der klinische Gesamteindruck nach der CGI erfaßt.

Ergebnisse

Die in die Studie eingeschlossenen 40 Patienten wurden während der vorgesehenen 6 Wochen beobachtet. Stationäre Einweisungen oder Abbrüche der Therapie kamen nicht vor.

Nach Auswertung der HAMD zeigt sich folgendes Bild (Tab. 1)

HAMD	Hypericum	Hypericum + Licht
Startuntersuchung	23.5	24.0
nach 2 Wochen	17.5	13.0
nach 4 Wochen	14.5	7.0
nach 6 Wochen	7.5	6.0

Tab. 1: Mittlere Depressionswerte (HAMD) während sechswöchiger Therapie mit Hypericum bzw. Hypericum + Licht bei je 20 Patienten mit nicht- saisonaler Depression

Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß bereits nach 2 Wochen ein signifikanter Abfall der Depressionswerte auftritt, der bei Kombinationstherapie (Hypericum + Licht) deutlicher ist als bei alleiniger Pharmakotherapie (signifikant auf dem 5 % Niveau). Die Differenz wird nach 4 Wochen noch größer, um nach 6 Wochen nur noch gering (statistisch nicht mehr signifikant) auszufallen. Daraus deutet sich ein schnelleres Ansprechen der Kombinationstherapie an.

Die Bewertung des klinischen Gesamteindrucks nach den CGI ist aus der folgenden Tabelle ersichtlich:

Verlaufskriterien	Hypericum	Hypericum + Licht
nicht beurteilbar	15	15
sehr viel besser	25	30
viel besser	25	30
unverändert	15	15
etwas schlechter	10	5
viel schlechter	5	5
sehr viel schlechter	5	0
gesamt in %	100	100

Tabelle 2: Beurteilung des klinischen Eindrucks (nach CGI) als Zustandsänderung nach sechswöchiger Therapie (Angabe in %).- Die leichten Differenzen zugunsten einer Kombinationstherapie sind nicht signifikant.

An Nebenwirkungen wurden berichtet:

unerwünschte Nebenwirkungen	Hypericum	Hypericum + Licht
Müdigkeit	1	1
gastrointestinale Sympt.	2	1
Schwindel	2	1
Benommenheit	1	1
Mundtrockenheit	1	2
Herzbeschwerden	0	0
Hautveränderungen	0	0
gesamt	7 x bei 4 Patienten	6 x bei 3 Patienten

Tab.3: Unerwünschte Nebenwirkungen bei der Therapie mit Hypericum und kombiniert mit Lichtanwendung.

Bei insgesamt 13 / 40 Patienten wurden leichte Nebenwirkungen angegeben. Sie wurden als wenig belastend definiert, schränkten in keinem Fall die weitere Ordination ein. Sie sind den Symptome einer Placebothherapie vergleichbar.

Differenzen der Nebenwirkungen bei der Therapie mit und ohne Licht zeigen sich nicht, insbesondere keine Häufung der Hautveränderungen bei zusätzlicher Lichtapplikation.

Zusammenfassung

Licht spielt in der normalen Psychologie und auch bei psychischen Störungen eine bedeutende, wenn auch in Einzelfragen noch unbekannt Rolle. Erste Erfahrungen mit Licht als therapeutischem Agens lassen den weiteren Einsatz schon heute als praktikable und sinnvolle Ergänzung der herkömmlichen Therapie erscheinen.

Photobiologisch wirksame Strahlung: Generelle Aspekte- Stand der Normung- Meßverfahren

Dr.-Ing.T.Q. Khanh/München

1. Einführung

Die Anwendung der optischen, insbesondere der ultravioletten Strahlung in der Forschung, Entwicklung, in der Medizin, in der Biologie hat in der letzten Zeit zugenommen. Mit der Entwicklung neuer Strahlungsquellen wie Laser und LEDs werden neue industrielle und medizinische Anwendungsgebiete erforscht und eingeführt. Durch die ständige Abnahme der stratosphärischen Ozonschicht nimmt die UV-B-Strahlung übermäßig zu und stellt eine Gefahr für unser Biowesen dar. All das zwingt dazu, uns mit der Wirkung der optischen Strahlung umfassender zu befassen, die Grundlagen und die Verhaltensweisen beim Umgang mit optischer Strahlung in Form von Regelwerken festzulegen, uns intensiver und fundierter mit der Strahlungsmeßtechnik auseinanderzusetzen. Dieser Vortrag möchte dazu beitragen.

2. Photobiologische Wirkungen

Optische Strahlung im Wellenlängenbereich von 100 nm - 1 mm ruft bei Organismen, Menschen und Pflanzen verschiedene photobiologische Wirkungen hervor. Diese Wirkungen können von der Anzahl der absorbierten Photonen, ihrer Energie und von der Art des biologischen Vorgangs abhängig sein.

Die entscheidenden Einflußgrößen sind [1]:

- die Bestrahlungsstärke E_e
- die spektrale Verteilung der Strahlung $S(\lambda)$
- die betrachtete spektrale Wirkungsfunktion $s(\lambda)_{\text{biol,rel}}$
- die Bestrahlungsdauer t

2.1 Photobiologisch wirksame Strahlungsgrößen

Um die photobiologischen Wirkungen optischer Strahlung beschreiben zu können, sind photobiologisch wirksame Strahlungsgrößen in allgemeiner Form definiert zu [1]:

$$X_{\text{biol}} = \int_0^{\infty} X_{e\lambda} \cdot s(\lambda)_{\text{biol,rel}} \cdot d\lambda \quad (1)$$

- X_{biol} photobiologisch wirksame Strahlungsgröße
 $X_{e\lambda}$ spektr. Dichte der betrachteten Größe
 $s(\lambda)_{\text{biol,rel}}$ spektrale Wirkungsfunktion d. betrachteten photobiologischen Vorgangs

Entsprechend dieser allgemeinen Definition lassen sich photobiologisch wirksame Strahlungsgrößen für alle bisher eingeführten strahlungsphysikalischen oder lichttechnischen Größen definieren. Dabei sind die folgenden Größen von Bedeutung:

Photobiologisch wirksame Strahldichte:

$$L_{\text{biol}} = \int_0^{\infty} L_{e\lambda}(\lambda) \cdot s(\lambda)_{\text{biol,rel}} \cdot d\lambda \quad (2)$$

- $L_{e\lambda}(\lambda)$ spektrale Strahldichte [1]

Photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke:

$$E_{\text{biol}} = \int_0^{\infty} E_{\text{e}\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda)_{\text{biol, rel}} \cdot d\lambda \quad (3)$$

$E_{\text{e}\lambda}(\lambda)$ spektrale Bestrahlungsstärke [1]

Photobiologisch wirksame Bestrahlung (Dosis):

$$H_{\text{biol}} = \int_0^{t_1} E_{\text{biol}} \cdot dt \quad (4)$$

International [2,3,4,5,6] und national [1] sind folgende Wirkungsfunktionen gegenwärtig definiert (s. Abb.1).

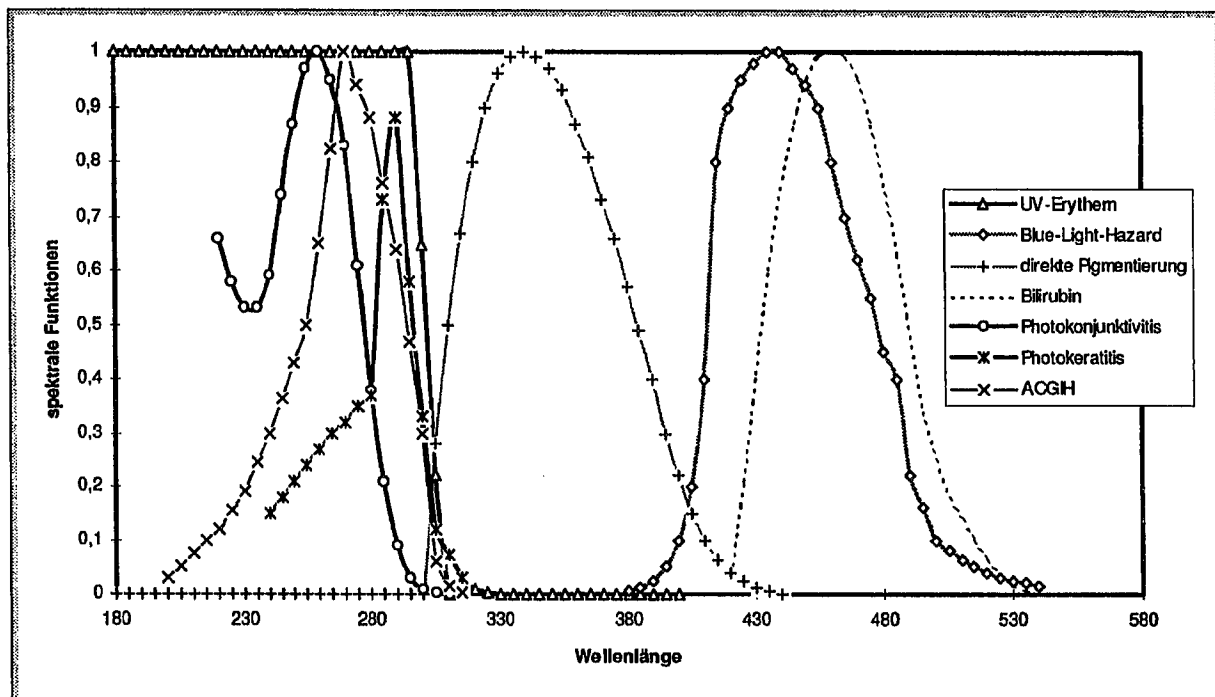


Abb.1: International und national definierte aktuelle Wirkungsfunktionen.

2.2 Wirkungen auf die Haut

2.2.1 UV-Erythem [2]

Das typische Symptom des UV-Erythems ist eine akute Hautentzündung, die durch UV-Strahlung verursacht wird (Sonnenbrand). Die Untersuchungen von Hautärzten zeigen, daß intensive UV-Bestrahlung in der Freizeit und am Arbeitsplatz die Gefahr von Hautkrebs erhöht.

Ein Sonnenbrand ist zum Beispiel bei einem hellhäutigen Menschen (Hauttyp 2) mit einer UV-Dosis von 250 J/m² bereits erreicht.

2.2.2 Direkte Pigmentierung [1]

Optische Strahlung zwischen 300 nm und 440 nm (UV-B, UV-A und der blaue Bereich) verursacht je nach Überschreitung der Schwellenbestrahlung sofort eine graubraune Hautfä-

bung, die abhängig von der Dosis innerhalb von Minuten bis zu wenigen Tagen zurückgebildet wird.

2.2.3 Bilirubin [2]

Überschreitet bei einem Neugeborenen der Bilirubinspiegel einen bestimmten Grenzwert, besteht die Gefahr von toxischen Schädigungen, insbesondere im Gehirnbereich. Durch eine gezielte phototherapeutische Behandlung mit optischer Strahlung im blauen Wellenlängenbereich kann der Bilirubinspiegel gesenkt werden.

2.3 Wirkungen auf das Auge

2.3.1 Photokonjunktivitis [3]

Die Photokonjunktivitis ist eine Entzündung der Bindehaut des Auges, verursacht durch UV-Strahlung.

2.3.2 Photokeratitis [4]

Die Photokeratitis ist eine Entzündung der Hornhaut des Auges, verursacht durch UV-Strahlung.

2.3.3 Blue - Light - Hazard [5]

Die spektrale Wirkungsfunktion für Blue-Light-Hazard ist durch die 'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)' definiert. Blue-Light-Hazard definiert eine Schädigung des menschlichen Auges durch Strahlung im blauen Wellenlängenbereich. Folgende Schwellenwerte wurden festgelegt (L_B ist die effektive Strahldichte):

$$L_B \cdot t < 100 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{sr} \text{ für } t < 10^4 \text{ Sekunden}$$

$$L_B < 0.01 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{sr} \text{ für } t > 10^4 \text{ Sekunden}$$

2.3.4 Gesundheitsgefährdung durch UV-Strahlung (ACGIH-Funktion) [6]

Die spektrale Funktion der akuten gesundheitsschädigenden Wirkung der UV-Strahlung wurde von der American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) erarbeitet und 1984 sowie 1989 überarbeitet. Sie ist in der heutigen Form vom Internationalen Strahlenschutz-Verband (IRPA) übernommen worden [6].

Danach ist an einem achtstündigen Arbeitstag für die Haut im Wellenlängenbereich von 180 nm bis 400 nm eine wirksame Bestrahlung bis 30 J/m² noch zulässig. Für das Auge sollte die wirksame Bestrahlung im Wellenlängenbereich 180 nm - 315 nm an einem achtstündigen Arbeitstag den Schwellenwert von ebenfalls 30 J/m² nicht überschreiten.

Für den Wellenlängenbereich 315 nm - 400 nm (UV-A) sind zwei Fälle zu unterscheiden:

$$H \leq 10 \text{ kJ/m}^2 \text{ für eine Bestrahlungsdauer } t < 1000 \text{ Sekunden}$$

$$E \leq 10 \text{ W/m}^2 \text{ für eine Bestrahlungsdauer } t > 1000 \text{ Sekunden}$$

2.4 Weitere Wirkungsfunktionen

Neben den oben genannten photobiologischen Wirkungsfunktionen besteht oft die Notwendigkeit, die Bestrahlungsstärken (in W/m²) in den folgenden UV-Wellenlängenbereichen zu messen:

- UV-C - Bereich (100 nm - 280 nm, praktisch zwischen 200 nm und 280 nm) und
- UV-B - Bereich (280 nm - 315 nm) [11]
- UV-A - Bereich (315 nm - 400 nm) [12]

3. Stand der Normung

Ziel der internationalen und nationalen Normen sowie Richtlinien ist es, für bestimmte Gruppen der Strahlungsquellen (kohärente Quellen wie Laser oder nichtkohärente wie die meisten in der Industrie und Haushalt angewendeten Lampen) die photobiologisch wirksamen Strahlungsgrößen zu definieren, photobiologische Wirkungen aufzuzeigen, Werte der maximal erlaubten Dosen (Grenzwerte) anzugeben, Meßvorschriften zu erläutern und Schutzmaßnahmen festzulegen.

International und national gibt es Bestimmungen, die Normcharakter haben (IEC, DIN), oder Bestimmungen, die Empfehlungscharakter besitzen (wie Publikationen der Weltgesundheitsorganisation, Internationale Organisation für Strahlenschutz). In Deutschland sind für die Arbeitssicherheit die Unfallverhütungsvorschriften (UVV) der Berufsgenossenschaften relevant. Daneben gibt es einige Bestimmungen, die sich auf Anforderungen an Schutzmittel oder Geräte beziehen. Die folgenden wichtigsten Publikationen seien hier genannt:

IEC-825-1: ist die wichtigste Arbeit bisher und beschreibt die Grundlagen, die Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Laseranlagen (kohärente Strahlung), sie gibt die Grenzwerte der Bestrahlung an. Diese Bestimmung gilt z.Z. auch für LEDs und führt häufig zur Überbewertung der Strahlenrisiken von LEDs. Es wurde dabei z.T. vergessen, daß Laser und LEDs voneinander abweichende physikalische Eigenschaften besitzen [16].

Für inkohärente Strahlungsquellen gibt es bis heute die zwei allgemein anerkannten Publikationen [5,6] (s. Absch.2.3.4.). Allerdings sind darin die Grenzwerte der Bestrahlung für die periodisch gepulsten Strahlungen und die durch Infrarotstrahlung verursachten Strahlenschädigungen nicht angegeben.

Die drei o.g. Arbeiten haben außerdem den Nachteil, daß sie nur sehr oberflächlich Vorschriften zur Messung der photobiologisch wirksamen Strahlung angeben. Die geschilderten Nachteile werden z.Z. intensiv durch eine von der Arbeitsgruppe IEC-TC 76/WG9 entworfene Publikation mit dem Titel „Safety of laser products- maximum permissible exposure to incoherent optical radiation“ verbessert.

In Deutschland befindet sich z.Z. die DIN 5031-10 in einer Entwurfsphase. Sie definiert die photobiologisch wirksamen Strahlungsgrößen, beschreibt die Wirkungen auf und über die menschliche Haut und Augen, auf Pflanzen und zur Deaktivierung der Mikroorganismen. Für jede Wirkung nennt die Arbeit die Grenzwerte der Bestrahlung, soweit sie bekannt sind. Es ist höchstwahrscheinlich, daß sie demnächst verabschiedet wird.

Die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften richten sich an die Betreiber und regeln deren Sicherheitsaufgaben (wie Bereitstellung von Körperschutzmitteln, Durchsetzung der konstruktiven Maßnahmen zum Schutz vor UV-Strahlung). Folgende UVV-Arbeiten sind wichtig:

- UVV Schweißen, Schneiden und verwandte Arbeitsverfahren (VBG 15)
- UVV Laserstrahlen (VGB 93)
- UVV Gesundheitsdienst (VGB 103)

Einige in diesen UVVen angegebene Grenzwerte stimmen nicht mit den Angaben in den international anerkannten Arbeiten [5,6] überein. Auf der Grundlage der o.g. Arbeit der Arbeitsgruppe IEC-TC76 WG9 sowie anderer neuer experimenteller Ergebnisse werden z.Z. einige UVVen überarbeitet, d.h. ergänzt bzw. verbessert.

4. Meßtechnik

Photobiologisch wirksame Strahlungsgrößen können nach zwei Prinzipien gemessen werden:

- *Spektralverfahren*: Messung der spektralen Dichte der zu bewertenden Größe z.B. spektrale Bestrahlungsstärke $E_{\lambda}(\lambda)$, Bewertung mit der betrachteten spektralen Wirkungsfunktion und numerische Integration über den definierten Wellenlängenbereich.

-*Integralverfahren*: Verwendung eines strahlungsempfindlichen Empfängers, dessen relative spektrale Empfindlichkeit an die betrachtete spektrale Wirkungsfunktion angepaßt ist.

4.1. Spektralverfahren

Generell besteht ein Spektroradiometer aus folgenden Baugruppen:

- Eingangsoptik
- Monochromator
- Empfängereinheit
- Datenerfassungseinheit
- Kalibriereinheit

Angetrieben durch die intensive Klimaforschung sind seit Anfang der 90er Jahre neue Konzeptionen bei der Entwicklung der Spektroradiometer ausgearbeitet und realisiert. Schwerpunkte dabei sind die Entwicklung der Eingangsoptik, die die Messung der spektralen Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung gemäß dem Kosinus des Einfallswinkels gestattet, die Senkung der Nachweisgrenze, die Realisierung der Kalibrierbasis sowie die Erhöhung der Wetterbeständigkeit der Spektroradiometer.

Die Messung der spektralen Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung stellt die höchsten Anforderungen an die Spektroradiometrie. Zwischen 290 nm und 320 nm steigt sie um das 1000fache, wogegen die spektrale Erythemfunktion in demselben Wellenlängenbereich um einen Faktor von ca 750 abnimmt. Demzufolge dürfen die Wellengenauigkeit der Monochromatoren maximal $\pm 0,1$ nm, die Halbwertsbreite um 1,0 nm betragen. Das erreicht man nur, wenn das Spektroradiometer thermisch (durch aufwendige Thermostatisierung), mechanisch durch Verwendung höchstpräziser Getriebe und optisch durch häufige Wellenlängenkalibrierung (täglich, oder besser nach jedem Messvorgang durch Vergleich des Istzustands mit den Fraunhoferlinien 393,36 nm und 396,85 nm). Die Nachweisgrenze ist durch Anwendung von optischen Choppern und Kühlung der Empfänger gesenkt. Da die atmosphärischen Bedingungen (z.B. Bewölkung) sich während einer Spektralmessung mehr oder weniger ändern und das Gesamtbild eines Sonnenspektrums dadurch verzerren, ist es erforderlich, die Messzeit eines Spektrums auf wenige Minuten zu reduzieren.

Die Spektroradiometer der deutschen UV-Meßstationen zur atmosphärischen Forschung sowie des weltweit bekannten NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) werden von der Firma Gigahertz- Optik/München geliefert und haben folgende Daten:

Doppelmonochromator, Brennweite 300 mm

Gitter 2400 Linien/ mm,

Wellenlängen-Reproduzierbarkeit : $\pm 0,02$ nm

Wellenlängen-Genauigkeit : besser als $\pm 0,1$ nm

Nachweisgrenze: $1 \mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$

Kalibrierbasis : 1000 W FEL-Lampe, kalibriert von PTB oder DKD-Meßlabor (in Deutschland bei Fa. Gigahertz-Optik)

COS-Unsicherheit: ± 5 % bei Einfallswinkel von 60°

Messdauer für eine Spektrumaufnahme: 6 Minuten

Um Messgerätefehler abschätzen zu können sowie zur Überprüfung der Langzeitstabilität, haben in den letzten sieben Jahren einige Spektroradiometervergleiche international und national stattgefunden. Das deutsche Bundesamt für Strahlenschutz hat am 30. Juli .1995 einige seiner Spektroradiometer (für UV-Messnetz) mit einem externen Spektroradiometer (Fa. Gigahertz-Optik, Nachweisgrenze $0,1 \mu\text{W}/(\text{nm} \cdot \text{m}^2)$) verglichen[15]. Die Streubreiten der Einzelspektren bezogen auf den Mittelwert der durch die teilnehmenden Geräte aufgenommenen Spektren liegen im langwelligen UV (UV-A) bei ± 5 %, hingegen im kurzwelligen UV (UV-B) bei ± 10 %. Die daraus ermittelten erythemgewichteten Bestrahlungsstärken weichen um ± 4 % von ihrem Mittelwert ab. Der jüngste Messgerätevergleich fand im August 1997 statt. Die Ergebnisse der Auswertung liegen noch nicht vor.

Für andere Meßzwecke (z.B. Spektralmessungen in der Lampenindustrie oder in der Medizin) werden üblicherweise andere, teilweise nicht sehr hohe Anforderungen gestellt und demzufolge entsprechende Spektroradiometer verwendet.

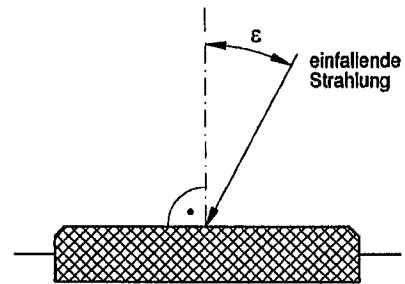
4.2. Integralverfahren

UV-Meßgeräte und Meßgeräte zur Messung der photobiologisch wirksamen Bestrahlungsstärke nach Integralverfahren müssen verschiedene Anforderungen erfüllen, wenn sie als Präzisionsgeräte betrachtet werden sollen. Die wichtigsten Anforderungen dabei sind:

- Spektrale Bewertung der einfallenden Strahlung entsprechend der zu berücksichtigenden relativen spektralen Wirkungsfunktion. Dies bedeutet, daß die relative spektrale Empfindlichkeit des Empfängers $s(\lambda)_{rel}$ gut an die relative spektrale Wirkungsfunktion $s(\lambda)_{biol,rel}$ angepaßt werden muß.
- Räumliche Bewertung der einfallenden Strahlung im Fall der Messung photobiologisch wirksamer Bestrahlungsstärken entsprechend dem Kosinus des Strahlungseinfallswinkels (Abb. 2).

Als Maß dafür ist in [13] die Kenngröße $f_2(\varepsilon, \varphi)$ für die Bewertung festgelegt:

$$f_2(\varepsilon, \varphi) = \left(\frac{Y_{Anzeige}(\varepsilon, \varphi)}{Y_{Anzeige}(\varepsilon = 0^\circ, \varphi) \cdot \cos \varepsilon} - 1 \right) \cdot 100\%$$



$Y_{Anzeige}(\varepsilon, \varphi)$: Ausgangsgröße beim Lichteinfallswinkel ε (gemessen gegen die Flächennormale) und φ (Azimutwinkel) Abb.2: Räumliche Bewertung

- Unabhängigkeit der Empfindlichkeit vom Einfluß der wirksamen Strahlung (Linearität der Anzeige)
- Kein Einfluß durch Fremdstrahlung von benachbarten Wellenlängenbereichen
- Hohe Langzeitstabilität (keine Ermüdung und wenig Alterung des Radiometers)
- Steigerung der Auflösung. Der Betrag der Meßgröße sollte allgemein größer als das hundertfache der Auflösung sein. In Deutschland liegt die erythem-wirksame Bestrahlungsstärke je nach Wetterbedingungen, Jahres- und Tageszeit etwa im Bereich zwischen 50 mW/m² und 250 mW/m². Die Auflösung sollte demnach den Wert von 0,5 mW/m² nicht überschreiten.

4.2.1 Bisheriger Stand der Technik

In Deutschland wurden Untersuchungen an kommerziellen UV-Meßgeräten durchgeführt [7,8]. Dabei wurden einige UV-A-, UV-B- und Erythem-Meßgeräte getestet, welche die wirksame Bestrahlungsstärke von therapeutischen und nichttherapeutischen Bestrahlungsgeräten anzeigen sollten. Die Meßwerte dieser Meßgeräte wurden mit Bezugsmeßwerten von präzisen Spektroradiometern verglichen.

Die Untersuchung [7] zeigte bei UV-A-Meßgeräten Abweichungen zum Sollmeßwert von bis zu +79 % und bei UV-B-Meßgeräten bis zu +98 %.

Die Untersuchung [8] zeigte bei UV-A-Meßgeräten Abweichungen im Bereich von -52 % bis +18 %, und für UV-B-Meßgeräte im Bereich von -57 % bis +250 %.

Diese Ergebnisse führten direkt zu der Schlußfolgerung, daß die spektrale Anpassung ungenügend ist. Das untersuchte Erythem-Meßgerät [7] hatte eine zu kleine Empfindlichkeit, so daß es sich als ungeeignet erwies.

4.2.2. Neue Entwicklungen von UV-Radiometern

Aufgrund der oben gezeigten Probleme wurden weitergehende Entwicklungen von präzisen UV-Meßgeräten zur Messung der wichtigsten photobiologisch wirksamen Strahlung durchgeführt [14].

Folgende Ziele bei dieser weiteren Entwicklung wurden primär gesetzt:

- Reduzierung der Meßunsicherheit auf maximal $\pm 10\%$ zur zwingenden Verbesserung der Aussagen von Ursache-Wirkung-Analysen in Forschung, Entwicklung und industriell betriebener Qualitätssicherung.
- Entwicklung von geeigneten Meßgeräten für die atmosphärische Forschung. Diese Meßgeräte sollen optisch und elektronisch von hoher Qualität und für den ständigen Außeneinsatz geeignet sein. Nur auf diese Weise können Trendmessungen und Vorhersagen z. B. für eine zukünftige Ozonkonzentration bzw. UV-Belastung durchgeführt werden.

Ein prinzipieller Aufbau eines typischen Radiometerkopfes ist in Abb. 3 gezeigt. Ein speziell entwickelter UV-cos-Vorsatz sorgt für eine gute räumliche Bewertung der einfallenden Strahlung nach dem cos-Gesetz. Die f_2 -Kenngröße ist kleiner als 5% für Einfallswinkel bis 60° (s. Abb. 4).

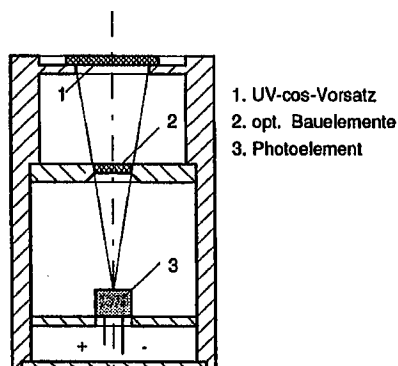


Abb.3: Typischer Aufbau eines Radiometerkopfes

Die Abb. 5 (UV-A), 6 (UV-B), 7 (UV-Erythem), 8 (Blue-Light-Hazard), 9 (direkte Pigmentierung) und 10 (Bilirubin) zeigen die

Ergebnisse der spektralen Anpassungen und verdeutlichen die hohe optische

Güte der entwickelten Radiometerköpfe.

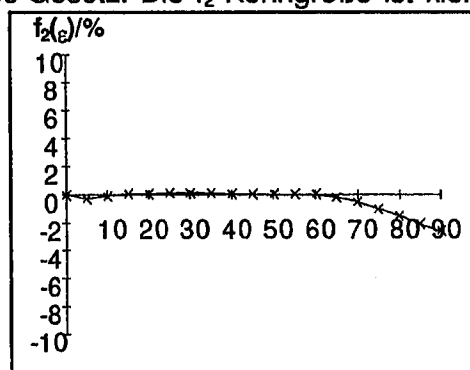


Abb.4: Typischer cos-Fehler

In der Abb. 11 ist der Aufbau eines UV-Erythem-Meßgerätes für den ständigen Außeneinsatz, wie er für Wetterstationen zur Messung der durch eine Ozonabnahme, verursachten UV-B-Belastung eingesetzt wird. Eine Quarzglaskalotte schützt die Empfängerfläche vor möglichen schädlichen und meßwertverfälschenden Umwelteinflüssen. Der Radiometerkopf ist auf $+ 35^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$ temperaturstabilisiert. Der Innenraum wird mit einem Trockenmittel vor Feuchtigkeit geschützt.

Die der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke direkt proportionale Ausgangsspannung kann von nachfolgenden Verarbeitungssystemen ausgelesen werden.

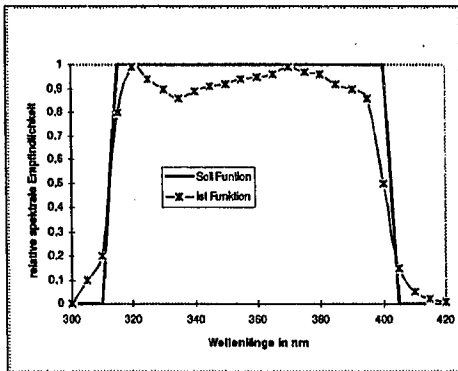


Abb. 5: Relative spektrale Anpassung für UVA

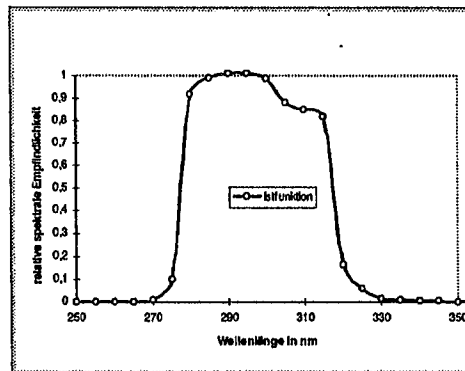


Abb. 6: Relative spektrale Anpassung für UV-B

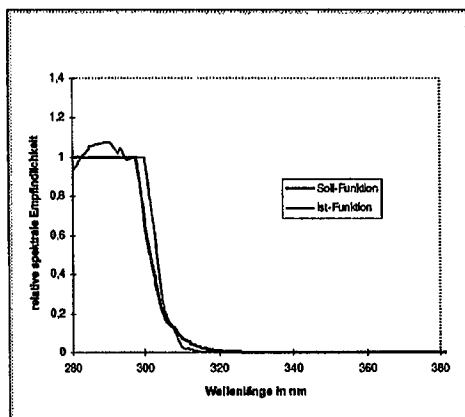


Abb. 7: Relative spektrale Anpassung für das UV-Erythem

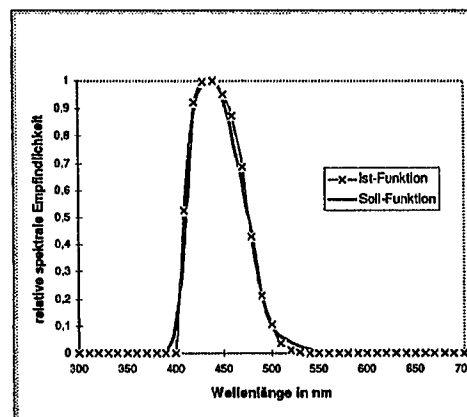


Abb. 8: Relative spektrale Anpassung für Blue-Light-Hazard

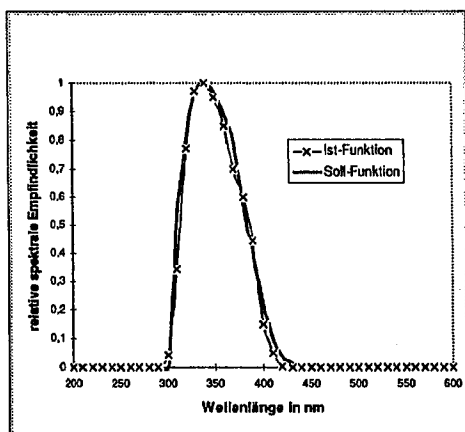


Abb. 9: Relative spektrale Anpassung für die direkte Pigmentierung

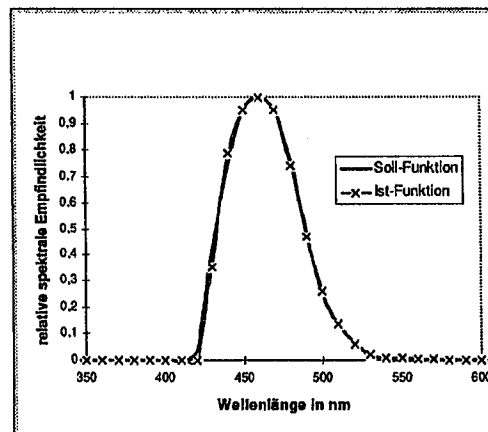


Abb. 10: Relative spektrale Anpassung für Bilirubin

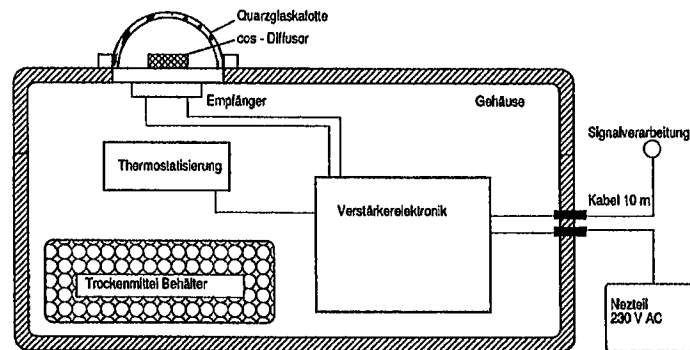


Abb. 11: Prinzipieller Aufbau eines Erythem-Meßgerätes zur atmosphärischen Forschung

- Die neuentwickelten Meßgeräte werden gegen Standardlampen für die spektrale Bestrahlungsstärke der Physikalisch - Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (PTB) kalibriert. Ihre Meßergebnisse können auf diese Weise auf nationale Normale zurückgeführt werden. Als Standardlampe für den Wellenlängenbereich größer als 320 nm wird von der PTB in [9] empfohlen, eine FEL-1000 W Halogenglühlampe (OSRAM/Sylvania) in spezieller Meßfassung zu verwenden. Für den Wellenlängenbereich zwischen 200 nm und 320 nm werden wegen der höheren Intensitätswerte ausgesuchte Xenonlampen verwendet, die vorher mit einem guten und sorgfältig kalibrierten Spektroradiometer spektral absolut gemessen werden.
- *Eine Reihe von UV-A-, UV-B- und UV-Erythemmeßgeräten wurde in den letzten Monaten in einigen großen Meßlaboratorien getestet. Die Vergleichsmessungen mit einem sehr guten Spektroradiometer des Lichtmeßlabors der TU Berlin zeigten Meßabweichungen bei UV-A-Detektoren durchschnittlich bei $\pm 6\%$, bei UV-B-Detektoren bei $\pm 6-10\%$ und bei Erythem-Detektoren sogar nur $\pm 4,4\%$. Das beweist die hohe Qualität der neuentwickelten UV-Detektoren und präsentiert den neuen Stand der UV-Meßtechnik nach Integralmethode. Wegen der Kompliziertheit und der Komplexität der Problematik sowie der Vielfalt der Lampentypen werden in den nächsten Monaten weitere Vergleichsmessungen geplant, um den neuen Stand zu festigen und Ansatzpunkte zur Verbesserung zu finden.*

Der Autor dankt Herrn Dipl.-Ing. Grothmann (TU Berlin) und Herrn Jahnke (Fa. Heraeus Noblelight, Hanau) für die freundliche Unterstützung und Durchführung der Vergleichsmessungen.

Literatur

- [1] DIN 5031-10, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik „Photobiologisch wirksame Strahlung-Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektrum“, Entwurf Januar 1996
- [2] McKinlay, A.F., Diffey, B.L.: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin, CIE-Journal 6, S.17-22 (1987)
- [3] CIE-Research Note: Photoconjunctivitis, CIE-Journal Vol. 5 (1986) No.1, S.24-28
- [4] CIE-Research Note: Photokeratitis, CIE-Journal Vol. 5 (1986), No.1, S.19-23
- [5] ACGIH: Threshold Limit Values and Biological Exposures Indices for 1990, Cincinnati, Ohio, 1991
- [6] IRPA/INIRC Guidelines Health Physics 56 (1989) 971-972
- [7] H. Kaase, J. Metzdorf, H. Berger: Standards for UV Instrument and risk of existing devices, Photochemistry and Photobiology, 1988, No.4, pp. 439-443

- [8] P. Zwick: Messung und Bewertung aktinischer UV-Strahlungsanteile, Dissertation, Institut für Lichttechnik, TU Berlin, 1990
- [9] A. Sperling et al.: Entwicklung von Normallampen für das UV-B-Meßprogramm, PTB-Opt-52, Braunschweig, Juni 1996
- [10] F. Greiter: Sonne und Gesundheit, Gustav Fischer Verlag 1984
- [11] DIN 5031-7: Benennung der Wellenlängenbereiche, Januar 1984
- [12] Internationales Wörterbuch der Lichttechnik, CIE-Publikation No.17 (1970)
- [13] DIN 5032-6: Lichtmessung, Photometer-Begriffe, Eigenschaften und deren Kennzeichnung
- [14] T.Q. Khanh, Ch. Swarlik: Industrial radiant flux measurement, in Light & Engineering, Allerton Press, New York / Moscow, in Druck
- [15] H.Nordmeyer: Meßgerätevergleich von Spektralradiometern zur Vermessung der bodennahen solaren UV-Globalstrahlung, Bundesamt für Strahlenschutz, Jahresbericht 1995
- [16] T.Q.Khanh: Einige einführende Aspekte zur arbeitsschutztechnischen Bewertung der Schädigungspotentiale von Lichtemitterdioden (LED), in Zeitschrift Elrad September 1997

Autoradresse: Dr.T.Q.Khanh
Fa.Gigahertz-Optik
Fischerstr.4/D-82178 München
Fax: 089/ 890159-50 Tel. 089/890159-0

Rationalisierung des Verbrauchs der elektrischen Energie in der öffentlichen Beleuchtung.

Doc. Ing. Alfonz Smola, CSc,

Lehrstuhl für Elektroenergetik - Lichttechnische Abteilung,
FEI STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slowakei

Die öffentliche Beleuchtung ist ein Gratis-Dienst für die Bewohner und bestimmt im wesentlichen Maß die öffentliche Sicherheit, die Sicherheit des Verkehrs und die touristische Attraktivität der Städte und Gemeinden. Die Bedeutung der öffentlichen Beleuchtung verschiebt sich in den Bereich der Verkehrssicherheit und in den Bereich der Verbesserung des nächtlichen Anblicks der Städte und Gemeinden.

Die Optimalisation von Betrieb und Instandhaltung der öffentlichen Beleuchtung sollte zu den tragenden Entwicklungsprogrammen der gemeindenützigen Dienste gehören. Der Konzept technischer Anlagen, nötiger für Aufbau, Betrieb, Instandhaltung und Kontrolle der Beleuchtung schließt in sich ein:

- eigenes Beleuchtungssystem (Leuchten, Lichtquellen, Leitungsmaste)
- Speicherungssystem (elektrische Verteilung der öffentlichen Beleuchtung vom Anschluß an das Verteilungsnetz in dem Anschlußpunkt)
- Steuerungssystem, das zum Einschalten und Ausschalten der Beleuchtung dient, wie auch zu ihrer Dimmerung, Steuerung und Kontrolle.

Ein wichtiger Faktor, der unmittelbar mit Betriebskosten und Instandhaltung der öffentlichen Beleuchtung zusammenhängt, ist der Grad der Modernisation der Lichtquellen und Leuchten der Beleuchtungssysteme. In unseren Beleuchtungssystemen sind nicht selten 30 Jahre alte Leuchten mit uneffektiven Lichtquellen, mit zerbrochenen Deckeln, mit korrodiertem Scheinwerfersystem, deren derzeitiger Lichtwirkungsgrad nur ein Bruchteil des ursprünglichen Wirkungsgrads darstellen. Der Betrieb solches Beleuchtungssystems ist hoch uneffektiv und vergrößert bedeutend die Betriebskosten und den Aufwand auf Instandhaltung.

Den Verbrauch elektrischer Energie für die öffentliche Beleuchtung können wir mit Hilfe vieler Rationalisierungsmaßnahmen senken, die ihre technische und ökonomische Seite haben.

Ersatz von Glühlampen durch Kompaktleuchtstofflampen.

Der Gebrauch der Glühlampen in der öffentlichen Beleuchtung trägt wesentlich zu der Uneffektivität des Beleuchtungssystems bei. Je nach Möglichkeit ist es notwendig, die Glühlampen in den Leuchten durch sparsamere Lichtquellen zu ersetzen wie z.B. durch Kompaktleuchtstofflampen. Bei der Auswahl ist auch die Lichtfarbe zu berücksichtigen. Die Kompaktleuchtstofflampen haben im Vergleich mit Glühlampen einen höheren Preis, aber auf der anderen Seite haben sie auch eine höhere Lichtausbeute und eine längere Lebensdauer, deswegen benötigen sie seltener Ersatz der Lichtquelle und schließlich stellen sie einen Weg zur Ersparnis der elektrischen Energie dar. Das Ersparnispotential ist durch eine ökonomische Analyse der Rückvergütung zu bestimmen.

Eine perspektive Richtung ist der Gebrauch von unlängst entwickelten und konstruierten Kompaktleuchtstofflampen mit entziehbarem Vorschaltgerät. Da die Lebensdauer eines solchen Vorschaltgerät ungefähr fünf mal höher als die der Kompaktleuchtstofflampe ist, ist auch der Preis solche Leuchte unvergleichbar niedriger.

Bei diesen Maßnahmen muß man auch die Möglichkeit des Entfernens teurer Kompaktleuchtstofflampen in Betracht ziehen, was weitere Erfordernisse für die Sicherung die Leuchte gegen ferndes Eingreifen benötigt.

Beim Austausch der Glühlampen gegen Kompaktleuchtstofflampen ist nicht notwendig, gleichzeitig auch existierende Leuchtkörper zu ersetzen. Für die Berechnung möglicher Ersparnisse muß man die Zahl der Glühlampen im gleichzeitigen Beleuchtungssystem bestimmen.

Ersatz der Glühlampen durch Natriumdampf-Hochdrucklampen.

Diese Rationalisierungsmaßnahme geht aus denselben Voraussetzungen aus, wie bei dem vorhererwähnten Fall. Dabei ist bei den Natriumdampf-Hochdrucklampen mit höherem Preis dieser Lichtquelle zu rechnen; wenn wir dazu den Preis von Drosselspule und Zündgerät einrechnen.

Die Natriumhochdrucklampe hat eine höhere Lichtausbeute (bis zu 150 lmW⁻¹) doch schlechtere Farbwiedergabe. Der Ersatz ist besonders auf den Stellen möglich, wo die Ansprüche auf Farbwiedergabe nicht so hoch sind.

Der Ersatz der Glühlampen gegen Natriumhochdrucklampe setzt zugleich den Ersatz der installierten Lichtkörper voraus. Der Gebrauch neuer Lichtkörper verursacht die Erhebung der Kosten für die Rekonstruktion, schließlich kann sie aber zu Sparnissen elektrischer Energie beitragen.

Ersatz von Quecksilberdampf-Hochdrucklampen durch Natriumdampf-Hochdrucklampen.

Dieser Ersatz benötigt keine so große Ansprüche an gleichzeitigen Ersatz von Leuchten wie die vorherige Maßnahme, doch die Natriumdampf-Hochdrucklampen erfordern für ihre Tätigkeit einen Starter.

Die Natriumdampf-Hochdrucklampen haben eine höhere Lichtausbeute als die Quecksilberdampf-Hochdrucklampen, sie sind effektivere Lichtquellen. Wie im vorhererwähnten Fall, haben sie eine schlechtere Farbwiedergabe, deswegen kann man sie nur an Stellen installieren, wo die Ansprüche an Lichtfarbe nicht so hoch sind. Es ist notwendig, die Anzahl in der Gegenwart installierter Quecksilberdampf-Hochdrucklampen zu bestimmen, die für den Ersatz gegen Natriumdampf-Hochdrucklampen geeignet sind. Wichtig ist auch eine ökonomische Analyse des Projekts.

Lichtquellen mit längerer Lebensdauer.

In der Gegenwart stellt der Ersatz der Lichtquellen in der öffentlichen Beleuchtung ein bedeutendes Problem dar, wenn wir auch Schwierigkeiten bei der Instandhaltung der Beleuchtungssysteme vom großen Umfang in Betracht ziehen. Dabei müssen wir ständig daran denken, daß manche Lichtquellen nicht die vom Grenzzustand bestimmte Lebensdauer haben, sondern eine, die mit der Senkung des Lichtstroms unter eine bestimmte Grenze in Prozent definiert ist.

In der Gegenwart gibt es in der öffentlichen Beleuchtung viele Leuchten, deren Betrieb schon längst unter der Grenze der Effektivität ist.

Man muß die Zahl der Leuchten bestimmen, deren Betrieb nicht mehr wirtschaftlich ist, wie auch das Ersparnispotenzial beim frühen Ausbracken solcher Lichtquellen aus dem Betrieb.

Aus dem Standpunkt der Lebensdauer sind neue Typen der Natriumdampf-Hochdrucklampen mit zwei Brennern perspektiv, deren namentliche Lebensdauer höher sein kann als bei klassischen Entladungslampen.

Neue Leuchten (antivandalische Ausfertigung, Staubbichtigkeit, Leuchten mit aktiven Filtern)

Die Zweckmäßigkeit der Anwendung der antivandalischen Ausfertigung der Leuchten ist mit den Resultaten der Quantifikation zerschlagener Leuchten in der untersuchten Menge der Beleuchtungssysteme. Man kann konstatieren, daß die Anwendung solcher Leuchtentypen in unseren Bedingungen höchst aktuell ist.

Der Gebrauch von staubdichten Leuchten senkt die Ansprüche auf die Instandhaltung, die dann gleichzeitig bei dem Ersatz der Lichtquelle durchgeführt werden kann. Ihren Gebrauch muß man nach dem Preisvergleich der Beleuchtungssysteme in der staubdichten und normalen Ausfertigung erwägen. Bei der Besichtigung der Beleuchtungssysteme muß man die Zahl und den Grad der Verschmutzung beurteilen. In Hinsicht auf die erreichten Emissionwerte vor allem in größeren Städten ist die Installierung von staubdichten Leuchten mit hoher Deckeinrichtung sehr aktuell.

Neues Beleuchtungssystem

Neues Beleuchtungssystem stellt vor allem neue Verteilung von Beleuchtungspunkten. Die Zweckmäßigkeit des gegenwärtigen Zustands oder den Bedarf des Entwurfs eines neuen, effektiveren Beleuchtungssystems können wir durch eine lichttechnische Ausrechnung beurteilen. Zu den grundlegenden Parametern, die sowohl auf die Qualität der Beleuchtung als auch auf Ersparnisse bei allen Projekten, sind Leistungsbedarf der Lichtquellen, Höhe und Abstand der Beleuchtungspunkte.

Die Realisation eines neuen Beleuchtungssystems kann dabei eine Reinstallierung der Leitungsmasten und der elektrischen Installation selbst beanspruchen, deswegen ist es notwendig, den Bedarf neues Beleuchtungssystems aufgrund einer ökonomischen

Analyse zu beurteilen. Diese sollte dabei auf dem gegenwärtigen technischen Zustand der Leitungsmasten und der Installation beruhen. Es ist auch nötig, Beschädigungen und Veralterung auszuwerten.

Senkung des Lichtstroms durch Spannungsregulation.

Diese Maßnahme ist eine Teillösung, die mit der Regulation der Beleuchtung zusammenhängt. Die Natriumdampf-Hochdrucklampen reagieren auf die Senkung der Spannung mit der Senkung des Lichtstroms um einen bestimmten Wert. Ein Nachteil ist dabei die Senkung der Lichtausbeute der Lichtquelle bei der Senkung der Netzspannung. Fraglich bleibt der Einfluß der Netzspannung auf die gekürzte Lebensdauer der Natriumdampf-Hochdrucklampen. Gesichert wird die fließende Regulation des Lichtstroms, doch die Ansprüche an die Bedienung sind höher.

Anwendung von Zweilampenleuchten.

Diese Anwendung ermöglicht, Werte von Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken zu senken, mit dem Ausschalten einer der Quellen beim gleichzeitigen Erhalten der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung. Diese Weise der Regulation ist besser geeignet, als wenn wir den Lichtstrom mit Ausschalten eines Teils des Beleuchtungssystems regulieren würden. Auf der anderen Seite haben aber solche Leuchte einen höheren Preis und eine niedrige Leistung.

Anwendung von Lichtquellen mit der Möglichkeit der Umschaltung von Leistungsbedarf.

Lichtquellen mit Möglichkeit der Umschaltung von Leistungsbedarf ermöglichen eine Stufenänderung des Lichtstroms. Für die Umschaltung wird ein Vorschaltgerät benutzt, das den Leistungsbedarf um cca 40% senkt. Ein Vorteil dieser Lösung ist die Tatsache, das die Lichtausbeute der Lichtquellen gleich bleibt. Diese Maßnahme ist aber ökonomisch ziemlich anspruchsvoll.

Dimmerung der Beleuchtung mit elektronischen Dimmern.

Die Dimmerung ist ein der grundlegenden Ersparnisse elektrischer Energie. Sie begrenzt die Größe des Lichtstroms, als auch des Leistungsbedarfs der Lichtquellen in wenig exponierten Zeiten. In der öffentlichen Beleuchtung stellt es die Zeit mit gesenktem Verkehr in der Nacht dar. Geeignet ist auch die fließende Dimmerung des Beleuchtungssystems bei Morgen- und Abenddämmerung anstatt einer Sprungausschaltung und -einschaltung.

Dimmern kann man fließend oder in kleinen Sprüngen. Bei der Dämmerung ist eine Fotozelle gut geeignet, bei Verkehrsminimen in der tiefen Nacht kann man automatisch oder manuell dimmern.

Senkung des Lichtstroms durch Ausschalten eines Teils des Beleuchtungssystems.

Außer dem Dimmern kann man den gesamten Lichtstrom durch Ausschalten von sich wechselnden Abschnitten, Teilen des Beleuchtungssystems senken. Bei dieser Maßnahme entsteht das Problem mit der Senkung der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung, deswegen ist diese Weise der Regelung begrenzt. Besser geeignet sind andere, vorhergenannte Maßnahmen.

Literatur:

1. Technische Vorschriften für Ortsverkehr. Beleuchtung von Ortsstraßen. Sammlung des Ministeriums für Verkehr und Telekommunikationen der SR, Bratislava 1991
2. STN - Slowakische technische Norm 36 0400 - Öffentliche Beleuchtung.
3. STN 36 0410 - Beleuchtung von Ortsstraßen.
4. STN 36 0411 - Beleuchtung von Straßen und Autobahnen.
5. STN 73 6110 - Entwerfen von Ortsstraßen.

ENERGY SAVING POTENTIAL OF ELECTRICAL LIGHTING IN BULGARIA

Theodora Vassileva, Nicolina Yaneva Mg. Phys.
 Scientific, Research and Experimental Laboratory on Lighting, Technical University -
 Sofia, Bulgaria

Total electricity consumption in Bulgaria amounted to 30.283 billions kWh for 1996. Its distribution by branches of economy is as follows:

- industry	15.276 billion kWh
- households	11.486 billion kWh
- commercial and public buildings	3.215 billion kWh
- street lighting	0.307 billion kWh,

which is shown in figure 1 as well[1].

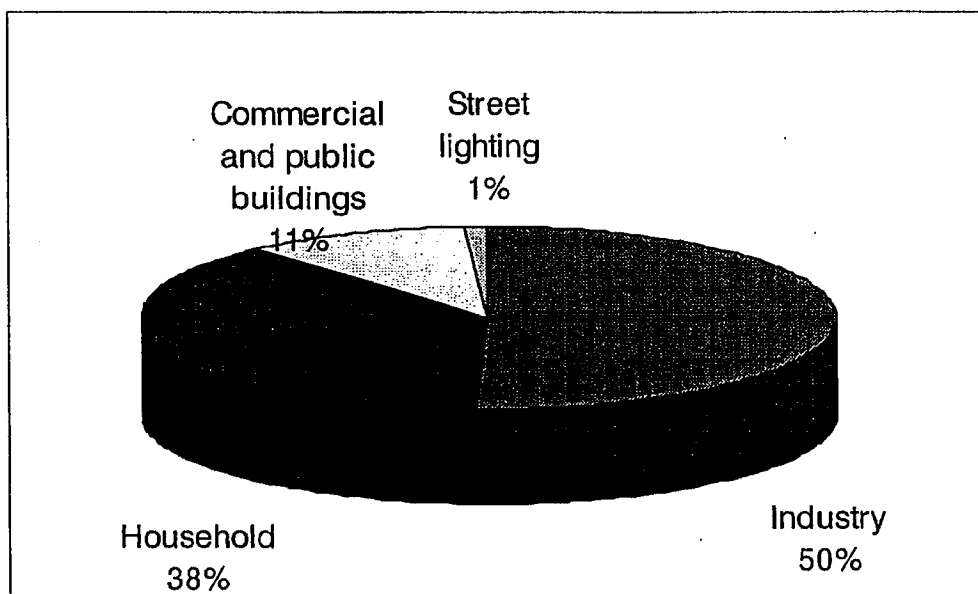


Figure 1

Electric lighting accounts to about 12 % of the total electricity consumption, i.e. 3.7 billion kWh.

Distribution of consumed energy by sectors is as follows:

- industry	26 %
- household lighting	28 %
- lighting of commercial and public buildings	28 %
- street lighting	12 %
- lighting in agriculture	6 %

Light engineering industry is the most dynamically developed branch of the electrical engineering industry. Thanks to the achievements in science and technology, the development of electric lighting is expressed in a powerful permanent flow of innovative lighting products:

- compact fluorescent lamps;
- three-band fluorescent lamps;
- low capacity metal halogen lamps;
- mirror&reflector optical systems of luminaires;
- optimization of light distribution of luminaires;
- electronic starting&controlling devices;
- automated control systems of electric lighting, etc.

Application of these new elements creates the possibilities for reduction of electricity consumption by over 50% without decreasing the illumination level or lowering lighting quality. In addition, energy saving is achieved through minimum capital investments. Experience available in this field shows that the costs required to save 1 kWh through modernization of lighting present about one third of those necessary for the production of 1 kWh of power, including increasing of the generating facility.

Having in mind the obsolescence of light engineering elements and facilities and poor operational condition of electric lighting in our country, up-grading of lighting can bring about 70% reduction of electricity consumption without lowering the level of existing illumination.

What are the energy saving potentials in different sectors of electric lighting?

1. Street Lighting

No doubt, street lighting receives the highest priority. It is hard to point out another engineering facility that can make energy savings at lower costs.

Introduction of the new European standards of street lighting is another pre-requisite for additional electricity saving.

All this reconfirms the statement that installed capacity and consumption of electricity can be reduced by over 50% without deteriorating illumination quality.

Currently, 90% of luminaires used in our country's street lighting utilize high pressure mercury lamps and only 10% utilize low pressure sodium lamps[2]. This fact predetermines the very low energy efficiency of street lighting and is a potential for essential energy savings. Table 1 shows lighting equivalence between mercury, sodium and compact fluorescent lamps.

Table 1

Mercury Lamps		Sodium Lamps		Compact Fluorescent Lamps	
P, W	F, lm	P, W	F, lm	P, W	F, lm
50	1800	-	-	2x18	1500
80	4000	50	3450	2x36	3800
125	6000	70	5600	2x55	6000
250	14000	150	16000	-	-
400	24000	250	30000	-	-

Total installed capacity for street lighting is 250MW. Taking into consideration the losses in starting&controlling devices and power supply network, 320 MW generated capacity should be provided for street lighting. Current loading is lower than that as many of the street lighting bodies are cut off for energy saving[2].

In case mercury lamps of 125W, 250W and 400W are replaced by sodium lamps of 70W, 125W and 250W, respectively, required generated capacity for street lighting would be reduced by 110MW, and annual electricity consumption by 366 660 000 kWh, i.e. by 34%. Bills to be paid for such electricity consumption would be reduced by 36 billion leva, respectively.

The existing luminaires are in poor condition - low efficiency and adverse light distribution curve. Therefore, replacement of the old luminaires by new ones with a mirror optical system would be a prerequisite for a better utilization of the light flux of lamps. A following replacement of luminaires could be made, at the same time preserving existing luminance and light intensity in the streets:

Table 2

Mercury lamp luminaires	Sodium lamp luminaires
125W	50W
250W	100W
400W	150W

The installed generated capacity would be reduced by about 150MW and the consumed energy per year by 647 ml kWh (47%).

By applying full and partial night lighting the electricity consumption could be further reduced by 35%.

2. Industrial lighting

Electricity used for lighting in industrial enterprises in 1996 amounts to 94 mln kWh. The relative share of electric lighting in the overall electricity consumption in various sectors of industry varies widely: metallurgy-5%; machine building-10%; food, tobacco and wine-3%; electrical engineering and electronics-10%; textile-30%; chemicals and oil-3%; pulp and paper-5%; silk and shoes-15%; wood processing-15%. More detailed data are given in the next table 3[3]:

Table 3

Branches/ mln kWh, 1989	Total el. power	% el. p. lighting	Energy for lighting
1. Production of el. power and thermal energy.	7865	1	79
2. Coal industry.	958	1	10
3. Oil and gas production.	10	3	0.3
4. Ferrous metallurgy /including or-dressing/.	2943	5	147
5. Non-ferrous metallurgy /including or-dressing/.	1849	5	92
6. Machinebuilding electrotechnical and electronic industries	3642		229
6a. Machinebuilding and metalworking industry	2687	5	134
6b. Electrochemical and electronic industry.	947	10	95
7. Chemical and oil processing industry /including synth. rubber/.	6269	3	188
8. Industry for building materials.	1808	3	54
9. Timber and wood-processing industry.	442	10	44
10. Cellulose and paper industry.	660	5	33
11. Glass and china-pottery industry.	431	5	22
12. Textile and knitted goods industry.	806	30	242
13. Tailoring industry.	93	30	28
14. Leather, fur and boot and shoe industry.	61	15	9
15. Polygraphic/printing and publishing/ industry.	36	30	11
16. Food, wine and tobacco industry.	1610	15	242
17. Other branches of industry.	326	10	33
TOTAL	33443		1462

Predominant luminaires in industrial enterprises are the high pressure mercury lamps.

Light industry traditionally uses fluorescent pipe with ordinary luminophors.

Incandescent lamps are commonly used in administrative buildings, storehouses, corridors and WC.

Industrial lighting is in an unsatisfactory condition. In most of the cases lighting systems are obsolete and poorly maintained. Energy efficiency can be increased by relatively low capital costs in the following ways:

- replacement of mercury lamps by metal-halogen lamps whose light output is 1.5 time higher;
- application of high pressure sodium lamps which are of double efficiency compared to mercury lamps;
- replacement of ordinary fluorescent lamps by three-band ones with 1.5 times higher flux;
- introduction of automated electric lighting control in cases of mixed (day and artificial) lighting;
- sectioning of electric installation with regard to applying local electric lighting control;
- wide use of local lighting.

Introduction of these ways and techniques in industrial lighting will allow annual electricity savings of over 50%.

3. Residential lighting

Currently residential buildings in Bulgaria use incandescent lamps mainly. Their total number amounts to about 41 830 000 and the annual electricity consumption is about 1.042 billion kWh.

The investigation of the electrical loads, conditioned by the residential lighting was carried out in two ways: experimental and through inquiries. For the experimental investigation were designed 12 portable apparatuses, through which were carried out measurements of the electrical load for lighting in 229 households. In figure 2 are presented graphically the processed data respectively for summer and winter periods of the year. In our case: summer period is from 22.III to 22.IX and winter period is from 22.IX to 22.III[4].

At the same time inquiries were held in 436 different households. In table 4 are presented the most characteristic parameters of the electrical lighting in residences, established through both the investigations[5]

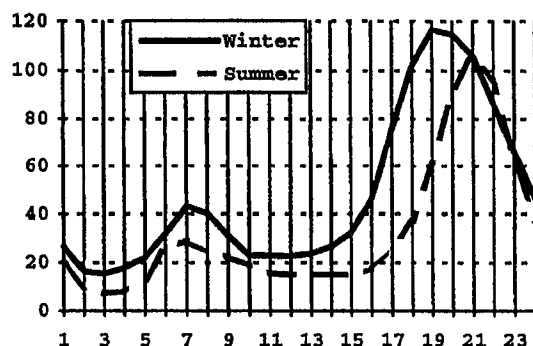


Figure 2

Table 4

Basic energy parameters for the electrical lighting in the residential sector

1. Year electroenergy consumption for lighting.	1042 millions kWh
2. Specific year consumption per person.	133.2 kWh
3. Relative part of the electroenergy consumption for lighting from the total consumption.	10.6 %
4. Maximal electrical load for lighting, participating in the peak of the electroenergy system.	316 MW
5. Maximal average load for lighting per person.	40.4 W/person
6. Total power of the installed lamps.	2 481 053 kW
7. Total number of the installed lamps.	41 839 000
8. Number of the installed lamps per person.	4.4
9. Average power of one installed lamp.	59.3 W
10. Year utilization of the maximal electrical load for lighting.	3927 hours
11. Coefficient of simultaneous turning on the lamps.	0.152
12. Average lamps number per dwelling.	12.3
13. Average installed power per dwelling.	710 W
14. Average year utilization of the installed power for lighting.	521 hours
15. Average specific installed power per unit area.	11.2 W/m ²

Various groups of lamps are used for different number of hours annually. In table 5 are shown the results from a statistical estimation of data, obtained from 436 inquiries[6]. Usually the lamps can be subdivided in two groups:

- "base" lamps being switched on for 1000 hours and more, annually;
- rarely used lamps, being switched on less than 500 hours per year.

Table 5

Investigation scope	Inquiries number	Aver. installed power for 1 household	Aver. number of the installed lamps per household	Aver. power of 1 installed lamp [W]	Aver. number of lamps working ≥ 3 hours, (basic lamp)	Aver. power of 1 basic lamp [W]	Aver. duration of illumination of 1 basic lamp	Convenient number and place for lamp changing
For whole Bulgaria	436	710	11.8	60.7	2.71	65.6	5.8	1.88 hall / kitchen
For Sofia	222	703	13.5	54.2	3.9	66.2	6.2	1.88 hall / kitchen
For other cities in Bulgaria	168	721	10.8	68.9	4.1	76.9	5.8	1.88 hall / kitchen
For the villages in Bulgaria	46	578	8.3	68.9	2.3	69.7	4.2	1 yard or kitchen
For all cities in Bulgaria	390	711	12.3	60.5	4.0	70.8	6.0	1.88 hall / kitchen

In case incandescent lamps of average power according column 7 in table 5 are replaced by compact fluorescent ones of 15W, the quoted number of households is according to the Year statistical book of Bulgaria for each of the cases. The number of the replaced lamps is after the last column in table 5. In table 6 is stated the saved energy in kWh and in DM. In the same table are given also the necessary investments and the payback period, calculated with 10 % interest rate.

After the analysis of the results from both investigations - experimental and through inquiries, it is set up that the subjective human estimation increases the real electricity consumption for lighting with about 30 %. We consider that the second row in table 5 gives the real savings of electricity.

Table 6

Scope	For Bulgaria	For Sofia	For other cities	For the villages
Estimation of				
Saved electrical energy	683,83 millions kWh(616,48)*	103,25 millions kWh	407,21 millions kWh	106,02 millions kWh
30% reduction of the saved electrical energy	478,28 millions kWh(431,54)*	72,28 millions kWh	285,05 millions kWh	74,21 millions kWh
Saved energy in 1 DM = 1000 leva	24,902 million DM (22,468mln. DM)*	3,763 million DM	14,841 million DM	3,864 million DM
The necessary investments in leva**	70,868 million DM (58,472millionDM)*	9,891 million DM	34,494 million DM	14,086 million DM
The payback period *** - years	2,97(2,7)*	2,74	2,4	3,8

* - In this case it is taken into account that less lamps are changed in villages.

** -. Without the necessary money for the programme itself.

***- Estimated by the NPV - method.

The above shown tables indicate the way for fulfilment of programmes with different scopes for energy savings in residential lighting.

It is evident that implementation of the above listed measures needs a long period of time, significant investments and it is a rather complex task. The commitment on behalf of government, public and private institutions and organizations is a must. International contacts should be established and joint actions undertaken, so that the experience of technologically advanced countries be used. In particular, the following initiatives should be undertaken to achieve set goals and objectives:

1. Organization and implementation of national, regional, industry and agency programme for energy saving. Currently in Europe, USA, Canada and Australia over 1000 programmes are being implemented to reduce electricity use for lighting in households, streets, the public sector, etc.
2. Raising nation-wide public awareness on the significance of increasing energy efficiency for electric lighting and providing information on technique and ways to save

energy in households, industrial enterprises, commercial and public facilities (Educational programmes in schools, distribution of leaflets among citizens).

3. Establishment of information centers for demonstration of new luminaires, electronic start/control devices, automated electric lighting control systems. Such demonstration centres can be built with the sponsorship of foreign and local manufacturers (Philips, Osram, Svetlina).

4. Setting up a non-government foundation to encourage and provide financial support to any initiative towards raising energy efficiency in electric lighting. It could be an affiliate organization of the American foundation Green Light, for instance.

5. Joint initiatives with international foundations and programmes aiming to increase the energy efficiency of electric lighting (EU, EPA, GREEN LIGHT, EPRI, IAEEL, NUTEK, NOVEM, POWER SMART, etc.). Joining (eventually) the IAEEL programme for studying energy efficiency in Eastern Europe, for which an informal invitation has been received.

6. Privatization of street lighting systems as a possibility for decreasing electricity consumption and improvement of street lighting.

7. Harmonization of Bulgarian standards of electric lighting with the European ones. Our standards for some categories of streets exceed the European standards a lot. NEC, EnEffect, Sofia Municipality have already expressed their readiness to fund this initiative.

8. Certification of local manufacturers and improved lighting products. Awarding symbol of excellency to products for high energy efficiency. Certificated light engineering products of excellent energy efficiency, subsidized by NEC.

Reference list:

1. Statistical guide of Bulgaria, 1996 and 1997, Sofia

2. Vassilev and others - A report on Contract 1811-1/93 "Programme for energy efficient and ecological lighting" from the branch plan for 1993/1994 of the Scientific Sector at the Technical University-Sofia.

3. Pachamanov A., Vassilev N., "Research of electric power consumption for lighting in industry of Republic of Bulgaria and possibilities for increasing its energy efficiency", International Symposium ENERGY SYSTEMS IN SOUTHEASTERN EUROPE, Ohrid, 21-23 September, 1995.

4. Vassilev N., Welinov Kr., Yaneva N. and al., "Experimental investigation of the consumption of electrical energy for residential lighting", International Symposium ENERGY SYSTEMS IN SOUTHEASTERN EUROPE, Ohrid, 21-23 September, 1995.

5. Vassilev N., Pachamanov A., Ivanov Z., Welinov K., Yaneva N. and al., "Effective energy saving through modernization of the electrical lighting", Energy Forum'97, Varna, Bulgaria.

6. Yaneva N., Programme for change of Incandescent lamps with Compact fluorescent lamps in the Bulgarian households, A report on Contract with EnEffect, 1996, Sofia, Bulgaria.

WARTUNG VON BELEUCHTUNGSANLAGEN - EINE SPEZIFISCHE BERÜCKSICHTIGUNG BEI DER PLANUNG SPART KOSTEN

Junghans, Bert (Dipl.-Ing.)

Zumtobel Staff GmbH, Schweizerstraße 30, A-6851 Dornbirn

Es sollen Zusammenhänge dargelegt werden, die derzeit zwar bekannt, jedoch immer noch nicht oder nur unzureichend umgesetzt werden. Den aktuellen Stand darzulegen, Schwachstellen und mögliche Auswege aufzuweisen, ist Zielstellung dieses Vortrages.

Beleuchtungsanlagen benötigen einen beträchtlichen Teil des Gesamtenergieverbrauchs (15% in der Industrie, 50% im Büro) dennoch wird in der Praxis kaum Augenmerk darauf gelegt, daß der Betriebszustand dieser Anlagen über einen möglichst langen Zeitraum optimal ist. Der heutige Umgang mit Wartung ist in vielen Fällen kritisch und häufig widersprüchlich. Wartungspläne existieren nur auf dem Papier oder gar nicht. Energiesparlampen werden durch billigere Lampen ersetzt um Geld zu „sparen“. Unfälle, Krankheiten bzw. Langzeitbeschwerden werden in ihrer Ursache nicht als Summe von Fehlfaktoren erkannt, bei denen die Beleuchtung einen erheblichen Anteil hat.

Eine Verminderung der Beleuchtungsqualität wird meistens nicht bewußt wahrgenommen, da es sich um stetig fortschreitende Prozesse handelt. Die Auswirkungen sind jedoch verminderte Sehleistung, stärkere Beanspruchung der Sehfunktionen, mehr Fehler, geringere Arbeitsgeschwindigkeit, gestiegene Unfallgefahr.

Betrachtung aus energetischer Sicht:

Durch ungewartete Anlagen kann die Effizienz innerhalb von 3 Jahren (je nach Typ und Verschmutzungsgrad) um mehr als 50% - abnehmen (Abb.1).

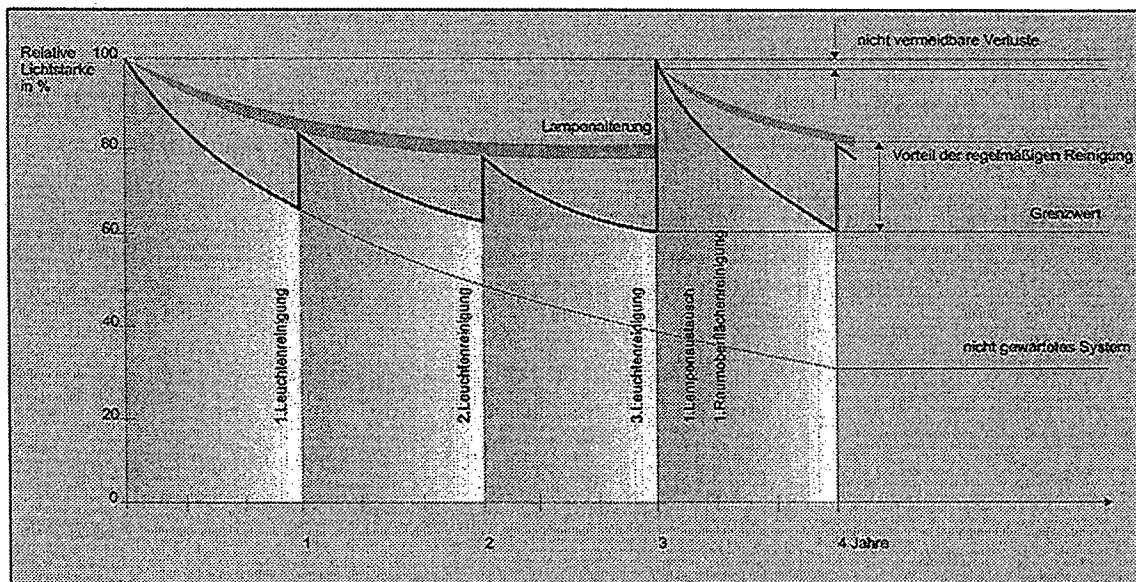


Abbildung 1

Man kann die generelle Aussage treffen, daß sich mit regelmäßiger Wartung in der gleichen Größenordnung Kosten sparen lassen, wie mit verbessertem Equipment (EVG, bessere Lampen;...). Der große Vorteil von Wartung ist, daß sie unabhängig von ande-

ren ökonomieverbessernden Maßnahmen wirkt und somit additiv kombiniert mit derartigen Maßnahmen enorme Einsparungen bewirken kann.

Betrachtung aus arbeitsphysiologischer Sicht

Die energetische Betrachtungsweise ist im Rahmen unseres, sich entwickelnden Umweltbewußtseins ein entscheidender Aspekt und zudem bezüglich der Quantifizierung von Kostenersparnissen leicht argumentierbar. Jedoch darf in diesem Zusammenhang nicht ausschließlich nur diese „Schiene“ im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit stehen. Im Extremfall ausgedrückt, entsprechen die heutigen Beleuchtungsstärken im üblichen Innenraum einem Niveau, welches wahrscheinlich „Höhlentieren“ genügen würde, um ihren Melatoninhaushalt zu regulieren. Schließlich haben sich das Sinnesorgan Auge und vegetative Funktionen des Menschen im Rahmen seiner Evolution auf Beleuchtungsstärken über einen Bereich von acht Zehnerpotenzen angepaßt. Dennoch liegen heutige Beleuchtungsniveaus an Arbeitsplätzen (nicht selten weniger als 200lx) weit jenseits des optimalen „Funktionsbereiches“ des Menschen. Umfangreiche Untersuchungen ergaben, daß zum Beispiel in Büroräumen ein Anteil von 1100lx Tageslicht und 800 lx Kunstlicht zu optimalen Ergebnissen führte. Statistische Untersuchungen belegen außerdem eine starke Korrelation zwischen Unfallhäufigkeit und Beleuchtungsniveau am Arbeitsplatz.

Bei all diesen Gesichtspunkten darf nicht vergessen werden, daß der Stand der Technik einen gewissen Rahmen vorgibt, der nicht einfach gesprengt werden kann. Jedoch gilt es, Rückentwicklungen zu verhindern und vermeintliche Sparpotentiale bzw. Kostenverursacher wie die Leuchtenwartung ins richtige Licht zu rücken.

Planungspraxis heute

Die DIN 5035 Teil 2 gibt Nennbeleuchtungsstärkewerte vor, die mit einem Verminderungsfaktor zu beaufschlagen sind, um Verluste zeitweise zu kompensieren. Dieser Verminderungsfaktor entspricht 0.8 für saubere, 0.7 für erhöht verschmutzte und 0.6 für stark verschmutzte Umgebungsbedingungen. Es besteht die Auflage, daß die Beleuchtungsanlage zu warten ist, wenn das mittlere Beleuchtungsniveau 80% des Nennwertes erreicht. Dabei darf der Wert an keiner Stelle 60% des Nennwertes unterschreiten. Diese Auflagen reichen in ihrem Ursprung bis in die 60er-Jahre zurück und spiegeln nicht mehr den Stand der Technik wieder.

In der Praxis wird der Verminderungsfaktor derart umgesetzt, daß nahezu ausschließlich (bis auf wenige Ausnahmen mit extremen Schmutzbelastungen) mit dem Wert 0,8 gearbeitet wird. Die Ursache hierfür liegt darin, daß im Rahmen des Wettbewerbs Planungen mit günstigeren Verminderungsfaktoren (und somit geringeren Leuchtenstückzahlen) unabhängig von der realen Verschmutzungsbelastung bessere Auftragschancen haben. Es handelt sich somit leider um ein Wettbewerbskriterium welches zu nicht objektiven Lösungen führt, bei denen der Mensch letztendlich an zweiter Stelle steht. Weiterhin beweist die heute übliche Praxis, daß Beleuchtungsanlagen größtenteils über Jahrzehnte hinweg gar nicht gewartet werden und sich die Aktivitäten auf den Austausch defekter Lampen beschränken.

Im Rahmen des neuen Entwurfes der DIN 5035 Teil 2 der voraussichtlich um die Jahrhundertwende zur Umsetzung gelangt und die alte Norm ersetzt, wird ein gänzlich ande-

res Vorgehen vorgeschlagen. Angegeben werden jetzt Wartungsbeleuchtungsstärken die generell nicht unterschritten werden dürfen. Der Lichtplaner wird in die Verantwortung genommen ein Wartungsregime festzulegen und zu dokumentieren, welches über die Dimensionierung und die Wartungshäufigkeit der Anlage Aufschluß gibt. Dies erfolgt über Ermittlung eines Wartungsfaktors der die verschiedenen effizienzverringernenden Faktoren einer Beleuchtungsanlage berücksichtigt (Gleichungen 1 und 2).

$$\text{Wartungswert_der_Beleuchtungsstärke} = \text{Neuwert_der_Beleuchtungsstärke} \cdot \text{Wartungsfaktor}$$

Gleichung 1

$$\text{Wartungsfaktor} = \text{LLF} \cdot \text{LAF} \cdot \text{LWF} \cdot \text{RWF}$$

LLF = Lampenlichtstromfaktor

LAF = Lampenausfallfaktor

LWF = Leuchtenwartungsfaktor

RWF = Raumwartungsfaktor

Gleichung 2

Das Verfahren stützt sich auf die CIE-Schrift 97 aus dem Jahre 1992. In dieser Schrift werden für alle diese Faktoren konkrete Werte angegeben. Auch die Werte dieser Tabellen entsprechen teilweise bereits nicht mehr dem Stand der Technik (bis zu 10 Jahre alt) und sind auch nicht generell bis zu ihrem Ursprung zurückzuverfolgen. Den Leuchten-sektor betreffend ist festzustellen, daß die Unterteilung in 6 verschiedene Leuchtenklassen relativ grob ist und die Zuordnung der Vielfalt an Leuchten erschwert. Derzeit laufen in Europa umfassende Meßprogramme die zu realitätsnahen Angaben für den Leuchtenwartungsfaktor führen sollen. Der rasante Fortschritt in der Lampentechnologie muß von den Lampenherstellern dokumentiert werden. Kurz seien die wichtigsten Kriterien der einzelnen Faktoren genannt:

- Leuchtenwartungsfaktor: Einteilung der Leuchten in 6 verschiedene Kategorien, die das verschiedene Verschmutzungsverhalten von Beleuchtungssystemen berücksichtigen,
- Lampenlichtstromfaktor: lampenspezifische Lichtstromverminderung über die Betriebsdauer ,
- Lampenausfallfaktor: lampenspezifische Ausfallrate der Lampen über die Betriebsdauer,
- Raumwartungsfaktor: Berücksichtigung der Verminderung der Reflexionsgrade der Raumbegrenzungsflächen.

Der Wartungsfaktor als Produkt dieser Einzelfaktoren ist somit ein Verminderungsfaktor, der ≤ 1 ist.

Empfehlungen für die Durchführung von Wartungsregimen

Lampenaustausch

Beabsichtigt man einen **GRUPPENAUSTAUSCH** so ist zum derzeitigen Stand problematisch, daß von verschiedenen Lampentypen keine ausreichenden Vorgaben existieren, wann das Ende der ökonomischen Nutzlebensdauer erreicht ist. Dies ist bei der Entscheidung über den Zeitpunkt des Gruppenaustausches der Lampen ein entscheidendes Kriterium. Als Orientierung kann dienen, daß man einen Ausfall von 10-20 % (entspricht ungefähr 70-85% der mittleren Lebensdauer) als Zeitpunkt für den Gruppenaustausch definieren kann. Vorteile dieses Verfahrens sind:

- Durchführung zu Zeitpunkten in denen der normale Betrieb nicht behindert wird,
- zeitoptimiert (sich sonst immer wiederholende Vorgänge müssen nur manchmal durchgeführt werden)
- Mengenrabatte können ausgehandelt werden,
- Kombination mit Leuchtenwartung bzw. der Austausch defekter Elemente bieten sich an.

Der **EINZELAUSTAUSCH** von Lampen wird häufig der ineffizientere Weg sein, auch wenn es manchmal schwer fällt zu akzeptieren, daß noch funktionierende Komponenten erhöhte Kosten verursachen können. Beispiele:

- sich wesentlich verschlechterndes Verhältnis zwischen Energieverbrauch und Lichtstromoutput bei einigen Lampentypen (Leuchtstofflampen der alten Technologie erbringen z.B. bei gleicher Leistungsaufnahme einen bis zu 50% niedrigeren Lichtstromoutput am Ende ihrer Lebensdauer. Neue Generationen von Leuchtstofflampen garantieren dagegen einen Lichtstromrückgang um lediglich 4-5%),
- erhöhter Organisationsaufwand des Lampenwechsels nach Einzelausfall: wie Lagerorganisation, Ausrüstung besorgen, Zeitaufwand, Transport zum Zielort (Ergebnis: Arbeitskosten überschreiten teilweise bei weitem die Materialkosten),
- Beschädigung von konventionellen Vorschaltgeräten durch defekte, flackernde Lampen.

Ein Einzelaustausch ist in die engere Wahl zu ziehen, wenn es sich um Leuchtmittel mit sehr hohen Anschaffungspreisen handelt, bzw. wenn geringe Leuchtmittelstückzahlen vorliegen.

Leuchtenwartung

Wartung sollte generell von geschultem Personal durchgeführt werden. Speziell an Reflektor- oder Rasteroberflächen können durch unsachgemäße Handhabung Beschädigungen verursacht werden, die den Wartungseffekt verringern. Fachpersonal sollte auch deshalb zum Einsatz kommen, um sicherheitstechnischen Aspekten gerecht zu werden. Hinsichtlich der Materialien ist genau zu recherchieren, welche Reinigungsmethode zu favorisieren ist (Ultraschallreinigung, Verwendung rückstandsfreier Reinigungsmittel,

Tauchbadreinigung...). Zu berücksichtigen ist, daß materialabhängiger Verschleiß nicht durch Wartung aufgehoben werden kann.

Raumoberflächenwartung

In Abhängigkeit der Abstrahlcharakteristik und der Verschmutzungsbelastung spielen die Reflexionseigenschaften der Raumbegrenzungsflächen eine sehr variierende Rolle. So hat man in einem mittleren Raum der mit einem Direktbeleuchtungssystem bestückt ist, unter der Auflage sauberer Umgebungsbedingungen, nach drei Jahren eine Effizienzverminderung von **4%** durch die Raumflächen. Ist der Raum jedoch mit einem Indirektsystem bestückt und liegen schmutzige Umgebungsbedingungen vor, erhöht sich dieser Wert auf über **35%**.

Wartungsausrüstung

In Abhängigkeit der Wartungshäufigkeit, der Situation vor Ort und den entstehenden Kosten, gilt es zu entscheiden, ob entsprechendes technisches Gerät gekauft oder gemietet werden muß. Zu nennen wären z.B. folgende Varianten:

- Verschiedene Formen von **Hebebühnen bzw. Kränen** (Einmastlifte, Scherenbühnen selbstfahrend, Gelenklifte selbstfahrend, usw.),
- **Luxlifte** sind Bestandteil der Leuchte und ermöglichen das Absenken (unter Auftrennung des elektrischen Kontakts) auf Bodenniveau,
- Tauchbadvorrichtungen mit Flüssigkeits- bzw. Ultraschallreinigung.

Wartungsaufwand minimierende Aspekte

- Resistenz der optisch reflektierenden Flächen gegen das Einbrennen von Materialien,
- Einsatz von Leuchtmitteln mit möglichst konstanten lichttechnischen Eigenschaften über die Lebensdauer,
- Selbstreinigungseffekte für Leuchten nutzen (z.B. Klimaleuchten),
- oder Eindringung von Fremdkörpern in die Leuchte unterbinden,
- staubfeste Lampeninstallation,
- gezielte Materialauswahl z.B. anodisches Alu statt Emaille,
- Auswahl der Materialien immer in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen (z.B. chemische , mechanische Einflüsse),
- leichte mechanische De - und Montage der optischen Teile einer Leuchte.

Aus den neuen zukünftigen Rahmenbedingungen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ableiten:

1. Der Wartungsfaktor wird zu einer produktkennzeichnenden Kenngröße, die Einfluß auf die Leuchtenentwicklung (Gestaltung, Materialwahl,...) hat.
2. Eine bewußte Aufklärung ist zu forcieren, um ein Optimum zwischen gestalterischen und wartungstechnischen Gesichtspunkten zu finden (gestalterisch niveauvolle und innovative Beleuchtungssysteme liegen z.B. hinsichtlich ihrer Wartungscharakteristik häufig hinter denen geschlossener Leuchten mit hoher Schutzart zurück.

3. Das beschriebene Verfahren wird nur dann praxisrelevant, wenn der Gesetzgeber über die Installation der Anlage hinaus die Einhaltung des verankerten Wartungsregimes durch den Anlagenbetreiber umsetzen kann.
4. Es werden Planungstools benötigt, die es dem Lichtplaner ermöglichen ein Optimum zwischen den Investitionskosten und den Betriebskosten (einschließlich Wartung) zu finden.
5. Durch vernünftige Aufklärungsarbeit sind bewußt unterdimensionierte (für möglichst geringe Anfangsinvestitionskosten), als auch zu hoch dimensionierte Anlagen mit zu langen Wartungsintervallen (leuchtenverkaufsfördernd-aber nicht im Sinne einer guten Lichtlösung) zu vermeiden.

Beispiel für die Ermittlung eines optimierten Wartungsregimes

Im Anhang befindet sich ein Berechnungsbeispiel, welches die unterschiedliche Kostenentwicklung verdeutlicht, wenn man die Wartungsabstände variiert. Im speziellen Beispiel zeigt sich, daß ein Wartungsregime im 2-Jahreszyklus gegenüber dem 1- bzw. 3- Jahreszyklus finanzielle Vorteile aufweist ($\approx 8\%$). In Abhängigkeit der Anlagenparameter und den verschiedenen regionalen Kostenstrukturen (z.B. Lohngefüge) verschiebt sich das Optimum zwischen Wartungsaufwand und Anlagendimensionierung in verschiedene Richtungen. Mit Pauschalisierungen sollte man daher vorsichtig umgehen. Noch keinerlei Berücksichtigung fand die Tatsache, daß es mit Lichtmanagementsystemen möglich ist, das Verschmutzungsverhalten von Beleuchtungsanlagen zu berücksichtigen. Auf dieses Art wäre es möglich, die Anlage im Neuzustand nicht unter „Volllast“ zu betreiben, was zum einen Energieeinsparungen herbeiführt und zum anderen extrem überhöhte Beleuchtungsniveaus im Neuzustand der Anlage verhindert.

Zusammenfassung

Für Lichtplaner und Leuchtenhersteller ist die Einführung des Wartungsfaktors sowohl Chance als auch Herausforderung, der es sich zu stellen gilt. Solange es jedoch nicht gelingt, Zusammenhänge zu verdeutlichen, die uns in die Lage versetzen die Bedeutung von Gesunderm Licht richtig zu erkennen, wird etwas was Kosten aber keinen vermeintlich meßbaren quantitativen Nutzen verursacht, ignoriert werden. So steht z.B. heute nicht mehr zur Debatte, daß ein ergonomisch ungünstig gestalteter Arbeitsstuhl bei Langzeitgebrauch zu dauerhaften Schäden am Menschen führt. Hier liegt die primäre Aufgabe technischer als auch medizinischer Forschungsinstitute zusammen mit der Industrie Nachholbedarf aufzuarbeiten. Nicht zu guter Letzt liegt auch eine hohe Verantwortung beim Gesetzgeber, der die dem jeweiligen technischen Standard entsprechenden humansten Arbeitsbedingungen garantieren sollte. Ansonsten wird auch weiterhin durch die Einsparung von Geldern an der falschen Stelle die Qualität der Beleuchtung an vielen Arbeitsplätzen in Mitleidenschaft gezogen. Dies würde unterm Strich wieder bedeuten, daß der Mensch mit seinem Leistungspotential auf der Strecke bleibt.

Literatur

- 1/ Pub.Nº. CIE 97, 1st Edition 1992: TECHNICAL REPORT / MAINTENANCE OF INDOOR ELECTRIC LIGHTING SYSTEMS (ISBN 3900734348)
- 2/ DIN 5035-2 (Entwurf Juni 1996) Angewandte Lichttechnik Teil 2: Beleuchtung von Arbeitsstätten (Vorschlag für eine europäische Norm)

Gruppenaustausch

Liberto Classic

Berechnungsbeispiel für Liberto Classic (Einbauraster-Leuchte, oben offen) mit 1/32W T26 EVG

Leuchtenpreis:	405	
Leistungsaufnahme je Leuchte	36	
Installationsk. pro Leuchte 0,5h	40	(einschließlich Materialkosten)
Preis je Lampe	10,5	
Gruppenaustauschkosten je Lampe	6	5 min
Lampenaustauschpauschal-Kosten	140	(2h)
Lampen je Leuchte	1	
Leuchtenreinigung je Stück	45	
Raumwartungskosten	3360	2Tage / 3 Fachkräfte
Stundensatz Fachkraft	70	
Stromgrundpreis/Jahr	400	
Preis pro kWh	0,165	
Betriebsstunden pro Jahr	7300	
Anlagenlebensdauer [Jahre]	10	

Planungsfaktorberechnung

Leuchtenwartungsfaktor(LWF)		
1Jahr	0,86	
2Jahre	0,8	
3Jahre	0,74	
Lampenlichtstromfaktor (LLF) 14600h	0,95	
Lampenausfallfaktor (LAF) 14600h	0,88	
Raumwartungsfaktor (RVWF)	0,95	

mittlere Raumgröße K=2,5
 Leuchte Kategorie B
 Raumboflächenwartung alle 3 Jahre
 Lampenwechselintervall alle 2 Jahre
 normale Umgebungsbedingungen
 nur Leuchtenwartung wird variiert

Anlagenfinanzierung

Anlagenfinanzierung mit 10% Zins	10
laufende Kosten aus Kapital 8%Zins	8

Leuchteninstallation=0.5h
 Materialkosten je Leuchte 5 DM

Berechnung jährl. Zins (Finanzierung)
 mit (Kredit/2) mal Zinssatz

Gruppenaustausch		Planungsfkt.
Wartungsfaktor 1	0,683	1,464
Wartungsfaktor 2	0,635	1,574
Wartungsfaktor 3	0,588	1,702

Spotaustausch		Planungsfkt.
Wartungsfaktor 1	0,719	1,391
Wartungsfaktor 2	0,669	1,495
Wartungsfaktor 3	0,619	1,616

Die Anfangskosten (Kosten für Leuchten und Montage) wurden als Kreditfinanzierung angesetzt (10%)
 Die laufenden Betriebskosten werden als Kapitalkosten mit einer Verzinsung von 8% geführt.

ANHANG: BERECHNUNG

KOSTENBERECHNUNG

Leuchtenwartung nach einem Jahr

Jahr	Leuchtenanzahl	Leuchtenkosten	Installationskosten	Lampenkosten	Lampenwechsel	Leuchtenreinig.	Raumreinigung	Energiekosten	jährl. Kosten (relativ)	Kapital	Finanzierung
1	146	59130	5840	1533		6570		6331	72834	629	3249
2				1533	1016	5554		6331	12901	1082	3249
3				1533	1016	5554		6331	14434	1292	3249
4				1533	1016	5554	3360	6331	16261	1541	3249
5				1533	1016	5554		6331	14434	1518	3249
6				1533	1016	5554		6331	12901	1517	3249
7				1533	1016	5554	3360	6331	17794	3249	3249
8				1533	1016	5554		6331	12901	1801	3249
9				1533	1016	5554		6331	14434	2068	3249
10				1533	1016	6570		6331	12901	2110	3249
Gesamtkosten:									201794	15588	32485

ABSOLUT: 249.867

Leuchtenwartung nach zwei Jahren

Jahr	Leuchtenanzahl	Leuchtenkosten	Installationskosten	Lampenkosten	Lampenwechsel	Leuchtenreinig.	Raumreinigung	Energiekosten	jährl. Kosten (relativ)	Kapital	Finanzierung
1	157	63585	6280	1649		6808		6808	78321	677	3493
2				1649	1082	5983		6808	6808	595	3493
3				1649	1082	5983		6808	15521	1379	3493
4				1649	1082	5983	3360	6808	10168	1054	3493
5				1649	1082	5983		6808	15521	1605	3493
6				1649	1082	5983		6808	6808	1030	3493
7				1649	1082	5983	3360	6808	18881	2117	3493
8				1649	1082	5983		6808	6808	1313	3493
9				1649	1082	5983		6808	15521	2155	3493
10				1649	1082	6808		6808	1623	1623	3493
Gesamtkosten:									181166	13546	34933

ABSOLUT: 229.645

Leuchtenwartung nach drei Jahren

Jahr	Leuchtenanzahl	Leuchtenkosten	Installationskosten	Lampenkosten	Lampenwechsel	Leuchtenreinig.	Raumreinigung	Energiekosten	jährl. Kosten (relativ)	Kapital	Finanzierung
1	170	68850	6800	1785		7372		7372	84807	733	3249
2				1785	1160	7650		7372	7372	640	3249
3				1785	1160	7650		7372	10317	962	3249
4				1785	1160	7650	3360	7372	18382	1711	3249
5				1785	1160	7650		7372	10317	1189	3249
6				1785	1160	7650		7372	7372	1075	3249
7				1785	1160	7650	3360	7372	20167	2220	3249
8				1785	1160	7650		7372	7372	1358	3249
9				1785	1160	7650		7372	10317	1738	3249
10				1785	1160	7650		7372	15022	2280	3249
Gesamtkosten:									191440	13905	32485

ABSOLUT: 237.831

ENERGY-EFFICIENT LIGHTING PROGRAM FOR POWER-STATION

Górczewska Małgorzata, Dr. -Ing.
ZaraneK Katarzyna (student of V-year)

Poznań University of Technology
Lighting Division
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań, Poland

Abstract

Application of current best knowledge about new light sources, new luminaires and lighting controls can reduce lighting energy consumption and significantly improve visual conditions.

Bełchatów Power-Station is the largest producer of electricity in Poland with total power capacity of about 4320 MW. The lighting installation comprises about 40000 luminaires.

For this power station a special lighting program was prepared. With this programme a number of projects concerning lighting systems of buildings and outdoor areas have been carried out. Typically achieved energy consumption savings was in the range of 40 to 70 percent.

Energy consumption of a lighting installation was cut by reducing installed load and better lighting systems solution.

1. Introduction

The progress that has been made within the last twenty years in the technology of manufacturing and designing light sources and luminaires has caused that lighting used up till now, based mainly on mercury lamps and luminaires not adjusted to needs and requirements, are no more effective. Another additional factor causing low efficiency of this kind of lighting is a substantial deterioration rate of luminaires, especially those working in difficult environmental conditions.

The research of lighting quality and computer analysis of a few possibilities of lighting modernisation in different parts of the Bełchatów power station have proved that the effectiveness of power utilisation for lighting can be improved by over ten times, thus satisfying the standards requirements concerning lighting quality and saving up to 70% of energy.

It was possible to obtain significant savings within operation of the modernised lighting system and simulation improvement of labour conditions taking into consideration both safety and lighting comfort. This was essential because of a large number of illuminated buildings in the area of a Bełchatów power station and the dispersion of illuminated outdoor areas.

Computer programs for multi-criterion evaluation of different analysed alternatives of lighting systems made easy to find optimum lighting solutions to improve effectiveness of modernised installations.

2. Lighting requirements in power station buildings

In the power plant areas such as power plants and thermal-electric power stations there are many buildings and squares for different purposes. Their lighting must satisfy the requirements of the Polish standards.

In reference to indoor lighting, typical levels of illuminances are taken from the series:

$$E_{av. \min} = 50, 75, 100, 150, 200, 300 \text{ and } 500 \text{ lx}$$

where the levels of 300 lx and 500 lx are used as a labour-stand type for boards, control desks, and measuring devices.

These levels, due to environment dustiness and often very difficult access to luminaires are increased by maintenance factor taken from the range:

$$u = 0.4 \div 0.67$$

which results in considerable oversizing of lighting devices.

3. Analysis of lighting quality and exemplary solutions of lighting system modernisation in the Bełchatów power station

Lighting systems of the Bełchatów power station halls were made mainly on the basis of mercury lamp luminaires, which are characteristic of high energy consumption for lighting. It results from low effectiveness of mercury lamps, relatively low efficiency, and lighting distributions not suitable for needs of the luminaires which were used most often.

Significant deterioration of the luminaires (which was very common) caused that basic lighting parameters did not satisfy standard requirements although maintenance was being carried out.

For example, Table 1 contains some selected research results of lighting quality carried out in the Bełchatów power station that are characteristic for this kind of the power station objects.

Table 1. Measurement results lighting intensity in the Bełchatów power station

	Illuminated object	Applied sort of lighting	Measured lighting level $E_{av.}$	Requirements of the PN standard $E_{av. \min.}$	Power consumption factor [W/m ² per 100 lx]
1.	Engine room	ORP-400/E luminaires with HPM 400W lamps	90 lx at the level of turbine set	150 lx	25
2.	Electric workshop room	ORP-400/E luminaires with HPM 400W lamps	120÷140 lx	300÷500 lx	14.5
3.	Coal storage square	PU-15 luminaires with HPM 400W lamps	4 lx	5 lx	36

In all cases, the measured levels of illuminances do not satisfy standard requirements. The power consumption factor for lighting exceeds by the levels possible to obtain using more effective lighting systems from a few to over ten times.

The first change of the lighting system was made in the engine room. There were $n = 1536$ luminaires of total power $P = 0.66\text{MW}$ on the ceiling beams of the engine room before the modernisation of the lighting system.

Luminaire distribution for one the twelve turbine sets is shown in Fig. 1

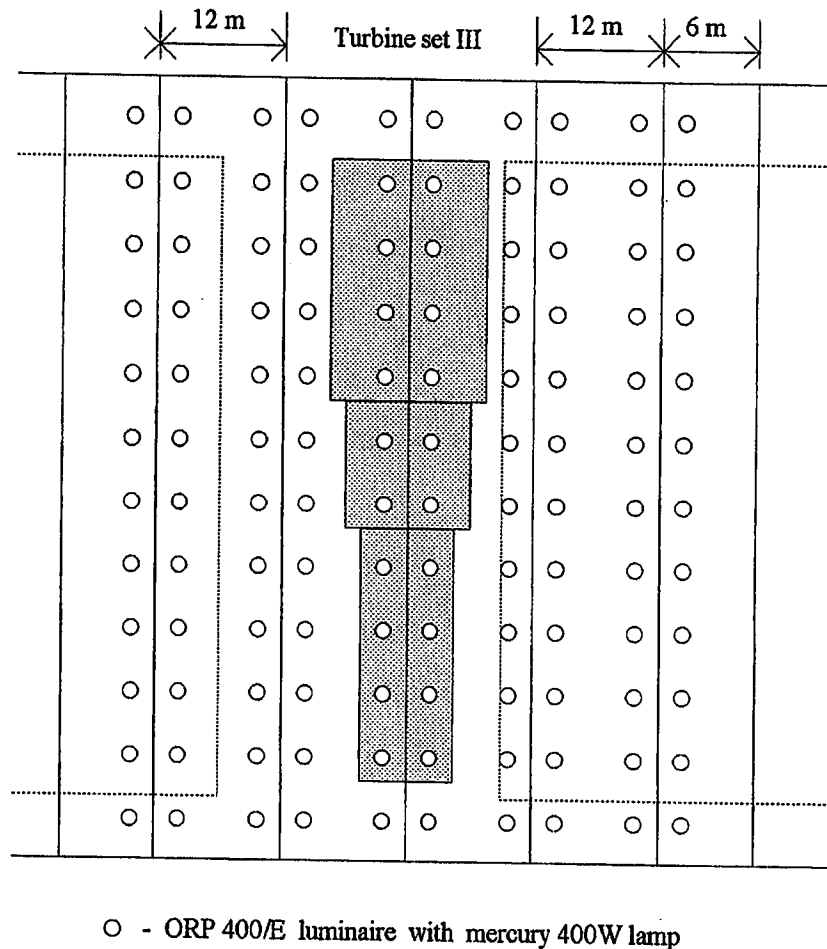


Fig. 1. Existing luminaires configuration of general lighting in the engine room over the turbine set.

The luminaire configuration presented in Fig.1 did not provide the standard level of illuminance. In order to satisfy the standard, it was necessary to obtain lighting level $E_{av.min.} = 150\text{ lx}$ at the turbine set level with maintenance factor $u = 0.56$.

The choice of the new lighting system could practically be only two types of light sources, i.e. sodium and metal-halide sources for the engine room, which is very high.

The most effective lighting from the economical point of view was selected, using sodium sources, characterised of very high effectiveness and long durability. there was a disadvantage in their standard finish (in some applications) of limited colour rendition. It was corrected by using a mixed system of sodium sources of the SON Plus and SON Comfort types, which improved visual comfort; energetic efficiency of the applied was high.

This alternative was accomplished within the renovation of the lighting system for one of the turbine sets. Distribution of the new luminaires is shown in Fig.2.

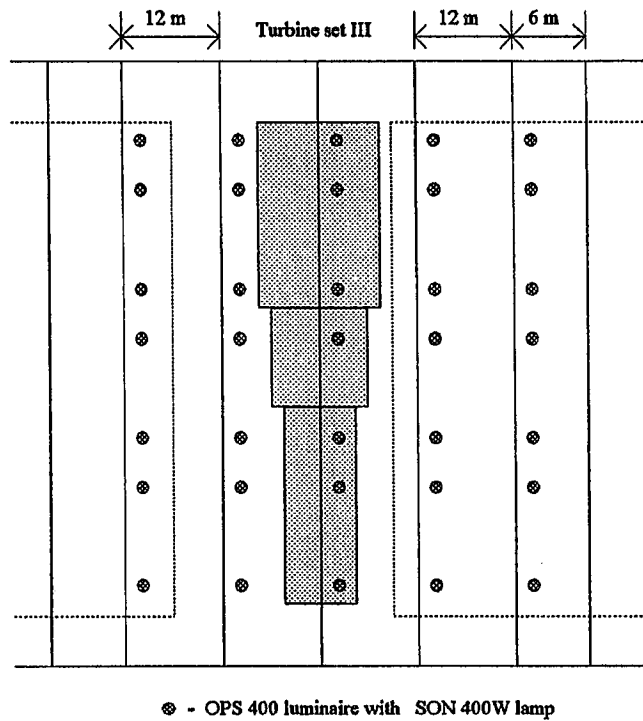


Fig. 2. Modernised luminaire configuration of general lighting in the engine room over the turbine set.

The results for the sodium luminaire configuration presented in Fig. 2 were as follows:

- initial lighting level around the turbine set $E = 400 \text{ lx}$
- around the turbine set -for the traffic areas $E = 220 \text{ lx}$
- average for the whole level +12.0 m $E = 320 \text{ lx}$

The distribution of lighting intensity at the level +12.0 m for a part of the engine room is shown in Fig. 3.

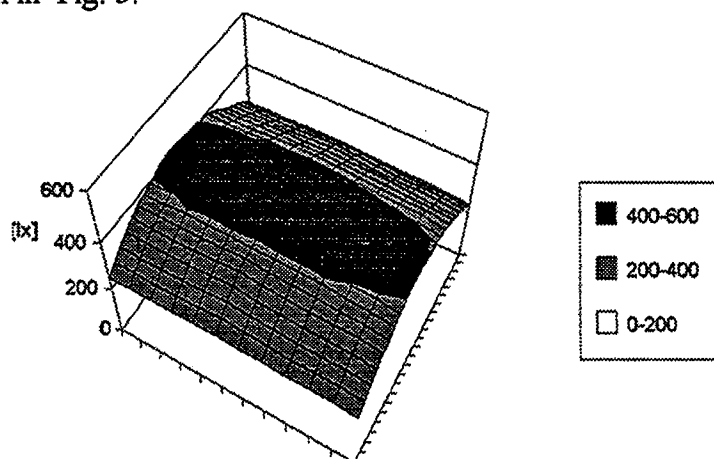


Fig.3. Distribution of initial values of illuminance at the turbine set level in the engine room

By analogy, the lighting system in the electric workshop room was changed within lighting renovation, which was based on the computer analysis. A system of mercury luminaires was replaced by mixed system of metal-halide and sodium luminaires in this building. The level of lighting intensity was increased by four times, the reduction of energy consumption of the installed luminaires was 50%. Moreover, colour rendition was good and the colour of the changed light was pleasant.

The results obtained within the lighting system renovation in the exemplary power station objects are compiled in Table 2.

Table 2
Comparison of lighting system effectiveness before and after the renovation

	Illuminated object	Obtained lighting intensity level in reference to the old lighting system	Power reduction of the new lighting system	Effectiveness increase rate of power consumption	Power consumption factor in the installation [W/m ² per 100 lx]
1.	Engine room	350% at the turbine set level	70%	1170%	2.2
2.	Electric workshop room	400%	50%	300%	2.3
3.	Coal storage square	500%	78%	2250%	4.0

The obtained improvement of lighting quality, satisfying the standard was obtained at a substantial power reduction of the applied lighting systems.

4. References

- [1] Górczewska M., Nawrowski R.: Energy-Efficient of Industrial Lighting Design and Application. International Conference SYS'95, Brno, July 1995, pp.114-120.
- [2] Górczewska M.: Nowoczesne, energooszczędne systemy oświetlenia wnętrz. VI Międzynarodowa Konferencja Ergonomiczna. Poznań, 25-27 wrzesień 1995r, str. 19-20.
- [3] Wouters M. Lamp choice and lighting design. International Lighting Review 1995/1 pp. 6-14.
- [4] "Energy Efficient Lighting in Industrial Buildings", Brescu - OPET 1992
- [5] "Lighting Manual" Philips Lighting, Fifth edition, 1993.

ENERGY-EFFICIENT LUMINARIES FOR RESIDENTIAL AND PEDESTRIAN AREAS

Gochev, N. M. Eng., T. Peycheva M. Eng.

Scientific and Research Laboratory of Lighting, Technical University, Sofia, Bulgaria

The effectiveness and quality of road lighting to a great extent are determined by the type of the luminaire light-distribution curve. The necessary number and power of installed luminaires depend highly on their light distribution in order to be realized the standard light-engineering requirements. Because of that the optimization of luminaires light-distribution curves is important and very popular problem in practical lighting design.

Initially road lighting standardization was made by street-surface average illuminance. Usually the shape of light-distribution curve was defined in order to reach an uniform allocation of road-surface illuminance [1], [2], [3].

In this case the optimization problem can be defined in two ways:

1. The target function is the minimum of luminaire luminous flux:

$$\Phi = \min ,$$

where standard illuminance $E_{av} \geq E_{stand}$ and admissible uniformity $E_{min}/E_{av} \geq g_n$ are realized.

The luminaires height and spacing are assigned.

2. The target function is the maximum spacing between the luminaires:

$$l = \max ,$$

where standard requirements are kept:

$$\begin{aligned} E_{av} &\geq E_n \\ E_{min}/E_{av} &\geq g_n \end{aligned}$$

The configuration of luminaires location and luminaires height are assigned.

At present average luminance L_{av} , overall and line uniformity (U_o and U_l) and threshold increment TI are in process of standardization.

$$\begin{aligned} U_o &= L_{min}/L_{av} \\ U_l &= L_{min}/L_{max} \end{aligned}$$

In this case, optimization models for finding the most expedient light-distribution curves can be formulated by the following way [4], [5]:

3. When the configuration of luminaires location, height and spacing are assigned, the target function is reduced to a minimized luminous flux:

$$\Phi = \min ,$$

where the following limiting conditions are observed:

$$L_{av} \geq L_n$$

$$\begin{aligned} L_{\min}/L_{av} &\geq (U_o)_n \\ L_{\min}/L_{\max} &\geq (U_l)_n \\ TI &\leq (TI)_n \end{aligned}$$

4. The target function is the maximum luminaires spacing:

$$l = \max,$$

where luminaires height is assigned and the limiting conditions are mentioned above. These two models with small corrections are used at present for optimization of luminaires light-distribution curves.

The project of the new European standards for road lighting accepted in 1996 has introduced new street categories [6]:

a) CE - street categories for which average illuminance E_{av} and illuminance uniformity E_{\min}/E_{av} have been standardized.

The optimization of light-distribution in this case is defined by the solution of the optimization problems 1 or 2. As an additional limiting condition can be introduced:

$$TI \leq (TI)_n$$

b) residential and pedestrian areas with limited motor car traffic, cycles areas. Average horizontal E_h , minimum E_{\min} and vertical E_v plane illuminance, semi-cylindrical E_{sc} and hemi-spherical E_{hsp} illuminance are standardized for these types of streets. In this cases optimization models 1 and 2 can be used, additionally introducing the following limiting conditions:

- streets with increased crime risk:

$$E_{sc} \geq (E_{sc})_n$$

- control zones of communication network (like customs control, road tax payment, integrating of two or more street lanes etc.), two limiting conditions are following:

$$\begin{aligned} E_{sc} &\geq (E_{sc})_n \\ E_v &\geq (E_v)_n \end{aligned}$$

- if standards recommend horizontal semi-cylindrical illuminance, optimization models 1 and 2 can be used, too. Here the limiting conditions have the following aspect:

$$E_{hsp} \geq (E_{hsp})_n$$

- for local streets with limited motor car speed ($v = 30$ km/h) and for pedestrian sidewalks is recommended the use of optimization models 3 and 4, introducing an additional limiting condition:

$$E_{sc} \geq (E_{sc})_n$$

The calculation of vertical plane illuminance implements as follows:

$$E_v = E_{vd} + E_{v,ind.}$$

The direct component of the vertical plane illuminance E_{vd} from luminaires in light installation is given by:

$$E_{vd} = \sum_{j=1}^k \frac{I(C_{jd}, \gamma_{jd}) \sin \gamma_{jd} \cos C_{jd}}{(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + (H_j - h_o)^2},$$

and the indirect component $E_{v,ind}$, determined by the reflected luminous flux of street lanes is:

$$E_{v,ind} = \frac{1}{2} q_0 S \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^m \frac{I(C_{ij}, \gamma_{ij}) \cos^3 \gamma_{ij}}{H_j^2} \sin 2\vartheta_i \cos \varphi_i}{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2 + h_o^2},$$

where

$I(C_{ij}, \gamma_{ij})$ - luminous intensity from luminaire j in the direction of point i from calculation grid, given in $C - \gamma$ coordinate system;

$(x_i, y_i, 0)$ - coordinates of point i from calculation grid;

(x_j, y_j, H_j) - coordinates of luminaire j ;

(x_o, y_o, h_o) - observer's coordinates. The observer (or pedestrian) is located on right sidewalk of the street;

q_0 - average luminance coefficient relative to the reflection properties of the used street surface;

S - area of the one element from calculation grid;

The significance of the used geometrical parameters is illustrated in Figure 1.

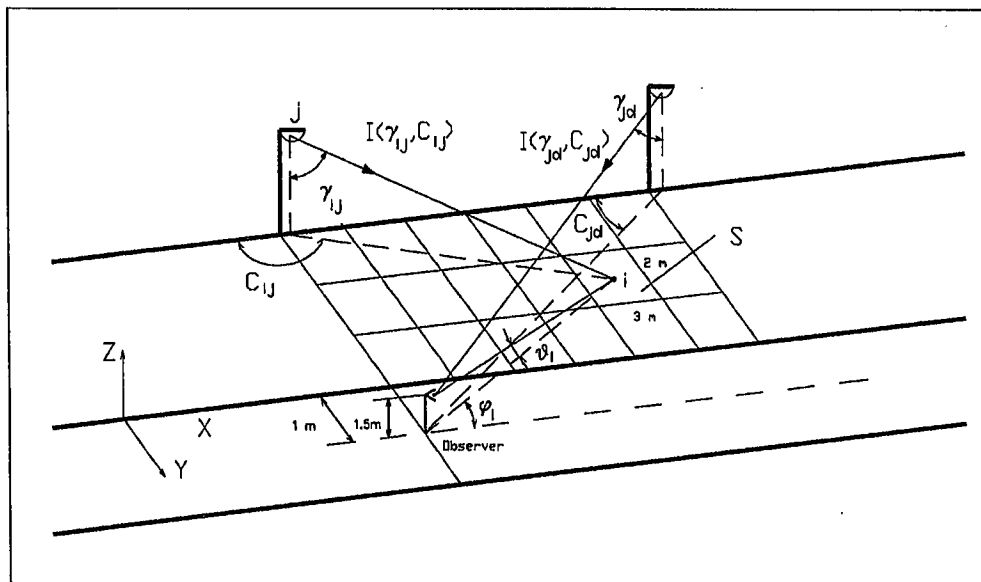


Figure 1

The semi-cylindrical illuminance is calculated by analogy with the vertical plane illuminance evaluation.

In these concrete case a mathematical model is suggested below. With this model luminous intensities in different direction can be determined and this is the way the luminaire light-distribution curve is formed.

MATHEMATICAL MODEL

What is the minimum of the target function:

$$\Phi = C_1 \sum_{p=1}^P I_p \Delta\Omega_p$$

with the following limiting conditions:

$$E_k = \sum_{p=1}^P C_{1p} I_p \geq U_E$$

$$E_{av} = \sum_{p=1}^P C_{2p} I_p \geq E_n$$

$$U_E - g_{En} E_{av} \geq 0$$

$$E_{vd} = \sum_{p=1}^P C_{3p} I_p \geq U_{E_{vd}}$$

$$E_{v,ind} = \sum_{p=1}^P C_{4p} I_p \geq U_{E_{v,ind}}$$

$$U_{E_{vd}} + U_{E_{v,ind}} \geq E_{v,n}$$

$$E_{scd} = \sum_{p=1}^P C_{5p} I_p \geq U_{E_{scd}}$$

$$E_{sc,ind} = \sum_{p=1}^P C_{6p} I_p \geq U_{E_{sc,ind}}$$

$$U_{E_{scd}} + U_{E_{sc,ind}} \geq E_{sc,n}$$

$$I_p \leq C_2 \Phi$$

$$I_{75} \leq C_3 \Phi$$

$$I_{80} \leq C_4 \Phi$$

$$I_{85} \leq C_5 \Phi$$

$$I_p(\gamma \leq \gamma_{\max}) \leq I_p(\gamma = \gamma_{\max})$$

$$I_p \geq 0$$

where

Φ - luminous flux;

I_p - unknown luminous intensity in the desire direction;

$\Delta\Omega_p$ - spacial angle where $I_p = \text{const}$;

$C_1 \div C_6, E_n, g_{En}, E_{v,n}, E_{sc,n}$ are relative to the submitted requirements;

$U_E, U_{E_{vd}}, U_{E_{v,ind}}, U_{E_{scd}}, U_{E_{sc,ind}}$ - additional variables;

$C_{1p} \div C_{6p}$ - coefficients standed before the unknown luminous intensities I_p ;

In view of the fact that the admissible motor car speed is low ($v = 30$ km/h), average luminance is calculated for a 15 m distance from the observer in part in the street lane. For this purpose are required reflection properties of the street surface in dependence of larger viewing angles.

For these considerations experimental researches were carried out for the most popular street surfaces R2, R3 and R4 in dependence of different viewing angles - 1, 2.3, 3.3 and 5.7 degrees relative to 60 km/h, 50 km/h, 40 km/h and 30 km/h motor car speed [7]. The results are given in Table 1.

Table 1

Street surfaces									
α	R2			R3			R4		
	q_0	S_1	S_2	q_0	S_1	S_2	q_0	S_1	S_2
1°	0.99	0.681	2.855	0.100	1.120	4.300	0.077	1.261	3.277
2.3°	0.078	0.409	1.887	0.073	0.560	2.760	0.064	1.261	2.133
3.3°	0.073	0.435	1.942	0.071	0.784	2.596	0.063	0.875	2.187
5.7°	0.081	0.340	0.751	0.077	0.627	2.127	0.068	0.654	1.960

In this case the average luminance of street lane is calculated with the results obtained above.

The researches in this direction continue. The attempts for determination of the optimal light-distribution curve in different cases are carried out at present.

Reference list:

1. Ostovskiy M. A., T. L. Fladina "Standardization problems of city outside lighting", Light-techics, 1967 №9
2. Zilberblat Y.V., M. A Ostrovskiy "City road lighting", 1951
3. Rex C. Highway Res. Board Bull., 1961, №298
4. Vassilev N. I., "Some problems about road lighting theory, design and exploitation" Dissertation, Sofia 1970
5. Monev M. T. "Increasing of the street luminaires effectiveness", Dissertation, Sofia 1984
6. prEN 169/226/ JWG, "Road lighting", 1996
7. Pachamanov A. S., "Photometric research of lighting characteristics in the field of road lighting installations", Dissertation, Sofia 1988

Mathematische Modellierung der Reflektoren von Leuchten

Dipl.-Ing. Dionyz Gasparovsky

Lehrstuhl für Elektroenergetik, Lichttechnische Abteilung

FEI STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slowakei

tel.: 00421 7 791485, e-mail: hung@elf.stuba.sk

1. Einleitung

Heute sind an Kunstbeleuchtung und diese Wege auch an Leuchten, sehr hohe Anforderungen abgestellt. Es müssen solche qualitative und quantitative Parametern sichern sein, wie z.B. Beleuchtungsstärke, Gleichmäßigkeit der Beleuchtung, Lichtfarbe, Ästhetik und Beleuchtungsbehaglichkeit in Raum.

Grundlagende Funktion der Leuchte ist zu verteilen den Lichtstrom der Lichtquellen in Raum. Deshalb sind Leuchten ausrüsten mit solche optische Teilen, wie zum Beispiel Reflektoren (Spiegel-optik), Refraktoren (Linsen) oder Diffusoren. In mehrende Applikation den modernen Beleuchtungssysteme, Reflektoren sind am meisten benutzt für Innen- und Außenbeleuchtung.

Für mathematische Modellierung der Reflektoren von Leuchten man benutzt die Differentialgleichung, welche beschreibt die Situation bei Spiegelung des Lichtstrahles die aus Punktlichtquelle senden sind. Differentialgleichung der Reflexionsfläche ist z.B. in [1] oder [2] abgeführt. Es kann man aber einen einfachen Weg zu Abführung dieser Differentialgleichung zu finden, wie werden wir das sehen im folgendem Beitrag.

2. Bildende Kurve des Reflektors

Optische Teile der Leuchten sind gewöhnlich Reflektoren, welche entweder rotationsymmetrisch oder unsymmetrisch sein kann. Diese Reflexionsflächen sind dann bei Rotation (im Fall der rotationsymmetrisch Reflektoren - Abb. 1a) oder Vorschub (im Fall der rotationunsymmetrisch Reflektoren - Abb. 1b) der so genannte „bildende Kurve“ ausgebildet.

Formelmäßige Erfassung der bildende Kurve ist ein Funktion $\vec{r} = f(\varphi)$,

wobei \vec{r} - ist der Radiusvektor der Punkten, die an bildende Kurve geliegend sind
 φ - ist der Winkel des Radiusvektors

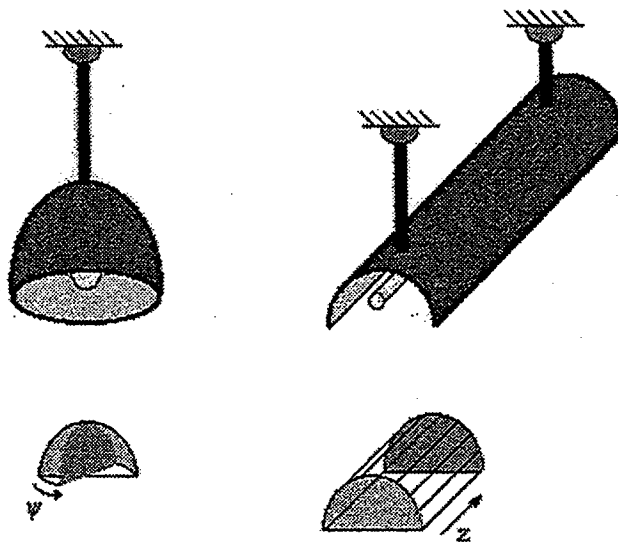


Abb. 1 - Formierung der Reflexionsfläche bei die bildende Kurve

a) rotationsymmetrisch b) rotationunsymmetrisch

3. Abführung der Differentialgleichung der Reflexionsfläche

Die Differentialgleichung werden wir für ein Element der bildende Kurve in Merianfläche abführen. Die Situation für Abführung ist an Abb. 2 dargestellt.

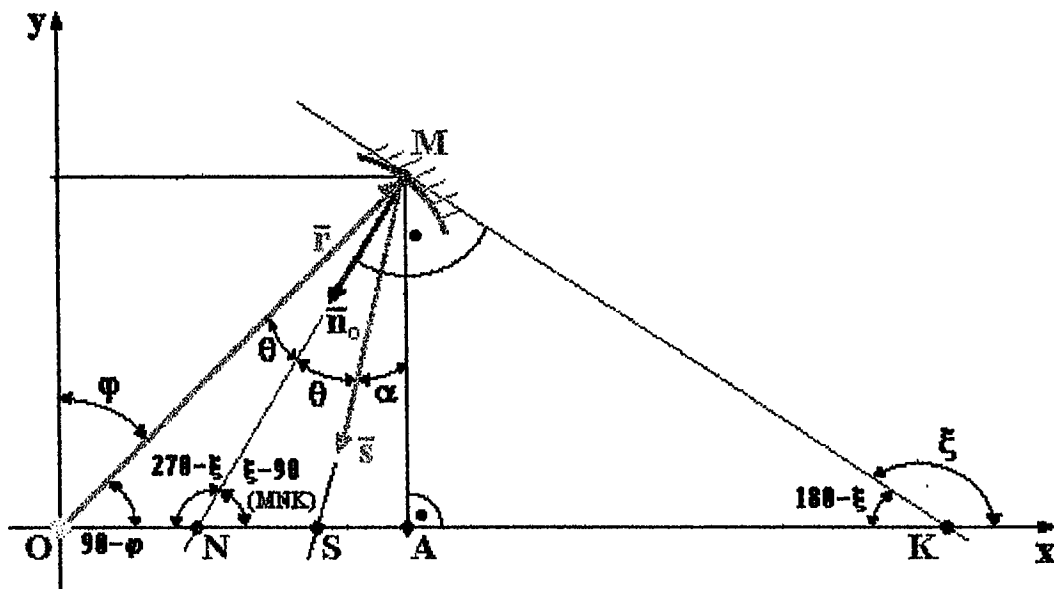


Abb. 2 - Lichtreflexion an einer Element der bildende Kurve
(für Abführung der Differentialgleichung)

M ist ein beliebig Punkt der bildende Kurve der Reflexionsfläche, welcher veränder die Verteilung den Lichtstrom. Die Punktlichtquelle ist dabei im Anfang O der koordinierten System abgelegt. Der Lichtstrahl breitet sich aus der Lichtquelle in Richtung des Vektors \vec{r} , einfalls zur Punkt M wo es reflektiert ist. Hier das Gesetz der Reflexion gültig ist. Nach die Reflexion, der Strahl in Richtung des \vec{s} Vektors einrichtet ist.

Reflexionsgesetz in diesem Fall repräsentiert die Bedingung, daß der Lichtstrahleinfallswinkel (das heißt der Winkel θ , den die Normale \vec{n} der Fläche mit Vektor des einfallendes Strahles \vec{r} abgrenzt) ist gleich mit Lichtstrahlausfallswinkel (das heißt der Winkel θ , den die Normale \vec{n} der Fläche mit Vektor des reflektiertes Strahles \vec{s} abgrenzt). Unsere Aufgabe ist zu finden die Richtung des reflektiertes Strahles α , wenn einfallende Strahl das bei Funktion $r = f(\varphi)$ beschreibt ist, wir halten bekannt.

Richtung der Normale kann man aus Richtung der Tangente zur Reflexionsfläche im Punkt M gedruckt sein. Wie es aus mathematische Analyse bekannt ist, Richtung der Tangente zur Reflexionsfläche können wir drücken aus Ableitung der Funktion, welcher die bildende Kurve beschreibt.

Zuerst bedenken wir eine Kurve $y = f(x)$. Richtung der Tangente zu dieser Kurve im Punkt M ist dann festgestellt bei folgende Gleichung:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \xi \quad (1)$$

wobei dy/dx ist Ableitung von Funktion $y = f(x)$ nach x . Es ist notwendig jetzt der Winkel ξ aus Einfallswinkel φ und Ausfallswinkel α drücken aus. Aus Dreiecken ΔMON und ΔMNA nach notwendige Regelungen haben wir:

$$\theta = 180 - (90 - \varphi) - (270 - \xi)$$

$$\theta = \varphi + \xi - 180$$

$$\theta + \alpha = 90 - (\xi - 90) \quad \varphi + \xi + \alpha - 180 = 180 - \xi$$

und

$$-2\xi = \varphi + \alpha$$

$$\xi = -\frac{\varphi + \alpha}{2} \quad (2)$$

Nach Einsetzung der Gleichung (2) in (1) wir erhalten die Differentialgleichung der Reflexionsfläche (3), die bei bildende Kurve in rechteckige koordinierten System ausgedruckt ist.

$$\boxed{\frac{dy}{dx} = -\operatorname{tg} \frac{\varphi \pm \alpha}{2}} \quad (3)$$

Das Symbol (+) gilt in dem Fall, wenn die ausfallende Mittelstrahlen zu der optische Achse der Leuchte gerichtet sind; sonst das Symbol (-) gültig ist. Bei Transformation den koordinierten System ist jetzt notwendig aus rechteckige zu polare Ausdruck der bildende Kurve überqueren. Das heißt transformieren die Differentialgleichung aus dy/dx zu $dr/d\varphi$ Forme. Wir verwanden die Transformationsgleichungen, welche im Hinblick auf die Situation an Abb. 2 (Orientation den Winkel φ) die folgende Formen haben:

$$\begin{aligned} x &= r \sin \varphi & dx &= dr \sin \varphi + r \cos \varphi d\varphi \\ y &= r \cos \varphi & dy &= dr \cos \varphi - r \sin \varphi d\varphi \end{aligned}$$

dabei dx und dy sind Differentialen den x und y . Anteil dieser Differentialen darstellt die Ableitung der Funktion $y = f(x)$ nach x . Es ist notwendig die Abhängigkeit $dr/d\varphi$ aus dy/dx zu erreichen, deshalb wir ausführen noch folgende Regelungen:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dr \cos \varphi - r \sin \varphi d\varphi}{dr \sin \varphi + r \cos \varphi d\varphi} \quad \bigg| \quad \frac{1}{d\varphi} \frac{1}{\cos \varphi}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dr}{d\varphi} - r \operatorname{tg} \varphi}{\frac{dr}{d\varphi} \operatorname{tg} \varphi + r} \quad \frac{dr}{d\varphi} = r \frac{\operatorname{tg} \varphi + \frac{dy}{dx}}{1 - \frac{dy}{dx} \operatorname{tg} \varphi} \quad (4)$$

Wir können jetzt einsetzen der Ausdruck (3) zu Gleichung (4), wodurch wie ausschließen die rechteckige Koordinierten x und y :

$$\frac{dr}{d\varphi} = r \frac{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \frac{\varphi \pm \alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg} \frac{\varphi \pm \alpha}{2} \operatorname{tg} \varphi} \quad (5)$$

Obenerwähnt Ausdruck (5) ist möglich zu einfach machen bei verwendung der Gleichung für Tangens den Unterschied von zwei Winkeln: $\operatorname{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\beta}{1 + \operatorname{tg}\alpha\operatorname{tg}\beta}$.

$$\frac{dr}{d\varphi} = r \operatorname{tg}\left(\varphi - \frac{\varphi \pm \alpha}{2}\right) = r \operatorname{tg}\left(\frac{2\varphi - \varphi \pm \alpha}{2}\right) = r \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi \pm \alpha}{2}\right) \quad (6)$$

Endlich haben wir die Differentialgleichung in bekannte Forme.

$$\boxed{\frac{dr}{d\varphi} = r \operatorname{tg} \frac{\varphi \pm \alpha}{2}} \quad (7)$$

4. Lösung der Differentialgleichung

Die Differentialgleichung kann man benutzt für Analyse oder Synthese der Reflexionsfläche. Mit Analyse man untersucht die Mittelstrahlenverlauf in Meridianfläche wie die Abhängigkeit an Einfallswinkel des Lichtstrahles. Der Formel für Mittelstrahlenverlauf $\alpha=f(\varphi)$ bekommen wir einfach aus Differentialgleichung (7). Lösung der Differentialgleichung für unzentrische Kreislinien oder zentrische Kegelschnittkurven ist z.B. in [1] oder [3]. Die Synthese - Zusammensetzung (Berechnung) der Reflexionsfläche aus erwünschte Mittelstrahlenverlauf in Meridianfläche, ist aber ein schweriger Problem. Lösung der Synthese für unzentrische Kreislinien ist beschreibt z.B. in [2].

Ziemlich bekannt ist die Lösung der Differentialgleichung für Fall der Kegelschnittkurven, welche eine Parabel, Hyperbel, Ellipse oder Kreis kann sein. In Lichttechnik aber in letzten Zeit man mehr und mehr benutzt auch Reflektoren grundlegend an bildende Kurve den höchsten Grad, wie algebraische Kurven (z.B. Kardioide - für Leuchten mit total Lichtquelleabschirmung - Abb. 4a, 4b) oder Spiralen (z.B. logarithmisches Spiral - für Leuchten mit unsymmetrisches LVK - Abb. 4c). So wir beschäftigen uns auch mit Modellierung der Reflektoren bildet mit diese Kurven. Ergebnisse unseren Forschung zeugt, daß diese Kurven haben interessante optische Eigenschaften und können für Bildung der Reflektoren benutzt sein. Lösung der Differentialgleichung für diese Kurven zeugt die Tabelle 1. Ergebnisse der "ray-tracing" Methode für logarithmisches Spiral, Konchoide, Lemniskate und Kardioide sind an Abb. 3 dargestellt.

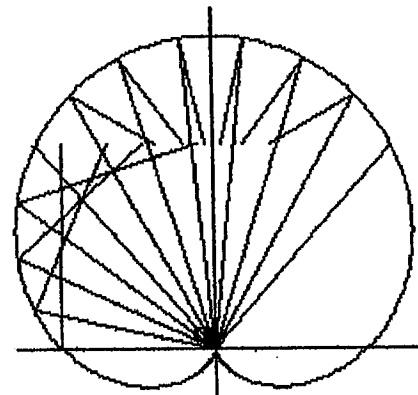
Kurve	Analytisch Formel	Lösung
Cissoïd	$r = a \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi$	$\alpha = \pm \left[\varphi - 2 \operatorname{arctg}(\cot \varphi + 2 \operatorname{cosec} 2\varphi) \right]$
Cardioid	$r = a(1 + \cos \varphi)$	$\alpha = \pm 2\varphi$
Conchoid	$r = \frac{a}{\cos \varphi} \pm b$	$\alpha = \pm \left[\varphi - 2 \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{1 \pm b/a \cos \varphi} \right]$ ak $b=0$: $\alpha = \pm \varphi$
Lemniscata	$r = a \sqrt{2 \cos 2\varphi}$	$\alpha = \pm 5\varphi$
Pascal Shell	$r = 2a \cos \varphi \pm b$	$\alpha = \pm \left[\varphi + 2 \operatorname{arctg} \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi \pm b/2a} \right]$ ak $b=0$: $\alpha = \pm 3\varphi$ ak $b=2a$: $\alpha = \pm 2\varphi$
Strophoid	$r = -a \frac{\cos 2\varphi}{\cos \varphi}$	$\alpha = \pm \left[\varphi - 2 \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} 2\varphi) \right]$
Archimedes Spiral	$r = a\varphi$	$\alpha = \pm \left[\varphi - 2 \operatorname{arc} \cot \varphi \right]$
Hyperbolic Spiral	$r = \frac{a}{\varphi}$	$\alpha = \pm \left[\varphi + 2 \operatorname{arc} \cot \varphi \right]$
Logarithmic Spiral	$r = a \cdot e^{b\varphi}$	$\alpha = \pm \left[\varphi - 2 \operatorname{arctg} b \right]$

Tabelle 1 - Lösung der Differentialgleichung für Kurven die höchsten Grad

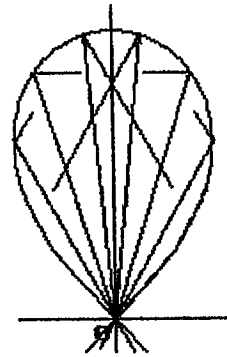
5. Simulationsprogrammen

An unserem Lichttechnische Abteilung wir haben mehrende Programmen für PC ausgebildet, z.B. *Lux Junior* (1995)^[3] für Kegelschnittlinien und *High Curves ST* (1996) für Kurven den höchsten Grad. PC Modellierung enthält diese Schritten:

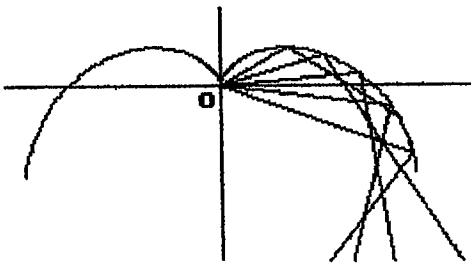
1. Benutzung und Lösung der Differentialgleichung
2. Rotation und Vorschub der Koordinatensystem
4. Multi-Reflexionen
5. LVK der Reflektor (ausgedruckt von LVK der Lichtquelle)



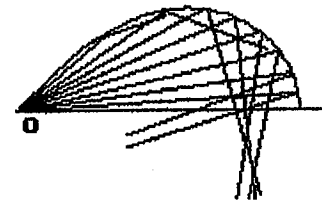
a) *Kardioide*



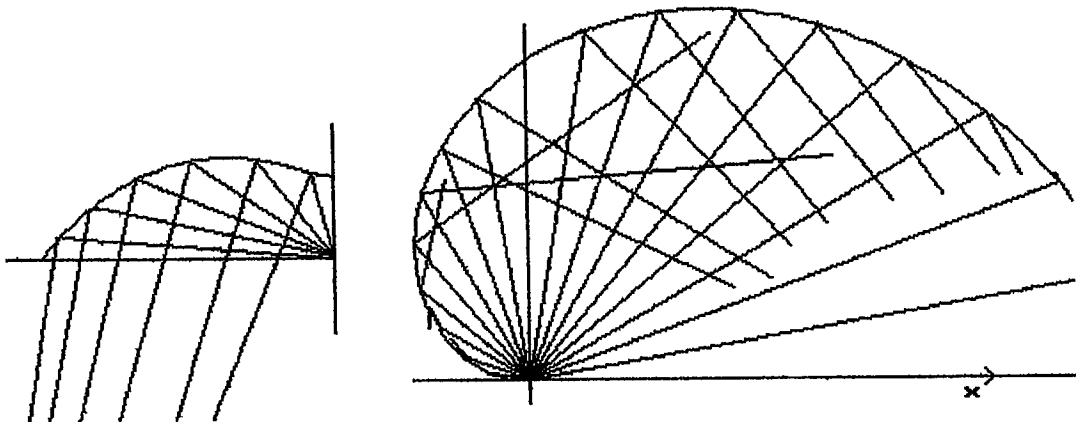
b) *Lemniskate*



c) *Pascal Munschel*



d) *Archimedes Spiral*



e) *Konchoide*

Abb. 3 - Mittelstrahlenverlauf in Meridianfläche für einige Kurven

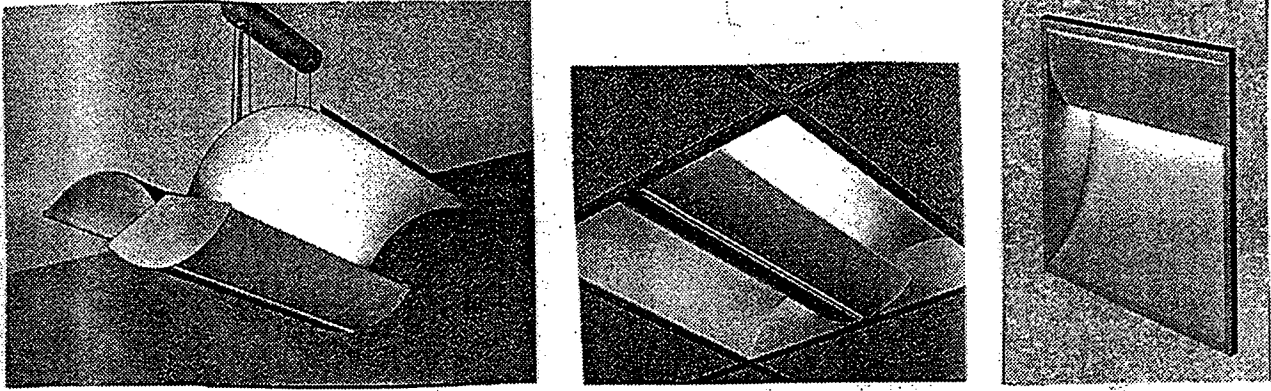


Abb. 4 - Spezielle Leuchten ALTER mit Reflektor bildet bei Kardioide und Spirale

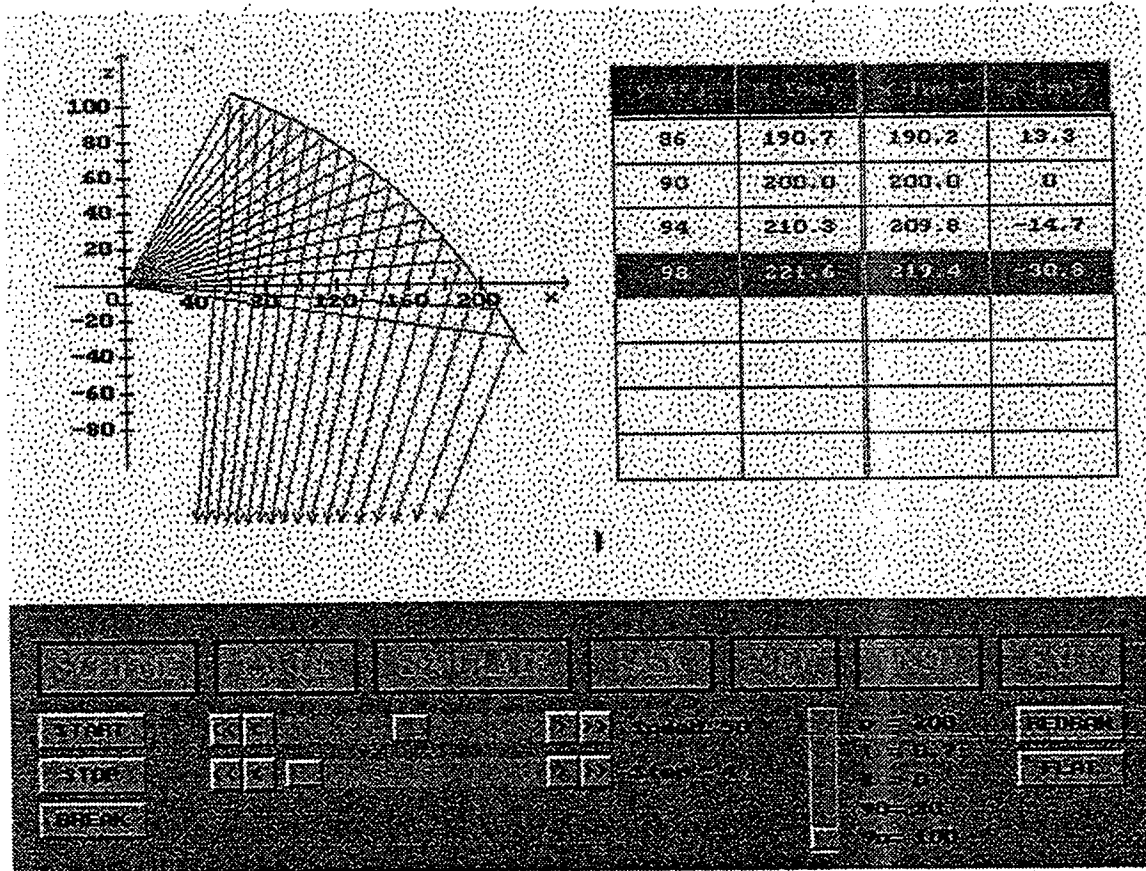


Abb. 5 - Lux Junior Programmbildschirm

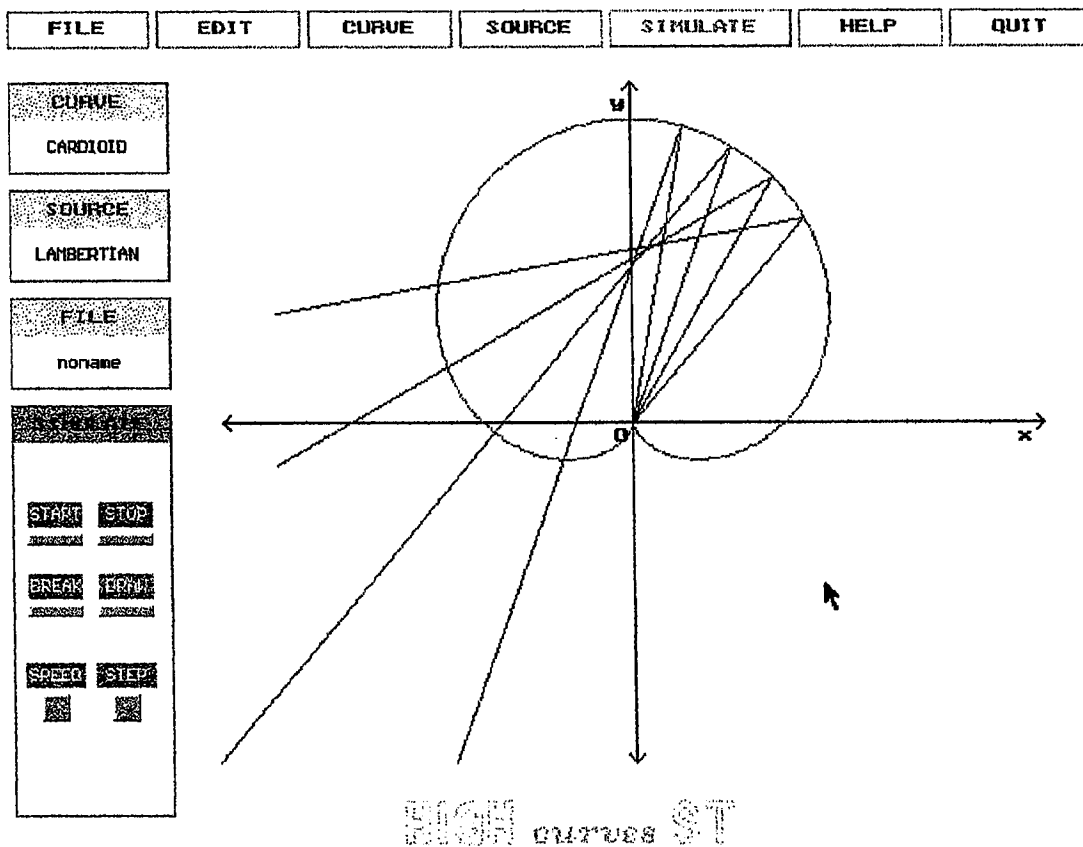


Abb. 6 - High Curves ST Programmbildschirm

6. Schlußfolgerung

Abgeführte Differentialgleichung der Reflexionsfläche ist einfach zu verstehen. Ermöglicht anschaulich begreifen der Prinzip von Modelierung des optischen Teiles von Leuchten, auch wie die Simulation des Mittelstrahleverlaufes bei die „ray-tracing“ Methode.

Der High Curves ST Programm kann man für Untersuchung von Kurven den höchsten Grad und für Berechnung den Reflektoren von Leuchten zu verwenden. Besonders perspektive sind Kardioide, Konchoide und Spiralen, am meisten für Leuchten mit Leuchtstofflampen, das heißt für rotationunsymmetrisch Reflektoren.

Obengenannte Programmen Lux Junior und High Curves ST ist möglich an folgende Adresse der Internet Netze zu finden:

<http://www.elf.stuba.sk/~hung/light>

Literatur

- [1] Horňák, P.-Trembač, V.V.-Ajzenberg, J.B.: Svietidlá a svetelné zdroje. Alfa Bratislava 1983
- [2] Veselovský, J.: Svietidlá. SVŠT Bratislava 1982
- [3] Raditschová, J.-Pastuchová, E.-Kuma, J.-Gašparovský, D: Direkte Methode der Untersuchung der Kurven, die die Reflexionsflächen bilden. Konferenz Lux Junior, Ilmenau 1995
- [4] Gašparovský, D.-Raditschová, J.- Pastuchová, E.: Výpočet tvoriacich kriviek reflektorov svietidiel. Konferenz "Svetlo '96", Bratislava 1996
- [5] Gašparovský, D.: Matematické modelovanie tvoriacich kriviek reflektorov svietidiel pomocou výpočtovej techniky. Konferenz "Světlo '96", Brno 1996
- [7] Rektorys, K.: Přehled užité matematiky. SNTL Praha 1968
- [8] Semendiaev, K.A.-Bronštejn, I.N.: Spravočnik po matematike. Moskva

Neue numerische Methoden für Verarbeitung von spektralen Meßdaten

Kránicz, Balázs, Dipl. Ing.

Universität Veszprém

Lehrstuhl der Bildverarbeitung und Neurocomputer

Egyetem Str. 10., H-8200 Veszprém, Ungarn

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden neue Methoden zur Interpolation von Meßdaten, gemessen mit einem Spektroradiometer, vorgestellt. Oft wird in der Praxis vernachlässigt, daß das Meßgerät nicht den Wert der Spektralfunktion bei der eingestellten Wellenlänge liefert, sondern das Integral der Spektralfunktion in einem engen Spektralbereich, bedingt durch die Bandbreite des Gerätes. Die Methoden, die in dieser Arbeit beschrieben werden, ermöglichen die Berücksichtigung dieser Fehlerquelle, und ermöglichen die Interpolation der Meßwerte zur Bestimmung einer besseren Annäherung der Spektralfunktion.

1. Einleitung

Spektrale Energieverteilungen werden noch heute zum Großteil mit Spektroradiometern gemessen, die einen Gitter- oder Prismen-Monochromator beinhalten. In den meisten Fällen wird das Spektrum nur bei einer niedrigen Zahl der Wellenlängen gemessen, so daß die Aufgabe besteht, von diesen Meßwerten auch auf die Energiewerte bei dazwischenliegenden Wellenlängen zu schließen. Oft wird die Interpolation der Meßwerte mit einer herkömmlichen Interpolationsformel, wie z.B. Lagrange-Interpolation oder Spline-Funktion, durchgeführt. Solche Methoden berücksichtigen jedoch nicht, daß die Messung mit einem Monochromator die Spektralwerte auf die Bandbreite integriert bestimmen.

In meiner Diplomarbeit habe ich, unter anderem, neue Interpolationsverfahren entwickelt, die die genauere Bestimmung der Strahlungsfunktion (Energieverteilung) ermöglichen. In dieser Arbeit soll das mathematische Modell beschrieben werden, das die Annäherung der gesuchten spektralen Strahlungsfunktion $S(x)$ ermöglicht.

2. Messungen und Mathematik

In den technischen Wissenschaften ist es oft nötig, die Funktion einer physikalischen Größe durch Messungen festzulegen. In der optischen Spektrometrie, z.B. wird die spektrale Strahldichtevertelung aus Messungen bei gegebenen Wellenlängen bestimmt. In der Mathematik können wir das so ausdrücken, daß wir Funktionen vom Typ $R \rightarrow R$ behandeln wollen, die die Menge von realen Zahlen in die Menge von realen Zahlen abbilden.

Wenn die Verteilungsfunktion von einer kleineren Zahl von Messungen bei Fixpunkten bestimmt werden soll, müssen wir uns einer Interpolationsrechnung bedienen. Falls das Meßgerät die Verteilungsfunktion selbst erfaßt, macht das kein Problem. Falls jedoch, wie in der Spektrometrie, das Integral der Verteilungsfunktion gemessen wird (da ja zur Messung immer eine endliche Leistung benötigt wird, und so die Verteilungsfunktion bei unendlich schmaler Bandbreite nicht gemessen werden kann), sind weitere Überlegungen notwendig, die jedoch bei den herkömmlichen Interpolationsverfahren vernachlässigt wurden.

In dieser Arbeit wird diskutiert, wie die gesuchte Funktion in diesem Fall aufgrund der Meßdaten interpoliert werden müßte.

3. Die mathematische Formulierung des Problems

Es gebe die Funktion $f: [a, b] \rightarrow R$ und das Grundpunktsystem $\{x_i\}$, wo $a, b \in R$, $a < b$, $n \in N^+$ und $x_i = a + \frac{b-a}{n} \cdot i$, $i = 0, \dots, n$. (Das Grundpunktsystem besteht z.B. bei einer spektralen Strahldichteverteilungsmessung aus den Wellenlängen wo mit einem scannenden Spektrometer gemessen werden soll.)

Sei h die Distanz von zwei benachbarten Grundpunkten, das heißt $h = \frac{b-a}{n}$.

Die Werte $m_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f$ ($i = 0, \dots, n-1$) (in unserem Beispiel die Photoströme des optoelektrischen Meßwandlers bei den λ_i voreingestellten Wellenlängen) sind bekannt. Die Frage ist, wie f aufgrund der „Integralmuster“ m_i am besten angenähert werden kann.

Für unsere Untersuchungen ist es genug anzunehmen, daß $f \in C^2([a, b])$. (Auf die Sprache der Spektroradiometrie übersetzt bedeutet das, daß die gemessene Strahldichtefunktion im Intervall $[a, b]$ zweimal kontinuierlich ableitbar ist.)

Ich habe drei Methoden zur Lösung dieses Problems erarbeitet, die im folgenden beschrieben werden sollen. Bei allen drei Methoden wird eine Funktion g für die Interpolation benutzt, wobei g aus kubischen Splinen besteht und $g \in C^2([a, b])$.

3.1 Methode 1

Wählen wir für das Grundpunktsystem die auf $\{x_i\}$ zurückgeführte Menge $\{z_i\}$ ($z_i = x_i + \frac{h}{2}$, $i = 0, \dots, n-1$) (das heißt ein Grundpunktsystem, das verglichen mit den vorgewählten Wellenlängen um eine halbe Bandbreite verschoben ist), und nehmen wir als Funktionswerte die Werte $k_i = \frac{1}{h} \cdot \int_{x_i}^{x_{i+1}} f = \frac{m_i}{h}$ ($i = 0, \dots, n-1$).

Die Funktion $g_1: [z_0, z_{n-1}] \rightarrow R$, die aus kubischen Splines besteht, soll dann an die Punkte k_i angepaßt werden. Diese Methode kann sehr natürlich vorkommen und ist schon mehrmals in der Lichttechnik verwendet worden, aber die Approximation ist nicht so gut.

Es kann bewiesen werden, daß $f(z) - g_1(z) = O(h)$, wobei $z \in [z_0, z_{n-1}]$.

3.2 Methode 2

Sei $\varphi(x) = \int_a^x f$ die Integralfunktion von f . Weil f in $[a, b]$ kontinuierlich ist, wird $\varphi: [a, b] \rightarrow R$ die Stammfunktion von f sein, die bei a den Wert 0 aufnimmt. Offensichtlich ist $\varphi \in C^3([a, b])$.

Interpolieren wir die Funktion φ , das heißt die Stammfunktion von f mit der Funktion $g_2: [x_0, x_n] \rightarrow R$, wo g_2 aus kubischen Splines besteht.

Grundpunktsystem: $\{x_i\} \quad (i = 0, \dots, n)$

Funktionswerte: $\varphi_i = \sum_{j=1}^i m_{j-1} = \sum_{j=1}^i \int_{x_{j-1}}^{x_j} f, \quad (i = 0, \dots, n).$

$$\varphi_0 = 0.$$

Die Funktion f kann dann mit g_2' angenähert werden, denn $f = \varphi'$ und g_2 interpoliert φ .

Die Werte $\varphi_i \quad (i = 0, \dots, n)$ fallen offenbar genau auf die Stammfunktion von f , die in $x_0 = a$ den Wert 0 annimmt.

Probleme können bei den Endpunkten der Funktion, das heißt bei den ersten und letzten gemessenen Punkten auftreten: $g_2''(x_0)$ und $g_2''(x_n)$ werden gewöhnlich als 0 definiert. In diesem Falle würde sich g_2' gegen die Endpunkte geraderichten.

Statt dessen schlage ich vor, daß die Werte $g_2''(x_0)$ und $g_2''(x_n)$ als zweite Derivierte mit der Hilfe von progressiven und retrograden Differenzen von den Werten φ_i angenähert werden sollen. Gegen die Endpunkte bekommen wir dann bessere Approximation. ($g_2''(x_0)$ und $g_2''(x_n)$ können frei vorgeschrieben werden, deren beschränkte Werte beeinflussen die Größenordnung der Approximation nicht [2].)

Es kann nachgewiesen werden, daß $f(x) - g_2'(x) = O(h^2)$, wobei $x \in [x_0, x_n]$.

Wir haben diese Methode bei der Neuberechnung der Strahlungsfunktion von CIE Normlichtart D65 verwendet [1], und gezeigt, daß kleine, aber nicht zu vernachlässigende Unterschiede auftreten, und hoffen, daß bei einer Neudefinition der CIE Normlichtarten dies berücksichtigt wird.

3.3 Methode 3

Die Werte von $f = \varphi'$ sollen in den Grundpunkten mit Hilfe von endlichen Differenzen genähert werden. An diese genäherten Punkte soll eine Funktion g_3 angepaßt werden, wobei g_3 aus kubischen Splines besteht. g_3 wird dann f annähern.

$v: [x_3, x_{n-3}] \rightarrow R$ ist die Funktion, die die Funktion $f = \varphi'$ in $[x_3, x_{n-3}]$ in der Größenordnung $O(h^5)$ annähert:

$$v(x) = \frac{1}{60 \cdot h} \cdot (-\varphi(x-3 \cdot h) + 9 \cdot \varphi(x-2 \cdot h) - 45 \cdot \varphi(x-h)) + \\ + \frac{1}{60 \cdot h} (45 \cdot \varphi(x+h) - 9 \cdot \varphi(x+2 \cdot h) + \varphi(x+3 \cdot h)) \quad , \quad x \in [x_3, x_{n-3}]$$

Es muß bemerkt werden, daß eine solche Konstruktion von $u(x)$ die Annäherung von $\varphi'(x)$ mit zentralen Differenzen bedeutet.

Grundpunktsystem der Interpolation: $\{x_i\}$ ($i = 3, \dots, n-3$).

Funktionswerte: $\{v_i\}$, $v_i = v(x_i)$, wo ($i = 3, \dots, n-3$).

Da z.B. $\varphi(x_i - 2 \cdot h) = \varphi(x_{i-2}) = \varphi_{i-2}$, ist

$$v_i = \frac{1}{60 \cdot h} \cdot (-\varphi_{i-3} + 9 \cdot \varphi_{i-2} - 45 \cdot \varphi_{i-1} + 45 \cdot \varphi_{i+1} - 9 \cdot \varphi_{i+2} + \varphi_{i+3}).$$

Die Funktion g_3 , die aufgrund der vorstehenden schon konstruiert werden kann, interpoliert v , und v nähert f .

Es kann bewiesen werden, daß $f(x) - g_3(x) = O(h^3)$, wobei $x \in [x_3, x_{n-3}]$.

4. Beispiel

Die Genauigkeit der untersuchten Methoden kann auf Grund von gemessenen Spektraldichtefunktionen schwer nachgewiesen werden. Statt dessen zeige ich die Anwendbarkeit der Methoden im Falle einer analytischen Funktion. Abbildung 1. zeigt die analytische Funktion f , wobei

$$\text{dom}(f) = [1, 11], \quad f(x) = \sum_{k=1}^6 a_k \cdot \exp\left(-\frac{1}{b_k} \cdot (x - c_k)^2\right), \quad \text{wobei}$$

$$a_1 = 3; a_2 = 4; a_3 = 2; a_4 = 1; a_5 = 5; a_6 = 3;$$

$$b_1 = 0,4; b_2 = 5; b_3 = 3; b_4 = 0,1; b_5 = 0,2; b_6 = 6;$$

$$c_1 = 3; c_2 = 0; c_3 = 6; c_4 = 5; c_5 = 7,5; c_6 = 12.$$

Von dieser Funktion nehmen wir Muster bei 40, 70 und 120 Grundpunkten, wo die Muster immer die Integrale zwischen den zwei benachbarten Grundpunkten sind. Abbildung 2, 3 und 4 zeigen in den drei Fällen die Fehler zwischen der Grundfunktion und den mit Hilfe der verschiedenen Methoden interpolierten Funktionen.

Im Beispiel wurde die Vorschreibung der Endbedingungen mit Hilfe von endlichen Differenzen nach Größenordnung $O(h^3)$ gemacht.

Wie ersichtlich, wenn nur sehr wenige Stützpunkte zur Verfügung stehen (40 in unserem Beispiel von Abbildung 2) ist der Unterschied zwischen den verschiedenen Methoden zwar vorhanden, aber nicht allzu groß (Unterschiede von ungefähr 1 : 3 sind vorhanden).

Falls jedoch die Zahl der Grundpunkte auf 70 oder 120 erhöht wird (Abbildung 3 und 4), wird der Unterschied zwischen der herkömmlichen Methode und den neuen Methoden beträchtlich.

5. Zusammenfassung

In spektrometrischen Messungen wird die Verteilungsfunktion aus Integralmessungen bei einer vorgegebenen Zahl von Stützpunkten bestimmt. In der vorliegenden Arbeit habe ich gezeigt, daß mit Hilfe von verkraftbarem mathematischem Aufwand eine viel bessere Bestimmung der Verteilungsfunktion erreichbar ist, als bisher praktiziert.

In der vorliegenden Arbeit - die ein Teil meiner Diplomarbeit als "Technischer Informatiker" ist - habe ich den Einfluß der endlichen Bandbreite für Viereckfunktionen untersucht. Eine weitere Arbeit ist in Vorbereitung, in der die Trapez- oder Dreieckfunktion der Monochromator-Durchlaßkurve berücksichtigt wird.

Ich möchte vorschlagen, daß diese neue Methode als Standardmethode zur Auswertung von spektrometrischen Messungen verwendet wird.

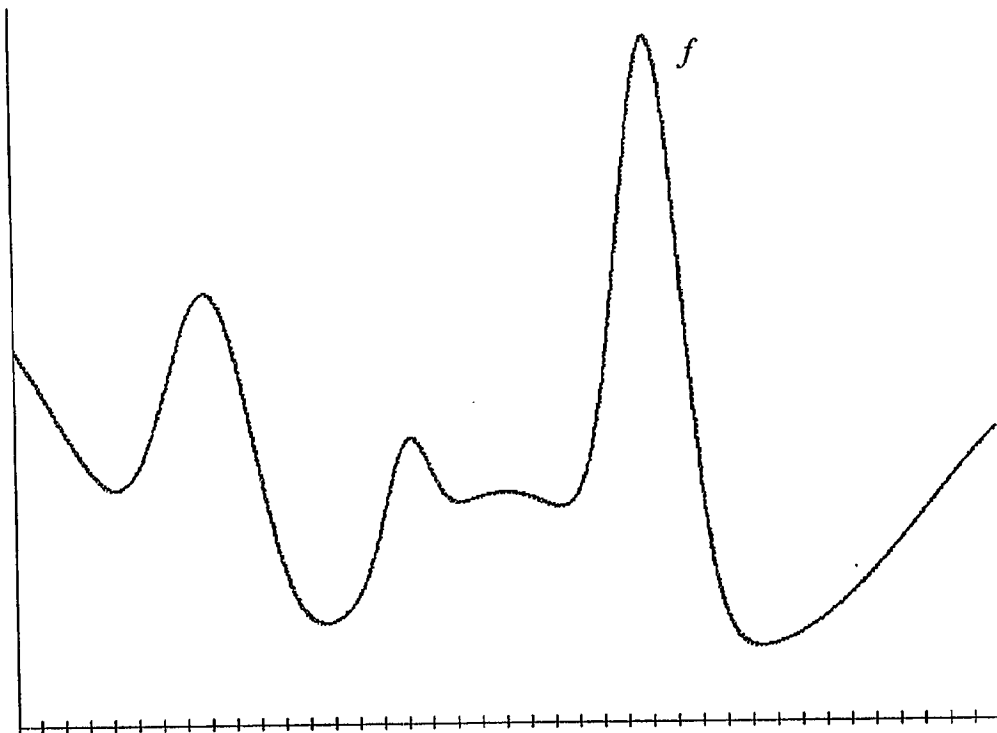


Abbildung 1.

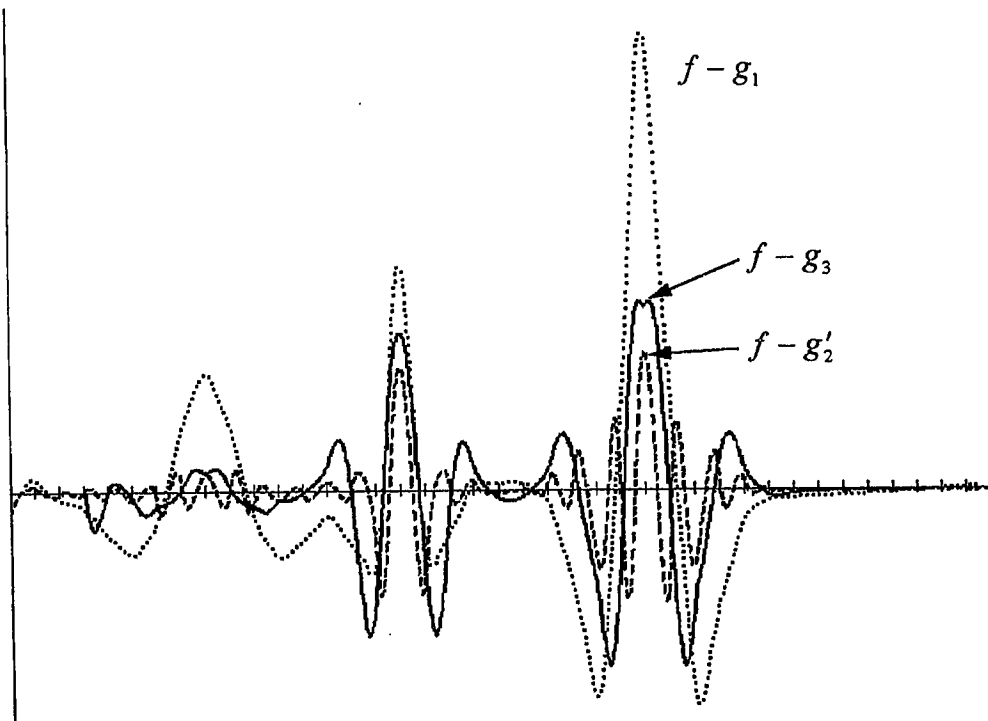


Abbildung 2.

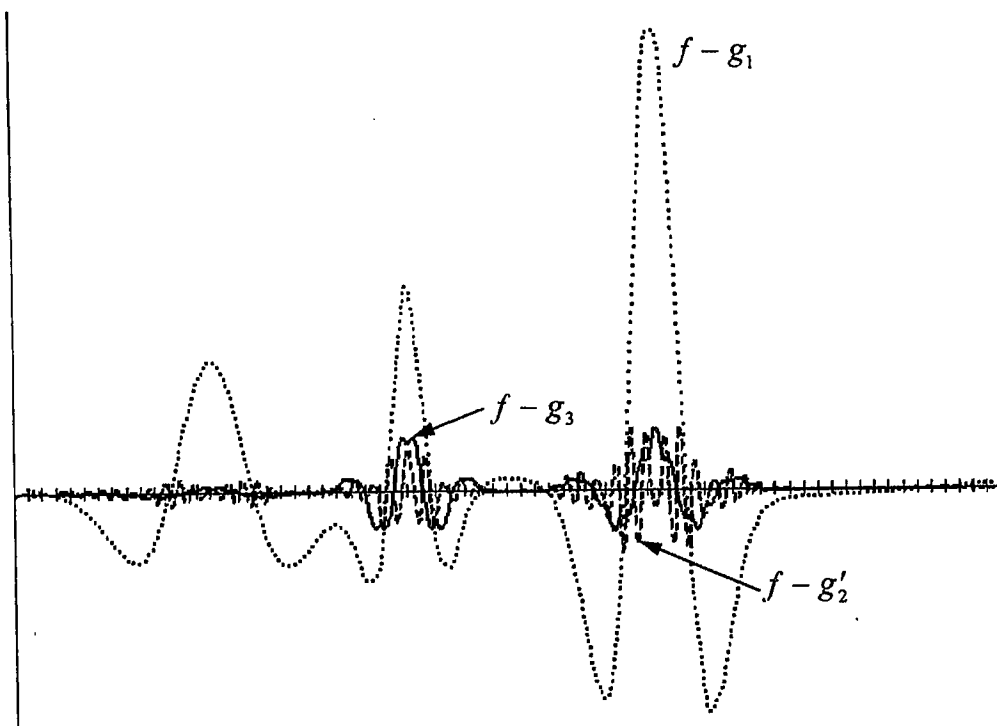


Abbildung 3.

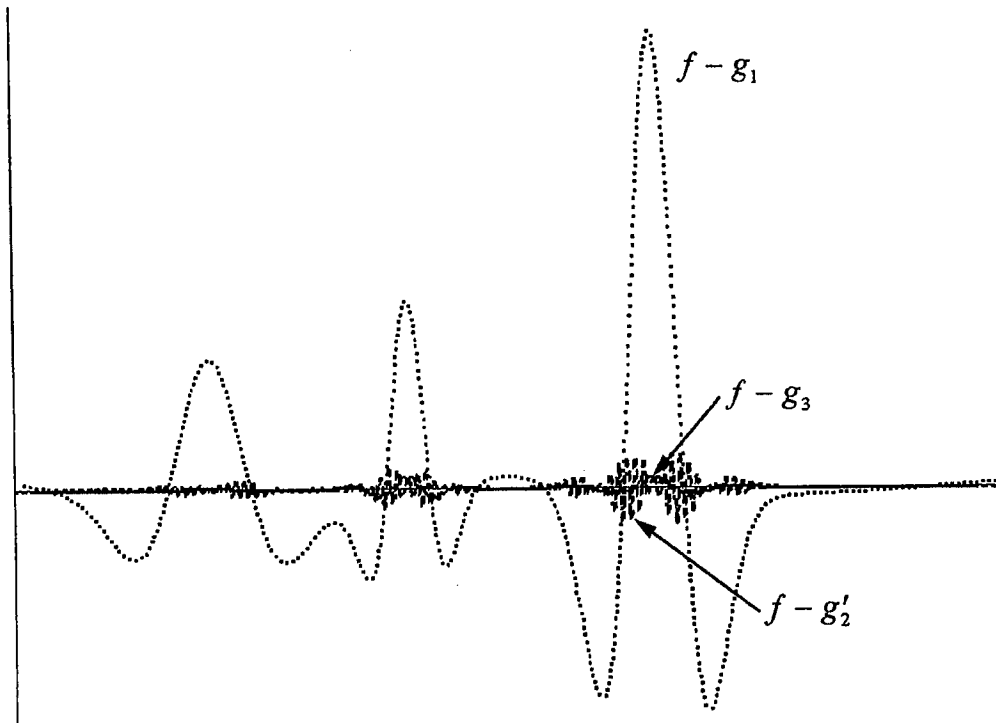


Abbildung 4.

6. Literatur

- [1] J. SCHANDA and B. KRÁNICZ
Possible re-definition of the CIE Standard Daylight Illuminant spectral power distribution
Color Research And Application, Volume 21, Number 6, December 1996
- [2] J. H. AHLBERG, E. N. NILSON, J. L. WALSH
The Theory of Splines and Their Application
Academic Press, New York, San Francisco, London, 1967

Gedanken zur (Ent-)Blendung für Bildschirmarbeitsplätze, insbesondere im Hinblick auf die Umsetzung der EU-RL 90/270

I Einführung:

Es gibt Feld-Untersuchungen [1] bei Büroarbeitsplätzen mit Bildschirmen. Dabei wurden mehrere Lichtsysteme miteinander verglichen. Insbesondere wurde auf die Blendungsproblematik verwiesen. Blendung tritt sowohl bei Leuchten mit Prismen- oder Milchglasabdeckungen, bei Leuchten mit Wabenstegrastern als auch bei Leuchten mit innengekrümmten Rastern auf. Es tritt auch Blendung bei "entblendeten" Leuchten mit Hochglanzspiegelreflektoren, sog. BAP- oder LC-Raster-Leuchten, insbesondere dann auf, wenn durch organisatorische Belange die Anordnung der Arbeitsplätze relativ zu den Leuchten nicht eingehalten werden kann. Leider ist dies bei vielen Arbeitsplätzen der Fall. Allein dieser Sachverhalt läßt schon die Frage aufkommen, ob ein solches Lichtsystem praxisgerecht sein kann.

Eine zentrale Aussage, die sich durch diese Untersuchung wie ein roter Faden hindurchzieht, kommt zu dem Schluß, daß sich die Menschen für Ihre Bedürfnisse, in einem gewissen Rahmen, das Licht selbst einstellen wollen. - Die Berücksichtigung individueller Bedürfnisse wird auch bei der Umsetzung der EU-Richtlinie verlangt.

Es gibt Laborstudien [2] mit einem Modellraum. Dort wurden verschiedene Lichtsysteme untersucht. Dabei wurden sowohl die lichttechnischen Daten als auch die Beurteilung der Mitarbeiter aufgeführt, die in einem solchen Raum arbeiten. Auch hier ist eine der zentralen Aussagen, daß die Mitarbeiter Einfluß auf die Lichtgestaltung und Lichtnutzung nehmen wollen.

Wenn man beide Studien miteinander vergleicht, erkennt man doch, daß viele Aussagen bei der Feldstudie praktisch genauso getroffen werden wie in der Laborstudie. So ist beispielsweise offensichtlich, daß Leuchten, die den weit überwiegenden Teil ihres Lichtes über die Decke in den Raum senden, gegenüber den direkt-strahlenden Leuchten aus physiologischer Sicht deutlich bevorzugt werden.

Aus den Untersuchungen von Gall und Mitarbeitern [3] geht auch hervor, daß die individuelle Gestaltung der Beleuchtungsanlage durch den einzelnen Benutzer nicht zu vernachlässigen ist. Weiterhin wurde dargelegt, daß die Blendungsbegrenzung, insbesondere von Arbeitsplatzleuchten, eine wichtige Rolle spielt.

II Arbeitsschutz:

Es gibt ein neues Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG vom 7.8.96), das am 21.8.96 in Kraft getreten ist. Dieses ArbSchG stellt im Wesentlichen die Umsetzung der EU-Richtlinie 89/391 dar. Nachfolgende Richtlinien oder Verordnungen regeln dabei die Anforderungen im Detail. So wird auch auf die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV

vom 20.3.75, geändert am 4.12.96) verwiesen. Dort regelt der §7 Abs. 3 die Beleuchtung in Arbeitsräumen und Verkehrswegen. Dabei richtet sich die Beleuchtung nach der Art der Sehaufgabe. In der Arbeitsstättenrichtlinie zu §7 Abs.3 wird explizit auf die DIN 5035 verwiesen. Über diesen Umweg gelangt die DIN 5035 praktisch zu Ihrer Bedeutung.

Zu den Arbeitsstätten, die hier angesprochen werden, gehören auch Arbeitsplätze mit Bildschirmen.

Andererseits regelt die Bildschirmverordnung (BildscharbV vom 4.12.96), die Umsetzung der EU-Richtlinie 90/270, auf direktem Wege die Anforderungen an die Arbeitsplätze in Büros mit Bildschirmen. Dabei sind diese Vorschriften Mindestvorschriften, d. h. sie müssen mindestens eingehalten werden.

Dort wird im Anhang explizit aufgeführt:

Störende Blendung und Reflexe oder Spiegelungen auf dem Bildschirm...sind zu vermeiden.

Und weiterhin:

Bildschirmarbeitsplätze sind so einzurichten, daß Lichtquellen ... keine Direktblendung und möglichst keine Reflexion auf dem Bildschirm verursachen.

Damit sind die Vorgaben eigentlich deutlich formuliert:

Man begeben sich auf den Arbeitsplatz und schaue, was der dort Arbeitende beim Blick zur Arbeitsvorlage (Papier oder Bildschirm) im Gesichtsfeld wahrnimmt.

Wer nun glaubt, diese Anforderungen nach EU-RL 90/270 seien nur bedingt oder mit Übergangsfristen zu erfüllen, der sei auf das Urteil des Bundesgerichtshofes (Aktenzeichen ABR 47/95) verwiesen, das am 2.4.96 verkündet wurde. Stark verkürzt und etwas salopp formuliert, heißt es: EG-Recht geht vor Landesrecht. Die EU-Richtlinien sind einzuhalten. Keiner kann sich darauf berufen, er habe es nicht gewußt, oder die in Deutschland genannten Übergangsfristen seien bindend. Seit 1990 sind die EU-Richtlinien publiziert und jedem frei zugänglich.

Was bedeutet nun die Forderung nach Entblendung in der EU-RL sachlich? - Letztendlich sind die nachfolgenden Fragen zu klären und damit technisch mindestens einer Lösung zuzuführen:

Wann stört Blendung oder ein Reflex?

Was bedeutet keine Direktblendung?

An dieser Stelle ist auch klar, daß nur die Leuchtdichte zur Beurteilung herangezogen werden kann; denn nur sie kann "störend" oder "Direktblendung ja oder nein" bewerten.

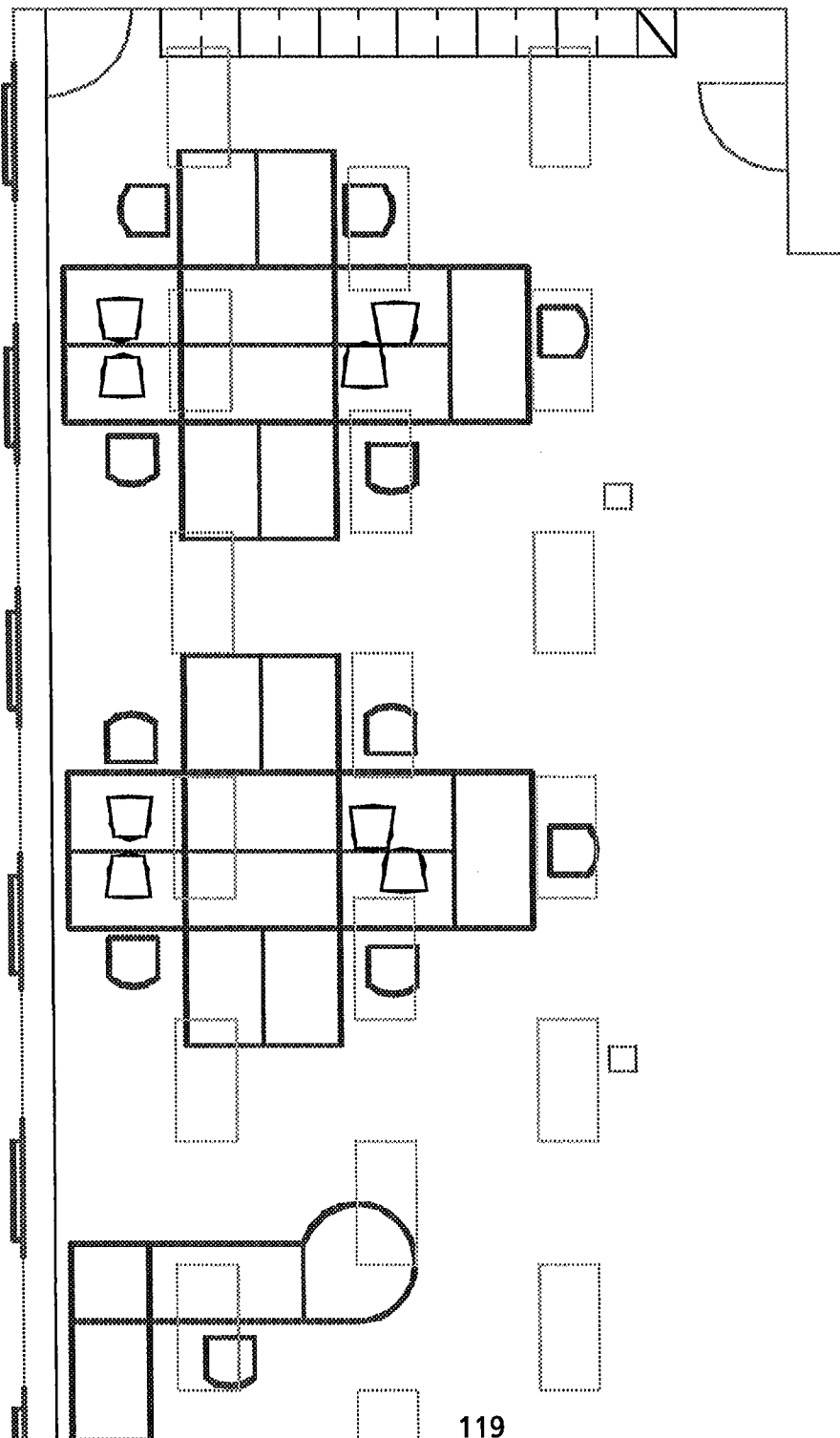
Orientierungs- und Wegleitungsmaßstab für eine solche Bewertung können nur Untersuchungen sein, wie Sie etwa bei Kokoschka [4] und in den einschlägigen Handbüchern [5] sowie in weiteren ergonomischen Beurteilungen [6] zu finden sind. Über die eigentliche physiologische Bedeutung der Blendung im Arbeitsprozeß sei auf die Publikation von Mayer [7] verwiesen. Aus alle dem kann man einen Maßstab zur Beantwortung der aufgeworfenen Fragen erarbeiten. Als ein wichtiges Kriterium erscheint uns die Aussage:

Die mittlere Leuchtdichte der Arbeitsvorlage im Verhältnis zur maximalen (mittleren) Leuchtdichte des Gesichtsfeld darf nicht größer als zwanzig sein.

Dabei extrapolieren wir die Aussagen von Kokoschka [4] zwischen Schreib- bzw. Lesevorlage und zwischen Bildschirm auch auf die Tätigkeit im ausschließlichen Dialogverkehr am Bildschirm. In der Konsequenz heißt dies: Ist die Leuchtdichte im Gesichtsfeld beim Blick zur Arbeitsfläche größer als das zwanzigfache der (mittleren) Leuchtdichte des Arbeitsfeldes, so führt dies zu Leistungsreduktionen. Wir gehen davon aus, daß dann störende Blendung oder gar Direktblendung vorliegt. Diese wiederum kann durch künstliche Beleuchtung oder auch durch Tageslicht hervorgerufen werden.

III Die Welt der Büroarbeit: niedrige Räume

Wir wollen die Aussagen und Wirkungen nun an einigen Beispielen darlegen: Als erstes betrachten wir einen Büroraum, der auf der linken Seite durch die Fenster mit Tageslicht versorgt wird und dessen künstliche Beleuchtung mit Wabenstegrastern sichergestellt wird. Der Raum selbst hat eine lichte Höhe von ca. 2.6 m.



Wir betrachten zunächst einen Arbeitsplatz an der Fensterfront.

Bild 1 zeigt zwei Reflexbilder auf der linken Seite des Bildschirms. Dies resultieren von den vor dem Bildschirm liegenden Fenstern.

Die Leuchtdichte der Reflexbilder ist auf dem Bildschirm praktisch so hoch, daß keine Information (Schrift in den unteren Zeilen) erkannt werden kann.



Bild 1: FensterAPoVorh.pict

Bild 2 zeigt den gleichen Sachverhalt, allerdings ist das hintere Fenster, hier zur Bildmitte zeigend, mit einem Vorhangstore überzogen. Dadurch wird eine Lichtschwächung um etwa den Faktor zehn erreicht. Wie man sieht, wird es besser, aber es ist nicht ausreichend.

Es liegt in beiden Fällen störende Reflexblendung vor.



Bild 2: FensterAPo/mVorh.pict

Im folgenden zeigen wir den gleichen Sachverhalt aus einer anderen Arbeitsposition und bei bildschirmfüllendem Text.



Bild 3: FensterAP1oVorh.pict

Bild 4 zeigt nun den mit Text gefüllten Bildschirm. Durch die Reflexblendung kann der Text praktisch nicht gelesen werden. Der Mitarbeiter müsste, will er den Text lesen, ständig seinen Kopf, ja sogar seinen Oberkörper so nachführen, daß der Reflex immer an einer anderen Stelle erscheint.

Diese Reflexblendung ist im Sinne der EU-RL störend.

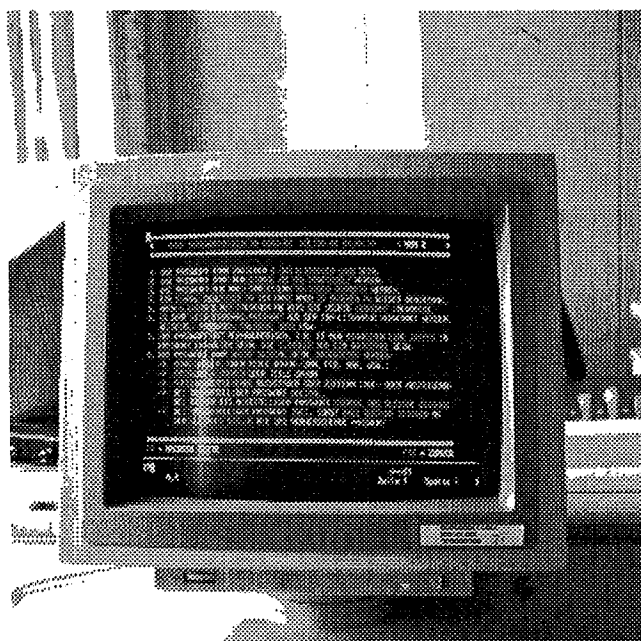


Bild 4: FensterAPTExtoVorh.pict

Bild 5 zeigt, wie man es richtig macht. Als Blendschutz ist eine "transparente" Folie im Einsatz, die einerseits den "Durchblick" erlaubt und andererseits eine Abschwächung der Leuchtdichte etwa um einen Faktor zwanzig sicherstellt.

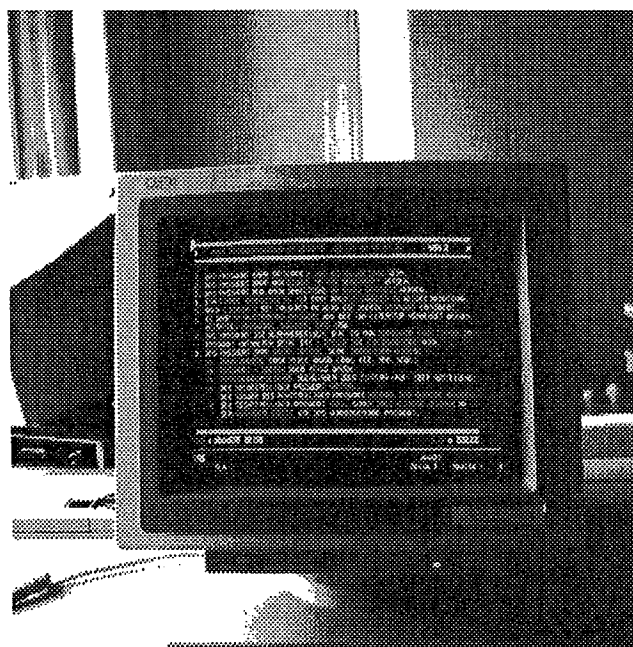


Bild 5: FensterAPTExtmVorh.pict

Und jetzt der Arbeitsplatz bei künstlicher Beleuchtung:

Offenkundig führen die Stegrasterleuchten sowohl zur Reflex- als auch zur Direktblendung:

Bild 6 zeigt die im Bildschirm reflektierten Leuchten in "ihrer vollen Schönheit". Die Reflexblendung ist offenkundig. Es gilt Analoges wie bei der Tageslichtsituation.

Es handelt sich um störende Reflexblendung.

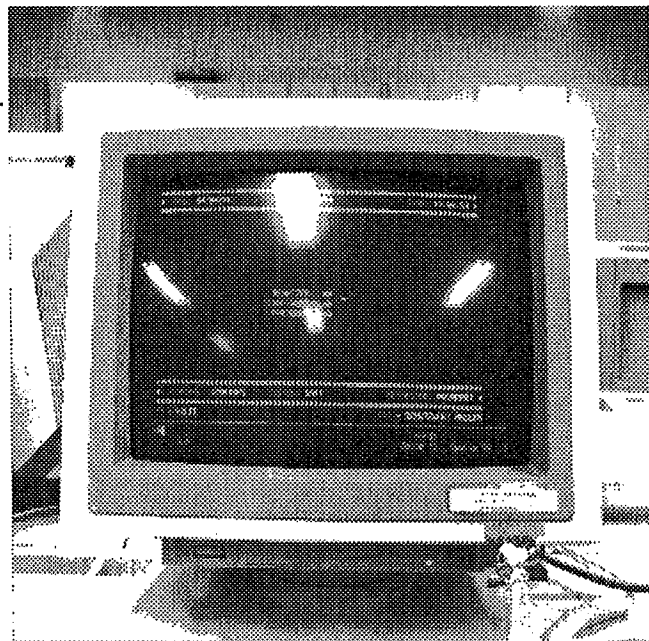


Bild 6: DirLeuh2.5mhinterAP.pict

Bild 7 zeigt einen Micromeshfilter, der als "Blendschutz" verwendet wird. Hier wird zwar die Leuchtdichte der Blendquellen auf dem Bildschirm reduziert. Gleichzeitig wird aber auch der Kontrast insgesamt so reduziert, daß das Lesen der Bildschirminformation nicht mehr ermüdungsfrei möglich ist.

Dieser Filter kann sicherlich nicht die Lösung des Problems sein.

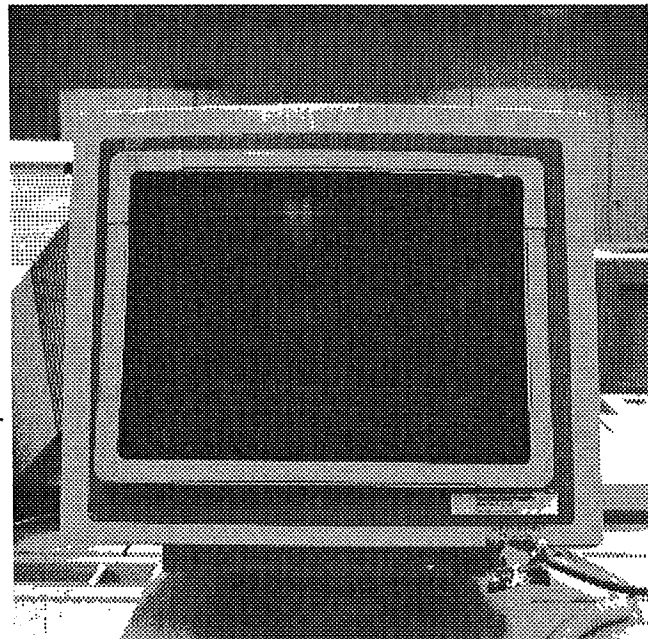


Bild 7: DirLeuh=2.5mhinterAPMicro.pict

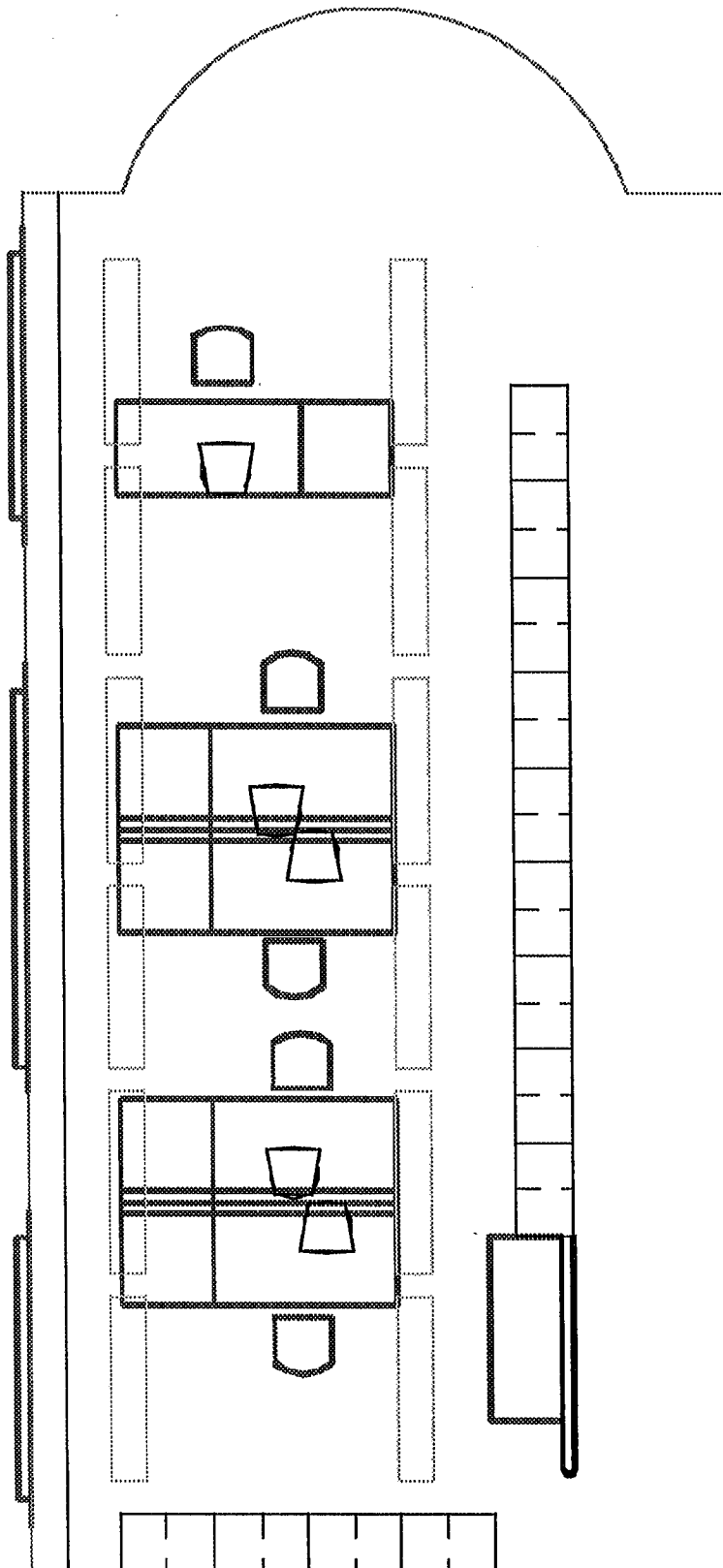
Bild 8 zeigt, daß das Problem nahezu unabhängig von der Position des Bildschirms im Raum auftritt. Die Blendung ist nur größer oder kleiner, in jedem Fall aber störend.



Bild 8: dirLeuh2.5mhinterAP1.pict

IV. Die Welt der Büroarbeit: hohe Räume

Als nächstes betrachten wir einen hohen Büroraum, der sowohl auf der linken Seite durch die Fenster als auch durch die rückwärtige Rundkuppel mit Tageslicht versorgt wird, und dessen künstliche Beleuchtung mit mattglänzenden Spiegelrasterleuchten sichergestellt wird. Der Raum selbst hat eine lichte Höhe von ca. 6.0 m.



Der Blick in den Raum aus stehender Position offenbart die Problematik der Größe und des Tageslichtes.

Bild 9 zeigt, daß beim Blick zum Bildschirm von der gezeigten Arbeitsposition aus, die linke Fensterfläche in ihrer vollen Größe und Leuchtdichte wahrgenommen wird.

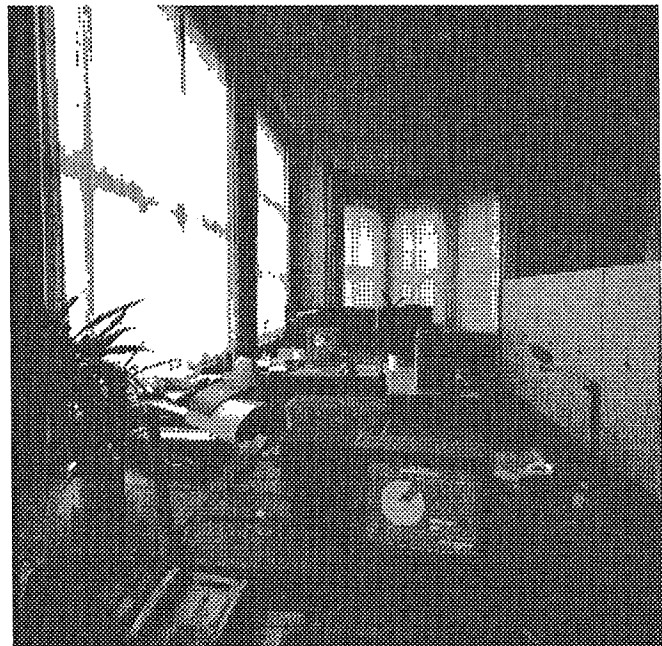


Bild 9: ->Raum.pict

Aber auch des nachts, mit künstlicher Beleuchtung, wie in Bild 10 gezeigt, treten im Gesichtsfeld des Mitarbeiters die Leuchtenleuchtdichten zutage.

In beiden Fällen ist die Leuchtdichte (der Fenster oder Deckenleuchten) etwa um das hundertfache größer als die Leuchtdichte des Bildschirms.

Es liegt Direktblendung vor.

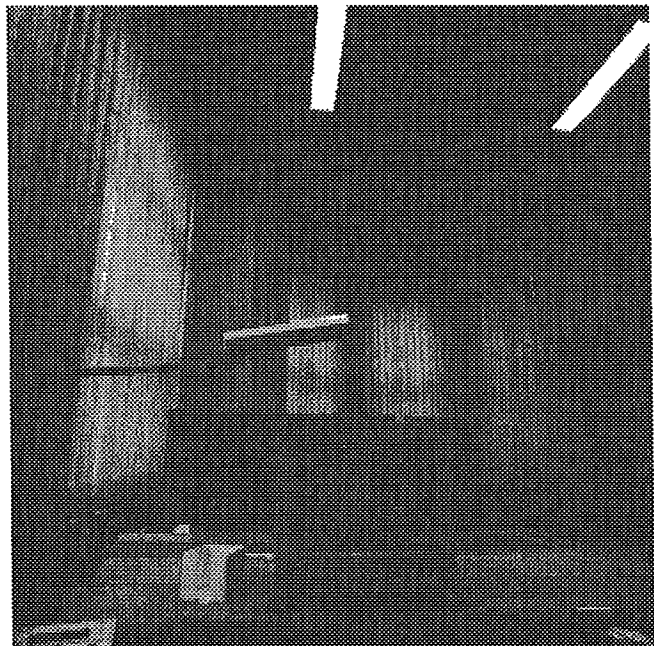


Bild 10: DirLeu6mAP.pict

Bild 11 zeigt, sogar die Reflexblendung der Leuchten auf dem Bildschirm ist durch die spiegelnde Oberfläche (Akkommodationsprobleme) nicht zu vernachlässigen.

Ob die hier gezeigte Direktbeleuchtung, auch aus juristischer Sicht, überhaupt noch die EU-Richtlinien erfüllen kann, wird an anderer Stelle erörtert [8].

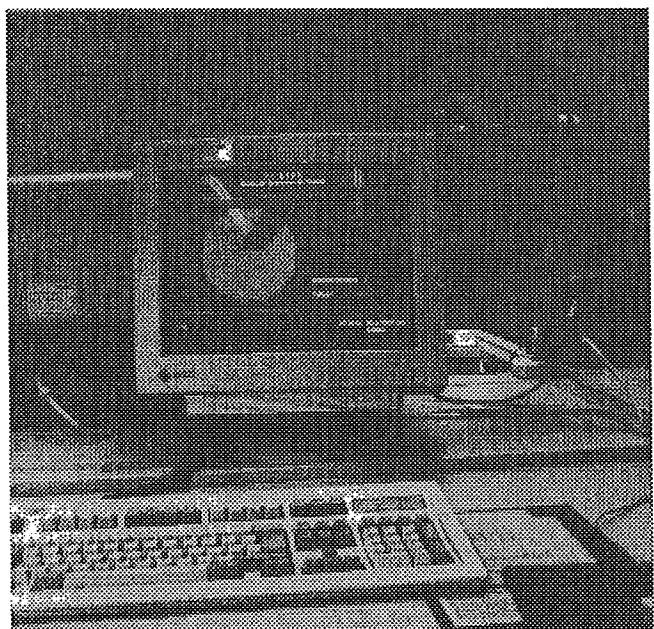


Bild 11: DirLeuh=6mhinterAP.pict

Der Blick zu einem "normalen" Bildschirmarbeitsplatz zeigt die Problematik in ihrer vollen Wirkung:

Links, tagsüber die Fensterseite, also wird bei Sonnenschein der Vorhang geschlossen. Folglich wird die Beleuchtungsstärke reduziert. Anschließend wird die künstliche Beleuchtung eingeschaltet. Dort tritt aber beim Blick zum Bildschirm die Direktblendung durch die mattglänzenden Spiegelraster auf. -

Andere ergonomische Ungereimtheiten wollen wir aber an diesem Arbeitsplatz nicht weiter kommentieren.

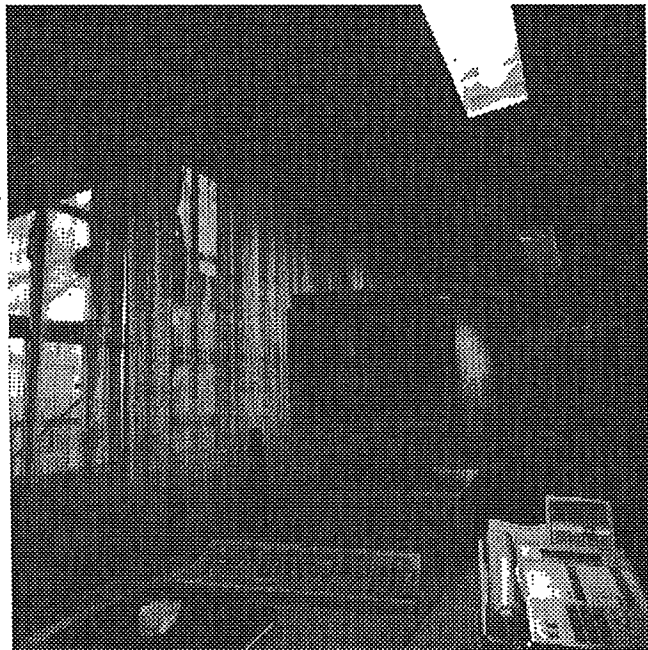


Bild 12: DirLeu2.7mAP.pict

Was beim Blick zum Bildschirm abläuft, wenn hinter dem Bildschirm zu hohe Leuchtdichten auftreten, wird in den folgenden Bildern gezeigt.

Bild 13 zeigt einen Blick zum Bildschirm, wenn die Leuchtdichten im Gesichtsfeld das zwanzigfache der Leuchtdichten auf dem Bildschirm nicht übersteigen.

Das Ergebnis: Die Bildschirminformation kann problemlos gelesen werden.



Bild 13: BildschRollozu.pict

Ganz anders ist der Sachverhalt, wenn die Gesichtsfeldhelligkeit im Hintergrund die Leuchtdichte der Arbeitsvorlage um mehr als das Zwanzigfache, hier sogar mehr als das Fünzigfache, übersteigt.

Bild 14 zeigt, daß durch die größere hellere Gesichtsfeldhelligkeit der Sehapparat sich auf diese einstellt und damit der Bildschirm zu dunkel erscheint. Die Information vom Bildschirm kann praktisch nicht wahrgenommen werden.

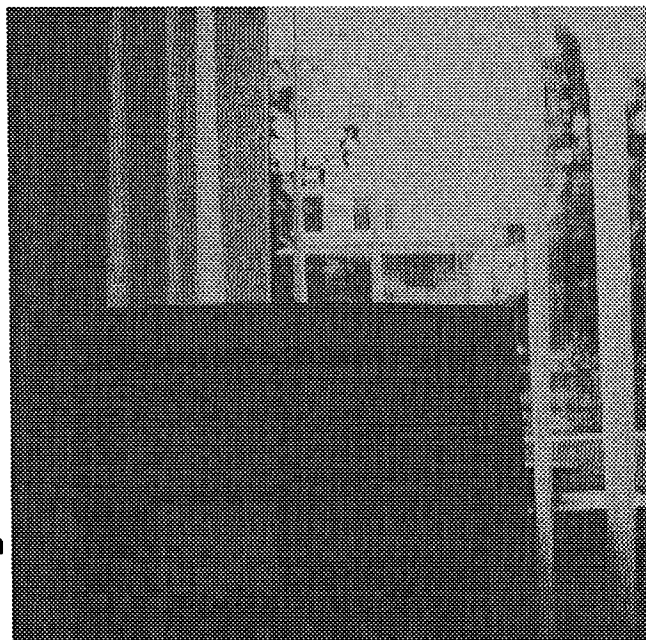


Bild 14: BildschVorFenster.pict

V Nur das zählt, was man sieht.

In der DIN 5035 T7 sind Leuchtdichtegrenzen für jene leuchtenden Flächen vorgesehen, die sich in dem Bildschirm spiegeln. Im Folgenden wollen wir aufzeigen, daß eine solche Aussage durch eine Aussage über die wahrgenommenen Leuchtdichten bzw. scharfen Reflexbilder auf dem Bildschirm ersetzt werden sollten.



Dazu betrachten wir zunächst einen Arbeitsplatz, auf dem zwei verschiedene Ausführungen eines Bildschirms zu sehen sind.

Wir zeigen nun, daß die sich auf der Bildschirmoberfläche spiegelnden Gegenstände, je nach Qualität des Bildschirms, störende Reflexe erzeugen oder auch nicht. Diese aus der Sicht des Arbeitsplatzes unterschiedliche ergonomische Auswirkung ist also - mindestens in gewissen Grenzen - unabhängig von der Leuchtdichte des sich spiegelnden Gegenstandes.

Bild 15 zeigt links einen TFT-Flachbildschirm, der nicht eingeschaltet ist und damit praktisch wirkt, als ob er in Negativdarstellung betrieben würde.

Rechts ist ein CRT-Bildschirm, also eine Kathodenstrahlröhre, eingeschaltet.

Während auf dem linken Bildschirm selbst in Negativdarstellung kein Bild und keine störende Leuchtdichte des Fensterreflexes wahrgenommen wird, ist dieser auf dem rechten Bildschirm, unten links, deutlich zu erkennen.

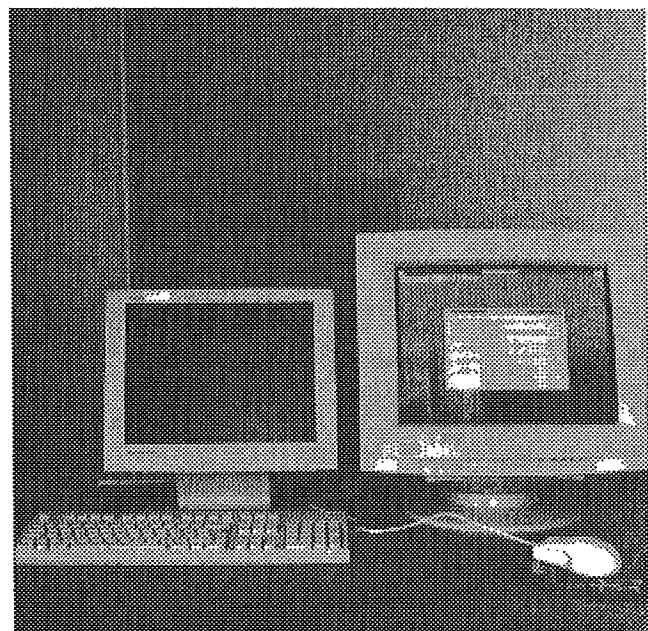


Bild 15: TagReflBlendgBildNeg.pict

Bild 16 zeigt die gleiche Situation, allerdings mit einem hellen, weißen Bildschirmhintergrund. Dort ist praktisch der Reflex auch auf dem CRT-Bildschirm nicht mehr wahrzunehmen.

Da aber im Rahmen der Tätigkeit verschiedene Bildschirmhintergründe zum Einsatz kommen, muß auch der in Bild 15 aufgezeigte Fall ins Auge gefaßt werden.

Damit tritt dort störende Reflexblendung auf.

Der hier gezeigte TFT-Bildschirm ist dem hier gezeigten CRT-Bildschirm eindeutig überlegen.

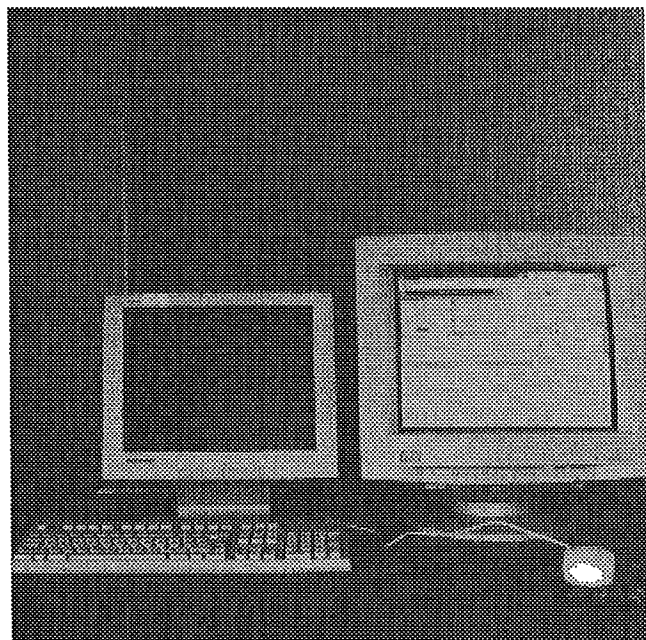


Bild 16: TagReflBlendgBildPos.pict

Daraus darf man aber nicht den Schluß ziehen, alle Flachbildschirme sind besser als CRT-Bildschirme.

Bild 17 zeigt zwei verschiedene Ausführungsarten von TFT-Bildschirmen, der linke erzeugt störende Blendung, der rechte nicht.

Konsequenz: Nur die vom Arbeitsplatz aus gesehene Leuchtdichte kann aus der jeweiligen Arbeitsposition Aufschluß über eine Störung geben.

Mit diesem Kriterium würde man auch die Direktblendung abdecken, wie die vorangegangenen Ausführungen bzw. dieses und das nachfolgenden Beispiele zeigen:

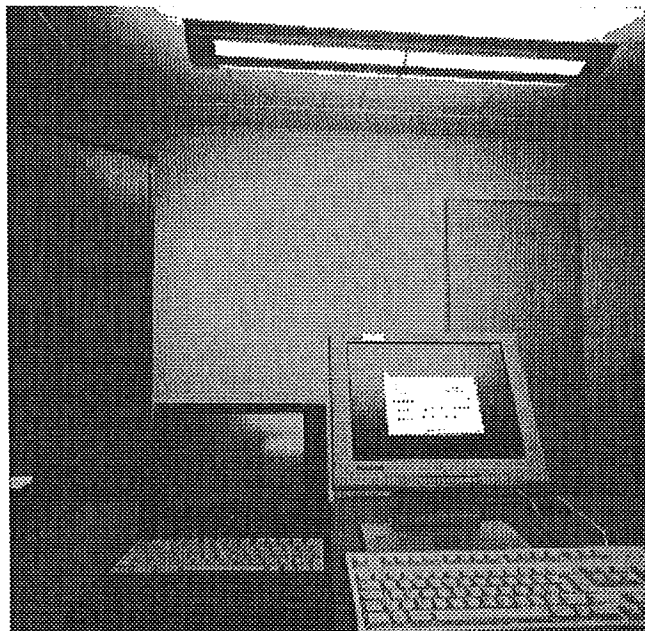


Bild 17: DirBlIndLeuPar.pict

Bild 18 zeigt einen Arbeitsplatz, der diagonal zwischen zwei Indirekt-/Direktleuchten positioniert ist.

Beim Blick zum Bildschirm tritt einerseits die hinter dem Bildschirm liegende Leuchte ins Gesichtsfeld und andererseits die vor dem Bildschirm liegende Leuchte als Reflexbild auf dem rechten Bildschirm in Erscheinung.

Der linke Bildschirm zeigt dagegen keine störende Reflexblendung. In dem gezeigten Fall stört die vor dem Bildschirm liegende Leuchte nur beim rechten Bildschirm.

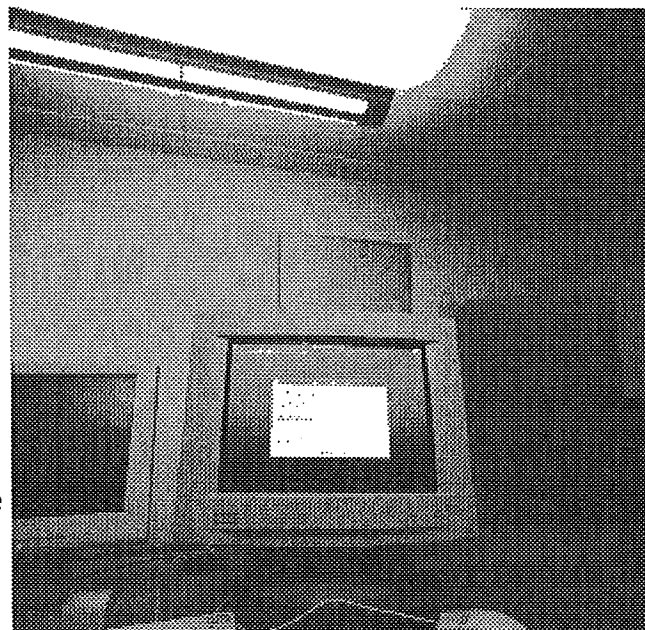


Bild 18: DirBlIndLeuDiag.pict

In beiden Fällen legt aber die (mittlere) Leuchtdichte des Bildschirmes die Decken- und Leuchtenleuchtdichte der hinter dem Bildschirm liegenden Leuchte fest. Geht man, wie hier gezeigt, von 50cd/m^2 Hintergrundleuchtdichte auf dem Bildschirm aus, so darf die Leuchtdichte der Decke oder der Leuchte 1.000cd/m^2 nicht überschreiten.

VI Ceterum censeo ...

Die in diesem Artikel genannten EU-Richtlinien verlangen eine Beurteilung unter anderem der Blendungsproblematik aus der Arbeitsposition. Diese Anforderungen müssen in den deutschen Lichtnormen stärker umgesetzt werden. Dies wiederum bedeutet, daß die wahrgenommenen Leuchtdichten unabhängig von der Art der Beleuchtung zu beurteilen sind.

Literatur:



- [1] Ahmet E. Çakir, Gisela Çakir (1994): LICHT UND GESUNDHEIT - Eine Untersuchung zum Stand der Beleuchtungstechnik in deutschen Büros, 2. erweiterte Auflage, ISBN 3-925251-049-9
- [2] H. W. Bodmann, K. Eberbach, H. Leszczynska (1995): Lichttechnische und ergonomische Gütekriterien der Einzelplatzbeleuchtung im Büro, Schriftenreihe der BAU, Fb 712; ISBN 3-89429-568-6
- [3] D. Gall, C. Vandahl, U. Greiner Mai, S. Wolf, H.-P. Helm (1996): Einzelplatzbeleuchtung und Allgemeinbeleuchtung am Arbeitsplatz, Schriftenreihe der BAU, Fb 1437
- [4] Siegfried Kokoschka, Peter Haubner: Luminance ratios at visual display workstations and visual performance, Lighting Research & Technology 3/1985 p138 - 144 (1985)
- [5] Handbuch für Beleuchtung, Hrsg.: Schweizerische Lichttechnische Gesellschaft (SLG) et al.; ecomed Verlag, ISBN 3-609-75390-0
- [6] P.M. van Bergem-Jansen (1994): Vortrag bei einer Veranstaltung über ergonomische Fragen 1994 in Amsterdam: Gute Beleuchtung am Bildschirmarbeitsplatz gesetzlich vorgeschrieben.
- [7] H. Mayer (1994): Vereinseitigung des Sehens als Ursache arbeitsbedingter Gesundheitsrisiken - ein neuer Ansatz in der betrieblichen Gesundheitsförderung ErgoMed, 18. Jahrgang (1994) Heft 6, S. 172 - 177
- [8] Ahmet E. Çakir (1996): Entsprechen die Normen dem Arbeitsschutz?, Office Management 5/97 S. 55 - 58

Dynamische Blendungsbewertung in Innenräumen

Dipl.-Ing. Philipp Schaeffer

Lichtdesign Ingenieurgesellschaft mbH
Neusser Straße 27-29
50670 Köln

1 Aufgabenstellung

Die dynamische Blendungsbewertung in Innenräumen wurde im Rahmen meiner Diplomarbeit am Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe /1/ in mehreren Versuchsreihen untersucht. An den Ergebnissen einer Versuchsreihe soll der Zusammenhang zwischen der subjektiven Blendungsbewertung und der Bewertung durch das UGR-Verfahren /2/ gezeigt werden.

Das UGR-Verfahren zur Bewertung der Innenbeleuchtung ist ein zeitlich statisches Verfahren. Die UGR-Formel beschreibt die psychologische Blendung von Leuchten bei der adaptionsbestimmenden Hintergrundleuchtdichte L_b . Die UGR-Formel summiert die einzelnen UGR-Beiträge jeder Leuchte auf. Dabei geht die gesehene Leuchtdichte L der Blendlichtquelle quadratisch in die Formel (1) ein. Der Raumwinkel der gesehene Leuchte bzw. der Blendlichtquelle sollte zwischen 0,001 sr und 0,1 sr liegen. Der Grund hierfür ist, daß bei Sehobjekten, die kleiner als 0,0003 sr sind, die Lichtstärke an Stelle der Leuchtdichte für die visuelle Wahrnehmung verantwortlich ist. Für den UGR-Blendungsindex gilt:

$$UGR = 8 \cdot \log_{10} \left[\frac{0,25}{L_b} \cdot \sum \frac{L^2 \cdot \omega}{P^2} \right] \quad (1)$$

Die Position der Leuchte gegenüber dem Beobachter wird durch den Positionsindex bestimmt. Er beschreibt die abnehmende psychologische Blendwirkung von Leuchten bei wachsendem Winkelabstand zur Visierlinie und geht quadratisch in die UGR-Formel ein. Hohe UGR-Werte bedeuten eine große psychologische Blendung, und umgekehrt. UGR-Werte, die kleiner als 10 sind, werden als nicht blendend eingestuft und werden zusammengefaßt als $UGR < 10$ bezeichnet. Die UGR-Formel beinhaltet zwei wesentliche Annahmen. Es wird erstens angenommen, daß der Beobachter vollständig an die Umfeldleuchtdichte im Gesichtsfeld adaptiert ist. Zweitens wird vorausgesetzt, daß sich der Beobachter in bezug auf die Blendlichtquellen nicht bewegt, bzw. daß die Beobachtung von einem festen Positionsort aus erfolgt. Als Folge erhält man ein statisches Blendungsempfinden. In der Praxis sieht die Blendsituation ganz anders aus. Durch verschiedene Bewegungsabläufe am Büroarbeitsplatz erfährt der Beobachter einen dynamischen Blendeeindruck.

2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Bewegungsabläufe einer sitzenden Person an einem Büroarbeitsplatz sind sehr komplex. Es soll daher ein typischer Bewegungsablauf herausgegriffen werden. Eine Person sitzt an einem Schreibtisch und lehnt sich im Stuhl zurück. Der Blick bleibt dabei horizontal auf die gegenüberliegende Wand fixiert. Dieser Bewegungsablauf wird "Vorwärtsbewegung mit horizontaler Blickrichtung" genannt. Bild 1 gibt Aufschluß über den Bewegungsablauf. Ein Fragebogen sollte den subjektiven Blendeindruck der Versuchspersonen erfassen. Gefragt wurde zum einen nach dem Blendeindruck während der Bewegung an hand einer siebenstufigen Skala, wie sie auch in anderen Untersuchungen /3/, /4/, /5/ eingesetzt wird. Zum anderen sollte die Versuchsperson die zeitlichen Änderung des Blendurteils während der Bewegung bewerten. Die Skala umfaßte 5 Attribute (sehr klein, klein, mittel, groß, sehr groß). Dieser Versuchsaufbau

wurde im Rahmen eines Laborversuches entwickelt und fand schließlich in einem Feldveruch Anwendung. Bei der Auswahl geeigneter Versuchsräume wurde auf eine möglichst große Vielfalt an Bürobeleuchtungssystemen geachtet.

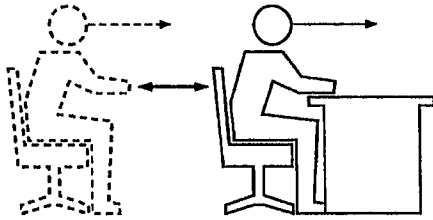


Bild 1

Skizze des Versuchsablaufes "Vorwärtsbewegung mit horizontaler Blickrichtung". Die Versuchsperson bewegt sich längs einer Geraden im Bürostuhl sitzend vom Tisch weg und wieder zurück und blickt dabei stets horizontal auf die gegenüberliegende Wand.

Die Wahl fiel auf sechs unterschiedliche Beleuchtungssysteme, die in verschiedenen Büroräumen der Firma Zumtobel installiert waren. Alle Räume werden als Büroräume von Mitarbeitern der Firma Zumtobel genutzt.

Nr.	Name des Versuchsaumes	Beleuchtungssystem
1.	Spiegelrasterleuchten 50 °	ZUMTOBEL REB 1/58W
2.	Spiegelrasterleuchten 60 °	ZUMTOBEL RED 1/58W
3.	direkt/indirekt Spiegelrasterleuchten	ZUMTOBEL SAD-ID 2/36W
4.	Downlight mit Kompaktleuchtstofflampen	ZUMTOBEL CQF 2/26W TCD
5.	Downlight und Milds Licht	ZUMTOBEL CQF 2/26W TCD + RCA 2/58W
6.	Mildes Licht	ZUMTOBEL RCA 2/58W

Den empirischen Blendurteilen von 6 Versuchspersonen, die diese sechs verschiedenen Beleuchtungsanlagen untersuchten stand die theoretisch ermittelte Blendungsbewertung mit dem UGR-Verfahren gegenüber. Die Berechnung einzelner UGR-Werte erfolgte mit einem im Rahmen einer Diplomarbeit /4/ an der Universität Karlsruhe erstellten Programm BELAP.

3 Auswertungsergebnisse des Feldversuches

Die Ergebnisse der subjektiven Urteile der sechs Versuchspersonen wurden gemittelt und sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Die UGR-Berechnung für jeden Raum im jeweiligen Wegintervall wurde in 0,01m-Schritten mit dem Programm BELAP /4/ durchgeführt und ist exemplarisch für den Raum 4 in Bild 2 dargestellt:

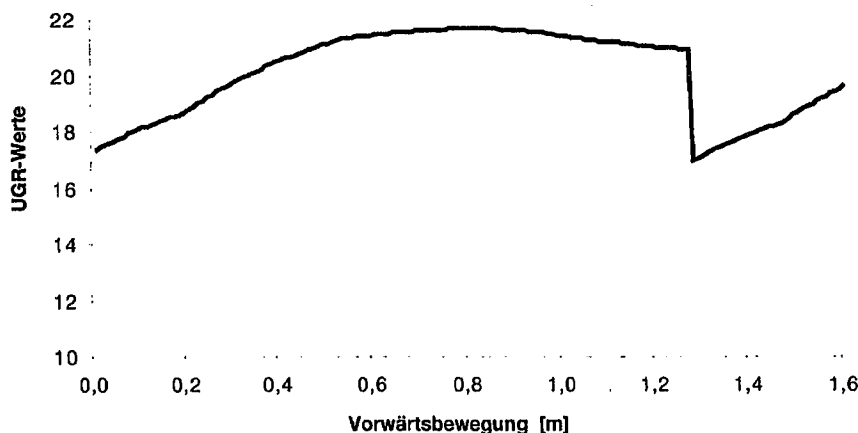


Bild 2

UGR-Werte längs der zurückgelegten Wegstrecke $x = 0$ bis 1,6 m und $y = 1,40$ m, die die Versuchsperson bei der Vorwärtsbewegung mit horizontaler Blickrichtung durchläuft

Der Knick im UGR-Verlauf bei ca. $x = 1,3\text{m}$ resultiert aus dem begrenzten Definitionsbereich des in tabellarisch Form vorliegenden Positionsindex in der UGR-Formel. Für Standorte der Versuchsperson $x > 1,3\text{m}$ befindet sich eine bestimmte Leuchte oberhalb des maximalen Höhenwinkels von ca. 60° (über der Visierlinie des Beobachters), ab dem für eine Leuchte kein Positionsindex mehr definiert ist. Folglich trägt diese Leuchte auch nicht mehr zum UGR-Wert bei. Es kommt zu einem abrupten Abfall des UGR-Verlaufes.

Raum	Frage 1		Frage 2		UGR-Berechnung			
	Blendskala von 0 bis 6		"sehr klein" bis "sehr groß" (sehr klein=0, sehr groß=1)		UGR _{min}	UGR _{max}	Δ UGR	UGR _{mittl.}
	\bar{X}	δ	\bar{X}	δ				
1	1,61	1,17	0,37	0,26	10,00	19,84	9,84	10,93
2	2,77	0,94	0,58	0,20	10,00	21,29	11,29	18,52
3	0,9	0,79	0,10	0,12	10,00	14,23	4,23	12,91
4	2,24	1,29	0,27	0,17	17,02	21,74	4,72	20,13
5	1,87	0,22	0,29	0,03	16,49	19,11	2,62	18,19
6	1,75	0,49	0,16	0,09	18,40	19,63	1,23	19,14

Tabelle 1

Gemittelte subjektive Blendbewertung der sechs Versuchspersonen und berechnete UGR-Werte

\bar{X} : Mittelwert der Einzelergebnisse aus den 6 verschiedenen Beleuchtungssituationen

δ : Standardabweichung der \bar{X} -Werte

UGR_{mittl.}: Mittelwert aller UGR-Werte im jeweiligen Wegintervall

Die Tabelle 2 zeigt die Korrelationen zwischen den berechneten UGR-Werten und den subjektiven Blendurteilen, die in Form einer siebenstufigen Skala (0=keine Blendung, 1=Blendung zwischen nicht vorhanden und merkbar, 2=Blendung merkbar, 3=Blendung zwischen merkbar und störend, 4=Blendung störend, 5=Blendung zwischen störend und unerträglich, 6=Blendung unerträglich) abgegeben wurden. Der maximale UGR-Wert UGR_{max} im Berechnungsintervall, das durch den Anfangs- und Endpunkt der Vorwärtsbewegung durch Variation der Beobachterposition entlang einer Geraden entsteht, weist die besten Korrelationen zu den jeweiligen subjektiven Urteilen der empirischen Feldversuchsdaten auf.

UGR	mit	subjektive Bewertung	Korrelation
UGR _{min}	mit	Blendskala von 0 bis 6	0,15
UGR _{max}	mit	"	0,88
Δ UGR	mit	"	0,44
UGR _{mittl.}	mit	"	0,66

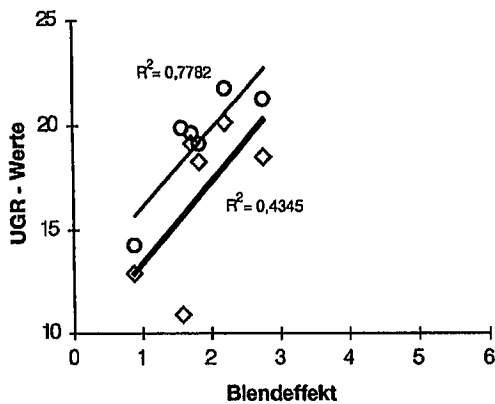
UGR	mit	subjektive Bewertung	Korrelation
UGR _{min}	mit	sehr klein - sehr groß	-0,39
UGR _{max}	mit	"	0,66
Δ UGR	mit	"	0,83
UGR _{mittl.}	mit	"	0,13

Tabelle 2

Korrelation zwischen subjektiven Blendeffekturteilen und UGR-Kennwerten.

Die Korrelation zwischen der dem Blendeffekturteil aus Frage 1 und der Einstufung dieses Effektes auf einer Skala von sehr klein bis sehr groß ergab 0,81. Betrachtet man die anderen Ergebnisse aus dieser Tabelle, so haben der maximale UGR-Wert UGR_{max} und die UGR-Schwankung Δ UGR die besten Korrelationen mit den subjektiven Blendbewertungen. Bild 3 und Bild 4 verdeutlichen diesen linearen Zusammenhang noch einmal.

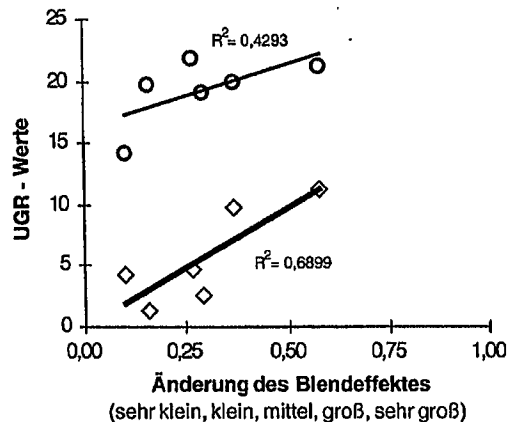
Die mit der UGR-Tabellenmethode gewonnenen UGR-Werte erreichen ebenfalls gute Korrelationen (Tabelle 3) mit den subjektiven Urteilen. Errechnet man aus der UGR-Tabelle eine UGR-Obergrenze UGR_{max} mit der Korrektur aus der Beobachterpositionsvariation wird die Korrelation mit den subjektiven Urteilen noch ein wenig verbessert.



○ UGRmax-Werte ◇ UGR mit-Werte
 — Trendlinie für UGRmax-Werte — Trendlinie für UGR mit.

Bild 3

Die maximalen und gemittelten UGR-Werte Werte UGR_{max} und UGR_{mitl} (als Funktion der Wegstrecke bei der Vorwärtsbewegung) aufgetragen über die subjektiven Blendeffekturteile (Frage 1).



○ UGRmax-Werte ◇ ΔUGR-Werte
 — Trendlinie für UGRmax-Werte — Trendlinie für ΔUGR

Bild 4

Die maximalen und gemittelten UGR-Werte Werte UGR_{max} und UGR_{mitl} (als Funktion der Wegstrecke bei der Vorwärtsbewegung) aufgetragen über die subjektiven Urteile (auf einer Skala von sehr klein bis sehr groß, Frage 2).

UGR-Tabellenmethode	
UGR max	0,90
UGR	0,81

Tabelle 3

Korrelation von UGR-Werten nach der Tabellenmethode und subjektiven Blendurteilen der Versuchsreihe "Vorwärtsbewegung mit konstanter Blickrichtung".

4 Ausblick

Die Ergebnisse ergaben eine gute Korrelation zwischen den subjektiven Blendurteilen und den maximalen UGR-Werten im Wegintervall bei Variation der Beobachterposition entlang einer Wegstrecke bei horizontaler Blickrichtung. Auch die UGR-Tabellenmethode lieferte gut korrelierende Ergebnisse. Die Diplomarbeit /1/ beinhaltete noch zwei weitere Versuchsreihen mit anderen Bewegungsabläufen. Bei der Auswertung dieser Versuchsreihen kommt man zu sehr ähnlichen Aussagen. Hinsichtlich dieser Ergebnisse ist das UGR-Verfahren in der Lage dynamisches Blendungsempfinden wiederzugeben, sofern eine solche Aussage auf Basis von sechs Versuchspersonen und sechs untersuchten Beleuchtungsanlagen getroffen werden kann.

Literatur

- /1/ Schaeffer, Philipp *Dynamische Blendungsbewertung in Innenräumen*, Diplomarbeit am Lichttechnischen Institut, Universität Karlsruhe, 1996
- /2/ CIE *Discomfort Glare in Interior Lighting*, CIE Publikation Nr. 117, 1995
- /3/ Söllner, G. *Ein einfaches System zur Blendungsbewertung*, Lichttechnik Nr.5, 1965, S. 59ff
- /4/ Vercek, Torsten *Modellierung und subjektive Bewertung der Blendung in Innenräumen*, Diplomarbeit am Lichttechnischen Institut, Universität Karlsruhe, 1995
- /5/ Kokoschka, S. *Praktische Relevanz der UGR-Blendungsbewertung*
 Vercek, Torsten Tagungsband Licht 96, Leipzig, S. 402ff, 1996

Praktische Messung von Blendungsparametern am Beispiel des UGR

S. Wolf*

D. Gall*

Es soll ein Meßsystem vorgestellt werden, mit dem es möglich ist, Blendungsparameter einer realen Beleuchtungsanlage zu messen. Beispielhaft soll hier das „Unified Glare Rating“-Verfahren angewandt werden, wobei auch andere Bewertungsverfahren, die auf den gleichen oder ähnlichen Meßgrößen beruhen, realisiert werden können.

Das UGR-Verfahren ist bekannterweise ein beobachterbezogenes und blickrichtungsabhängiges Bewertungsverfahren, bei dem letztendlich die blendungsbeschreibende Größe (der UGR-Wert) mit Hilfe einer Gleichung aus lichttechnischen und geometrischen Größen berechnet wird. Die bisherige Anwendung des UGR-Verfahrens erfolgt durch die Berechnung von UGR-Tabellen oder -Kurven, wobei als Berechnungsgrundlage die im Labor gemessenen Leuchtendaten und eine Reihe von Standardbedingungen dienen. Zu den Standardbedingungen zählen z.B. gleichmäßige Anordnung von Leuchten eines Typs, eine willkürlich festgelegte Beobachterposition und eine vorgeschriebene horizontale Blickrichtung. Für die Beleuchtungsprojektierung sind das alles nützliche Hilfsmittel, aber für die Beurteilung einer realen Beleuchtungsanlage bleibt nur die direkte Anwendung der Formel übrig, wobei die Schwierigkeit in der Messung der Eingabeparameter besteht. Die Berechnung erfolgt durch Formel 1:

$$UGR = 8 \cdot \lg \left(\frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L^2 \cdot \omega}{p^2} \right) \quad (1)$$

mit

L_b – Hintergrundleuchtdichte in cd/m^2 ,

L – Leuchtdichte der leuchtenden Teile einer Leuchte in Richtung des Beobachterauges in cd/m^2 ,

ω – Raumwinkel der leuchtenden Teile einer Leuchte,

p – Positionsfaktor einer individuellen Leuchte nach *Guth*.

*TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Lichttechnik

Folgerichtig müssen die Hintergrundleuchtdichte, die mittlere Leuchtdichte der Leuchten, der Raumwinkel als Maß für die Größe der Leuchten und die Position der Leuchten bezüglich Beobachterposition und Blickrichtung ermittelt werden. All diese Größen liefert eine örtlich aufgelöste Leuchtdichtemessung im Blickfeld des Beobachters unter folgenden Voraussetzungen:

- Das Blickfeld des Beobachters wird vollständig erfaßt.
- Die örtliche Auflösung gestattet die Berechnung der mittleren Leuchtdichte der (relativ kleinen) Lichtquellen.
- Die Bestimmung des Raumwinkels einer Lichtquelle ist mit ausreichender Genauigkeit möglich.
- Der Fehler bei der Ermittlung der Position der Leuchten ist hinreichend klein (wiederum abhängig von der örtlichen Auflösung).
- Die photometrische Auflösung und der Dynamikumfang ermöglichen ausreichend genaue Aussagen über die Leuchtdichte sowohl der Leuchten als auch des Hintergrundes.
- Im Leuchtdichtebild kann unterschieden werden, ob ein Meßpunkt zu einer Leuchte oder zum Hintergrund gehört.

Eine umfassende Abhandlung der theoretischen Betrachtungen und Genauigkeitsanforderungen sind in [1] zu finden.

Der Ablauf einer UGR-Messung kann in groben Schritten wie folgt beschrieben werden:

1. Messung der Örtlichen Leuchtdichteverteilung im Blickfeld
2. Bestimmung eines Merkmals für die Zuordnung einer Bildpunktes zu Hintergrund oder Lichtquelle (Klassifikation)
3. Aufstellen einer Liste von zusammenhängenden „Lichtquellenbildpunkten“, d.h. eine numerische Beschreibung für die Lichtquellen im Bild erzeugen (Segmentierung)
4. Berechnung der Hintergrundleuchtdichte aus den „Hintergrundbildpunkten“
5. Berechnung der mittleren Leuchtdichte, Raumwinkel, und Lichtschwerpunkt für jede Lichtquelle
6. Bestimmung des Positionsfaktors aus dem Lichtschwerpunkt für alle Lichtquellen
7. Anwendung der UGR-Formel für die Berechnung des UGR-Wertes

Zur Messung der Leuchtdichteverteilung dient eine photometrisch und geometrisch kalibrierte CCD-Kamera. Diese unterscheidet sich durch die in [2] verwendete Kamera in folgenden Punkten:

- Es handelt sich um eine sogenannte Digitalkamera, d.h. die A/D-Wandler befinden sich in der Kamera, alle Probleme der analogen Meßwertübertragung in den Framegrabber und der notwendigen Schwarzklemmung entfallen. Der Framegrabber hier stellt nur noch ein Rechnerinterface dar, der digitale Werte überträgt.
- Die Temperaturdrift des Dunkelsignals ist während der Messung durch nicht beleuchtete Bereiche auf der CCD-Matrix erfaßbar und somit korrigierbar.
- Die Belichtungszeit kann vom Rechner aus von weniger als eine Millisekunde bis zu mehreren Minuten eingestellt werden. Das ermöglicht sogenannte „High-Dyn-Messungen“, indem mehrere Bilder einer Szene mit verschiedenen Belichtungszeiten aufgenommen werden. Das Leuchtdichtebild wird dann aus Meßwerten von derjenigen Aufnahme zusammengesetzt, in der der geeignetste Meßbereich verwendet wurde.
- Keinen Unterschied gibt es bei der $V(\lambda)$ -Anpassung, diese ist wie in [2] mittels Vollfilter realisiert.

Wie bereits erwähnt, muß das gesamte Blickfeld mit einer hohen örtlichen Auflösung vermessen werden. In [1] werden für den kritischsten Fall (Leuchte mit minimalen UGR-relevanten Raumwinkel in Blickrichtung) 2 Winkelminuten gefordert. Das ergibt in horizontaler Richtung ca. 5400 Meßpunkte und vertikal ca. 3600. Zum einen ist diese hohe Forderung in der Praxis nicht unbedingt nötig, da dieser kritische Fall praktisch nicht auftritt (bei Messungen wurden gute Ergebnisse mit einer 6'-Auflösung erreicht), andererseits muß man aber zur Unterdrückung des statistischen Rauschens, und somit zur Erhöhung der photometrischen Auflösung mit Makropixeln arbeiten. Dabei werden die Meßwerte benachbarter Pixel gemittelt, wodurch die physische örtliche Auflösung noch höher sein muß.

Da sich diese Forderungen weder mit „üblichen“ CCD-Kameras, noch mit teuren hochauflösenden realisieren läßt, wurde die verwendete Kamera auf einer Positioniermechanik montiert, mit der sich die Kamera um zwei senkrecht zueinander stehende Achsen verdrehen läßt. Die Positioniergenauigkeit beträgt hierbei wenige tausendstel Grad, gleichzeitig wurde die geometrische Verzeichnung der Kamera gemessen. Mit der hierdurch vorliegenden Tabelle kann der Pixelort den Winkelkoordinaten genau zugeordnet werden. Aus diesen Winkelkoordinaten und der aktuellen Kameraposition kann jetzt ein resultierendes Leuchtdichtebild aus Teilbildern bei verschiedenen Aufnahmeorten zusammengesetzt werden. Das Ergebnis ist eine zweidimensionale Matrix von Leuchtdichtewerten bei der die

Spalten und Zeilen den üblichen Polarkoordinaten Azimut ϕ und Poldistanz θ entsprechen.

Als Klassifikationsmerkmal, ob ein Bildpunkt zu einer Leuchte gehört oder dem Hintergrund zugeordnet werden muß, sind verschiedene Varianten denkbar. Möglich sind z.B. eine einfache Schwelle, ein bestimmter Leuchtdichtegradient oder eine Gradientenänderung. In der vorliegenden Version wird eine Leuchtdichteschwelle verwendet, die für die gemessene Leuchtdichtevertelung ermittelt wird. Hierzu wird ein Histogramm erstellt, in dem die Häufigkeitsverteilung über eine Anzahl von Leuchtdichteintervallen, die den gesamten Leuchtdichtebereich abdecken, dargestellt ist. Bei realen Beleuchtungsanlagen bilden sich hier charakteristische lokale Minima und Maxima, aus denen sich relativ sicher ein Leuchtdichteschwellwert ableiten läßt. Hat ein Meßpunkt eine höhere Leuchtdichte als dieser Schwellwert gehört es zu einer Leuchte, sonst ist er Bestandteil des Hintergrundes.

Für die Segmentierung werden jetzt zusammenhängende Leuchtenbildpunkte gesucht, wobei Methoden der klassischen Bildverarbeitung angewandt werden. Speziell kommt hier ein modifiziertes Zeilenkoinzidenzverfahren zum Einsatz. Für jedes Leuchtgebiet wird ein Datensatz angelegt, der aus einer Liste von Bildzeilen mit dem jeweiligen Anfangs- und Endpunkt des Leuchtenbereiches besteht. Anders formuliert besteht ein Leuchtdatensatz aus einer Menge von (L, ϕ, θ) -Tripeln, die je ein Leuchtensegment beschreiben. Die Größe eines solchen Leuchtensegmentes mit den Kantenlängen $\Delta\phi$ und $\Delta\theta$ entspricht genau dem Meßraaster. Der Raumwinkel $\Delta\omega$ berechnet sich demzufolge aus $\Delta\phi \cdot \Delta\theta \cdot \sin(\theta) \cdot \Omega_0$. Der Raumwinkel einer Leuchte ist dann die Summe der Raumwinkel aller zugehörigen Leuchtensegmente.

$$\omega = \sum \Delta\omega = \sum \Delta\phi \cdot \Delta\theta \cdot \sin(\theta) \cdot \Omega_0 \quad (2)$$

Die Berechnung der mittleren Leuchtdichte einer Leuchte erfolgt raumwinkelgewichtet nach folgender Gleichung:

$$L_m = \frac{1}{\omega} = \sum L \cdot \Delta\omega \quad (3)$$

Für die Bestimmung des Positionsfaktors wird der Schwerpunkt der Leuchte berechnet, indem analog zur Mechanik die Leuchtdichtevertelung als Massendichtevertelung auf einer Kugeloberfläche betrachtet wird. Nach Anwendung der bekannten Schwerpunktgleichungen erhält man die Schwerpunktkoordinaten (ϕ_s, θ_s) . Aus diesen wird durch lineare Interpolation der Tabellenwerte der Positionsfaktor ermittelt. Sollten die Schwerpunktkoordinaten die Tabellengrenzen überschreiten, wird die Leuchte als für die UGR-Bewertung nicht relevant gekennzeichnet.

Die Hintergrundleuchtdichte L_b wird aus allen gemessenen Leuchtdichtewerten, die zu keiner Lichtquelle gehören, berechnet. Hier erfolgt eine Mittelung mit Wichtung über die Raumwinkelprojektion Ω_P .

$$L_b = \frac{\sum L \Delta \omega_p}{\sum \Delta \omega_p} \quad (4)$$

Nachdem nun alle Eingangsgrößen bestimmt sind, kann unter Anwendung der UGR-Formel 1 der UGR-Wert berechnet werden. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt eines Protokoll einer UGR-Messung.

L_b = 375.798

LQ#	Omega	L_m	Schwerpunkt	P	E_Auge	OmegaP
420	0.0008145	2119.	(1229, 2929)	1.134	1.723	0.0008131
532	0.003224	3995.	(-6364, 5450)	1.222	12.74	0.003190
795	0.005568	4008.	(-814, 5620)	1.250	22.19	0.005540

E_Auge = 57.40

UGR = 14.39

Abbildung 1: Ausschnitt eines Meßprotokolls

Am Anfang ist die berechnete Umfeldleuchtdichte L_b zu sehen. Dann folgt eine Tabelle, in der die für jede Lichtquelle ermittelten Daten aufgeführt sind. Die LQ# ist eine während der Segmentierung vergebene Lichtquellennummer, die in der weiteren Auswertung bedeutungslos ist. Danach folgen die UGR-relevanten Daten wie Raumwinkel Ω in Steradian, mittlere Leuchtdichte L_m in $\frac{cd}{m^2}$, der Leuchtschwerpunkt (ϕ_S, θ_S) jeweils in Einheiten von $\frac{1}{1000}^\circ$ und der daraus ermittelte Positionsfaktor P . Danach folgen noch zwei Werte, die für die UGR-Berechnung nicht benötigt werden. Das sind die direkte Beleuchtungsstärke am Beobachteraue und die Raumwinkelprojektion der Leuchte bezüglich einer vertikalen Ebene am Beobachteraue. Die nach der Tabelle stehende vertikale Beleuchtungsstärke am Auge trägt bezüglich der UGR-Messung wieder nur informativen Charakter, der folgende Wert ist der mit diesem System gemessene **UGR**-Wert.

Es wurden verschiedene Beleuchtungsanlagen vermessen, wobei Abbildung 2 eine solche Aufnahme zeigt. Genaue Vergleiche mit verschiedenartig berechneten UGR-Werten und insbesondere mit subjektiven Blendungseindrücken stehen noch aus. Hierbei könnte sich die Notwendigkeit einer Modifizierung des Auswerteverfahrens bezüglich der Klassifikation und Segmentierung der Bilddaten ergeben.



Abbildung 2: Leuchtdichtebild einer UGR-Messung

Literatur

- [1] Walkling, A.: *Messung der UGR-Werte zur Beurteilung des Blendungsverhaltens einer Beleuchtungsanlage mittels bildauflösender Leuchtdichtemessung*, Diplomarbeit TU Ilmenau 1995
- [2] Wolf, S.;Stefanov, E.;Riemann, M.:*Image Resolved Measurement of Luminance using a CCD Camera*. Light & Engineering Vol. 3/No. 3, 1995, p. 34 – 44

Unterschiede im individuellen Blendungsempfinden

Lickert Rainer, Dipl.-Ing.
Waldmann Lichttechnik
Herbert Waldmann GmbH & Co.
Peter-Henlein-Str.5
D-78056 Villingen-Schwenningen
Telefon (07720) 601-310

1. Das Problem

Es wurde experimentell nachgewiesen, daß Brillenträger blendempfindlicher sind als Versuchspersonen, die keine Brille tragen. Die Psychologische Blendung wird als unangenehm empfunden, sie kann zu Konzentrationsschwächen und zu Ermüdung führen und damit auch Arbeitsleistung und -sicherheit beeinflussen. In der Lichttechnik und in der Normung hat die Begrenzung der psychologischen Blendung deshalb eine große Bedeutung [1].

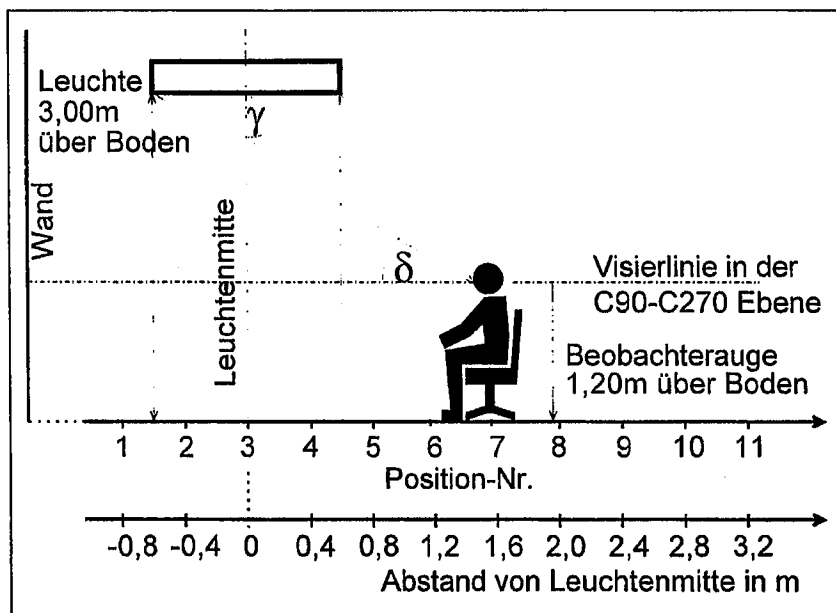


Bild 1: Versuchsaufbau und Versuchsprinzip.
Die Montagehöhe der Leuchte beträgt 3 m.
Die Blickrichtung der Versuchsperson verläuft parallel zur Leuchtenlängsachse.

Bei der Erforschung der Blendung ist man auf subjektive Beschreibungen von Versuchspersonen angewiesen. Aus vielen einzelnen Blendungsbewertungen werden Mittelwerte gebildet, um Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern und der Blendung zu finden, sowie vorhandene Blendformeln und Begrenzungssysteme zu überprüfen. Je größer die Zahl der Versuchspersonen, desto sicherer und repräsentativer sollte das Ergebnis sein. Auf die individuellen Abweichungen wurde bisher aufgrund der Vielfalt der Einflußfaktoren kaum eingegangen.

Die Streuungen sind allerdings beachtlich. Selbst die Grundlagenforschungen von Luckiesh und Guth [2] aus dem Jahre 1949 weisen bei der Bestimmung des sogenannten BCD-Kriteriums (Schwelle zwischen merkbarer und gerade noch akzeptabler Blendung) trotz konstanter und relativ einfachen Versuchsbedingungen eine relative Standardabweichung von 30% auf. Damals nahmen 50 Versuchspersonen an den Experimenten teil.

2. Die Experimente

Das Lichttechnische Institut (LTI) an der Universität Karlsruhe beschäftigt sich seit längerem mit Blendung und führte im Rahmen der Einführung des neuen UGR-Blendungsbewertungssystems (Unified Glare Rating) [3] eigene Versuche durch [4][5][6]. Inhalt einer Arbeit von Lickert [5] war u.a., die UGR-Formel auf Variation der Beobachterposition zu prüfen. Dazu mußten die Versuchspersonen die Blendwirkung einer Leuchte an 11 Positionen, die parallel zur Leuchtenlängsachse angeordnet waren, beschreiben (Bild 1). Es wurden zwei verschiedene Leuchten verwendet.

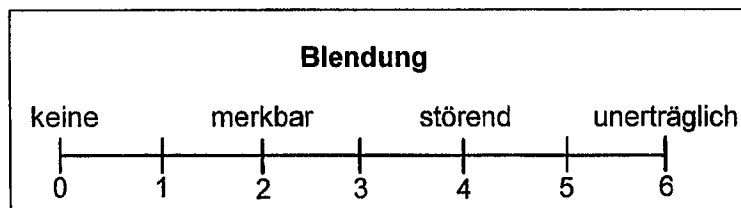


Bild 2: Siebestufige Skala mit der Zuordnung der Blendurteile zu den Blendwerten G.

Es standen 19 Versuchspersonen zur Verfügung im Alter von 20 bis 30 Jahren. An jeder Position wurde der Blendeindruck auf einer siebenstufigen Skala aufgezeichnet (Bild 2). Trägt man die subjektiven Blendwerte G über die Entfernung zum Lot des Leuchtenmittelpunktes auf, erhält man sogenannte Blendkurven (Bild 3 und Bild 4). Die durchgezogenen Linien geben jeweils den Verlauf des "mittleren" Beobachters wieder. Der Übersicht wegen ist nur eine kleine Auswahl der subjektiven Blendkurven eingezeichnet.

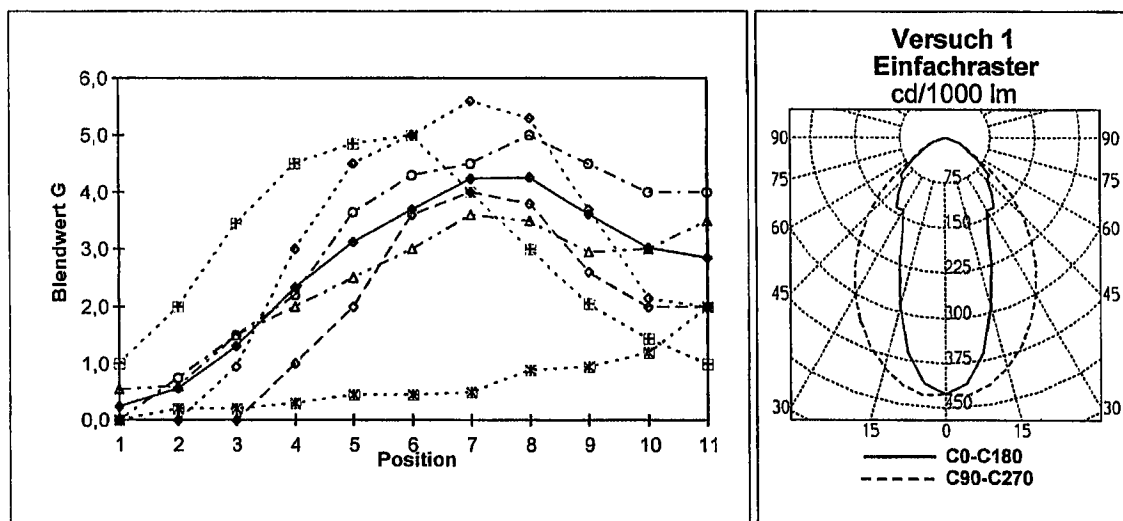


Bild 3: Links einige Blendkurven des Versuchs 1 mit einer einfachen Rasterleuchte (2mal 36W). Rechts die LVK der Rasterleuchte.

Die Blendwerte G, Mittelwerte M, Korrelationskoeffizienten R und Standardabweichungen S sind im Anhang (Tabelle 1 und 2) wiedergegeben. Trotz der sehr großen Streuungen der Versuchspersonen korrelieren deren Bewertungen sehr gut (Korrelationskoeffizient $R_{\text{mittel}} = 0,9$) mit dem mittleren Blendverlauf. Die relativen Standardabweichungen S_{rel} liegen mit Ausnahme der Grenzbereiche (Leuchte außerhalb des Gesichtsfeldes, Beobachter außerhalb des 50° -Ausstrahlungsbereiches der Spiegel-rasterleuchte) in der für solche Versuche typischen Größenordnung von $S_{\text{rel}} = 30\text{-}50\%$.

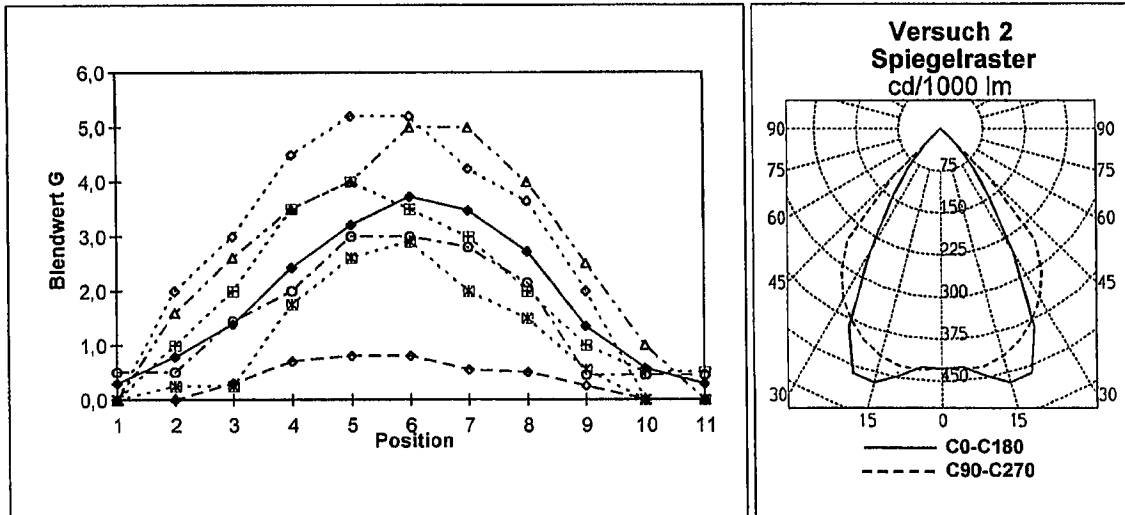


Bild 4: Links einige Blendkurven des Versuchs 2 mit einer 50°-Spiegelrasterleuchte (1mal 58W). Rechts die LVK der Spiegelrasterleuchte.

Wie lassen sich jedoch die großen individuellen Unterschiede in den Blendungsbewertungen erklären?

3. Einfluß von Brillen auf das Blendempfinden

Es handelte sich um eine relativ homogene Gruppe bezüglich Alter und Tätigkeit (Studenten und Doktoranden). Die Hälfte der Versuchspersonen trug jedoch während den Versuchen eine Brille zur Sehkorrektur. Daher bot sich eine Unterscheidung in Normalsichtigen und Brillenträgern an (Bild 5 und Bild 6).

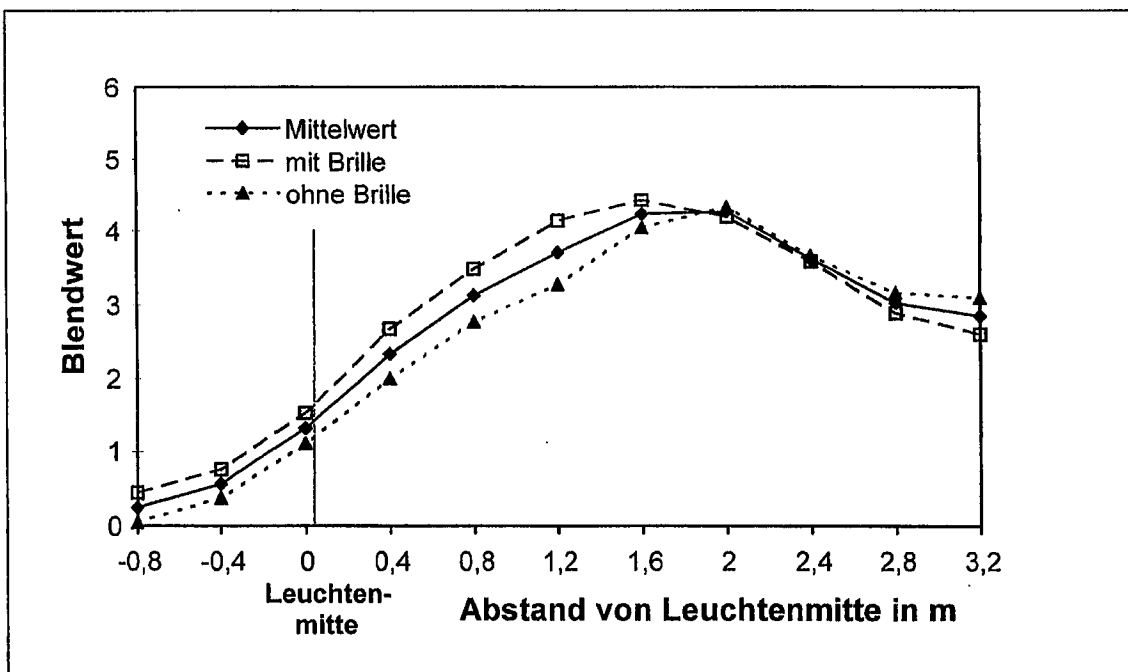


Bild 5: Vergleich der Blendkurven von Brillenträgern und Normalsichtigen des Versuchs 1 (einfache Rasterleuchte).

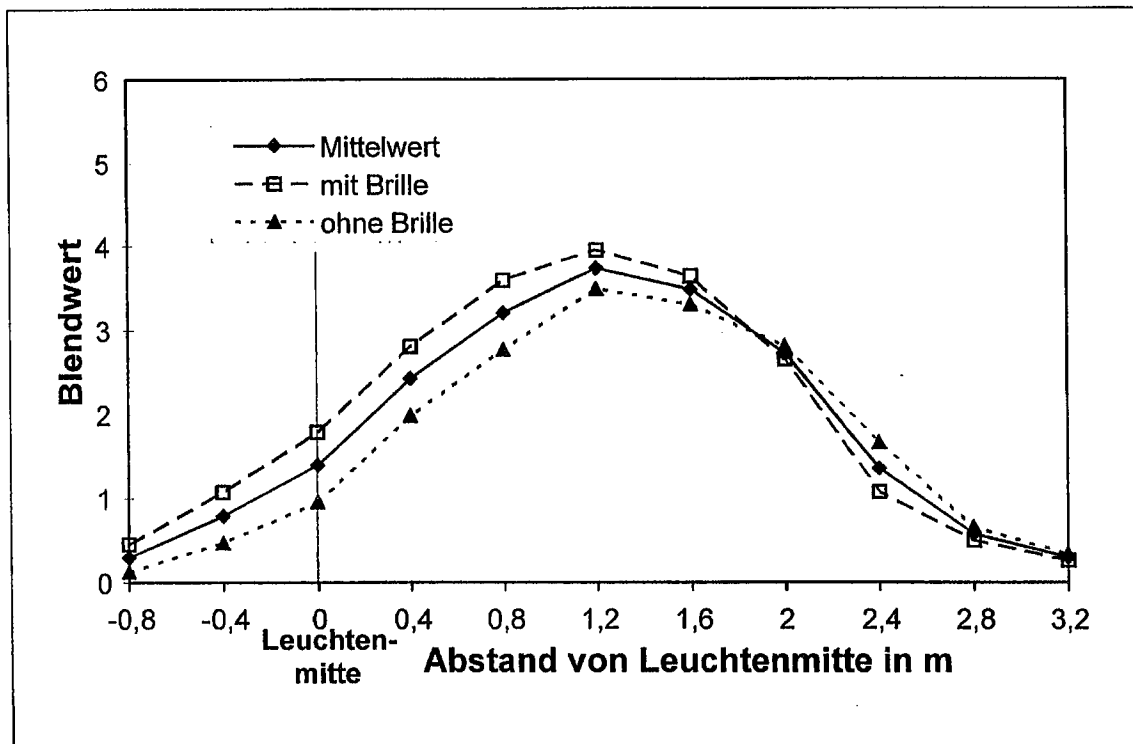


Bild 6: Vergleich der Blendkurven von Brillenträgern und Normalsichtigen des Versuchs 2 (50°-Spiegelrasterleuchte).

In beiden Versuchsreihen bewerteten die Brillenträger Positionen unterhalb oder nahe der Leuchte um ca. 30 - 40 % schlechter als die Normalsichtigen. Dies deckt sich mit den Bemerkungen einiger Brillenträger, die sich durch hohe oder ungleichmäßige Lichtausstrahlung gestört fühlten. Im Mittel ergeben alle Positionen für die Versuchspersonen mit Brille einen mittleren Blendwert $G = 2,5$. Mit den Versuchspersonen ohne Brille wurde im Mittel $G = 2,1$ erhalten.

Da durch leichtes Drehen oder Neigen des Kopfes diese Störungen unterschiedlich empfunden wurden, machten einige der Brillenträger selbst ihre Brille dafür verantwortlich. Erklären läßt sich dieser Effekt mit Reflexen auf den Brillengläsern, bzw. Abschattungen durch den Brillenrahmen. Bei der Spiegelrasterleuchte ist der Unterschied zwischen Brillenträgern und Normalsichtigen vermutlich aufgrund der höheren Leuchtdichtegradienten dieser Leuchte etwas größer.

Zudem fällt auf, daß sogar an Positionen unterhalb der Leuchten, an denen nach den bestehenden Blendungsbewertungssystemen sogar bei einer feinen Leuchtenunterteilung keine Blendung vorhanden sein sollte (siehe Bild 7), alle Versuchspersonen Blendung registrierten.

Diese beiden Phänomene (Schwankungen im Blendempfinden bei Kopfbewegungen und Störungen von Lichtquellen außerhalb des Gesichtsfeldes) sind schon in anderen Untersuchungen aufgefallen [5][6] und wurden als "Dynamische Blendung" und "Lichtdruck" bezeichnet [7]. Die Versuchspersonen, besonders diejenigen ohne lichttechnische Kenntnisse, verstehen unter Blendung die Störempfindung durch zu hohe Leuchtdichteunterschiede. Eine Differenzierung in Dynamische Blendung, Lichtdruck und Direktblendung ist in Versuchen schwer, bzw. kaum möglich.

Bedenkt man, daß fast die Hälfte aller in Büros arbeitenden Menschen eine Brille trägt, sollten weitere Untersuchungen folgen, die den Einfluß von Sehkorrekturen auf die Blendempfindlichkeit klären. Hinzu kommt, daß mit steigendem Alter die physiologische Blendung und vermutlich auch die psychologische Blendempfindlichkeit zunimmt [8]. Versuchspersonen über 40 Jahren gab es in den bisherigen Untersuchungen nur selten, obwohl die über Vierzigjährigen mehr als die Hälfte der Berufstätigen ausmachen.

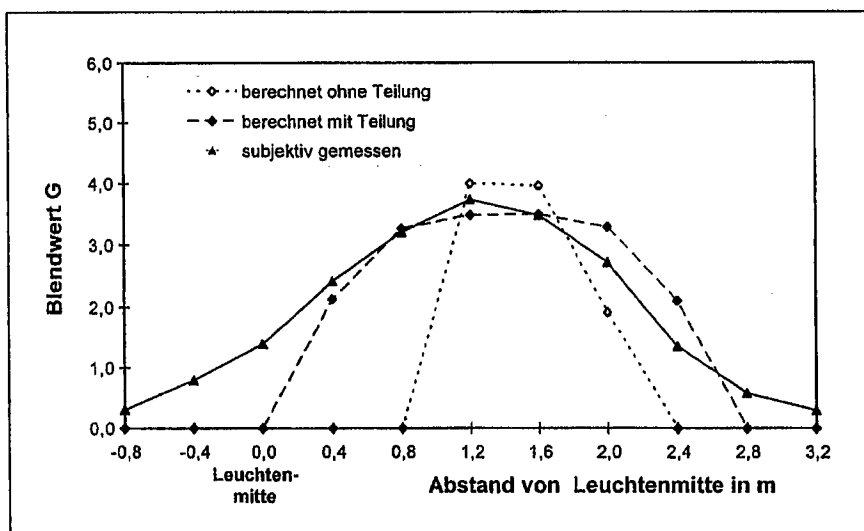


Bild 7: Vergleich der subjektiven Blendkurve aus Versuch 2 (Spiegel rasterleuchte) mit UGR-Blendwerten (mit und ohne Leuchtenunterteilung). Als Bezugs wert zwischen Messung und Berechnung wurde die Blendungsbewertung an der Position 1,6 m.

Nachgewiesen ist auch, daß eine ungünstige Beleuchtung auf Dauer zu Beeinträchtigungen der Gesundheit führt [9]. Neue Verordnungen und Vorschriften (z.B. EU-Richtlinie 90/270/EWG) fordern nicht nur die Anpassung der Beleuchtung an die Sehauflagen, sondern auch an die sehkraftbedingten Bedürfnisse, bzw. an das Sehvermögen des Benutzers [10]. Deshalb sind Bewertungs- und Begrenzungsverfahren gesucht, die möglichst viele Aspekte der komplexen Störempfung "Blendung" berücksichtigen, die nicht nur eine Leuchtdichtebegrenzung darstellen oder die einer Leuchtenart ohne Berücksichtigung von Qualitätsunterschieden zwischen den Leuchtentypen pauschal einen Blendwert zuordnen.

Literatur

- [1] DIN 5035: Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht (1990)
- [2] Luckiesh M., Guth S.K.: Brightness in Visual Field at Borderline between Comfort and Discomfort. Illum. Eng. 44 (London 1949)
- [3] CIE-Publ.117: Discomfort Glare in Interior Lighting. (1995)
- [4] Vercek T.: Modellierung und Bewertung der Blendung in Innenräumen. Diplomarbeit Universität Karlsruhe (LTI 1995)
- [5] Lickert R.: Entwicklung eines empirischen Verfahrens zur Bewertung der Blendung in der Innenbeleuchtung. Diplomarbeit Universität Karlsruhe (LTI 1996)
- [6] Schaeffer P.: Dynamische Blendungsbewertung in Innenräumen. Diplomarbeit Universität Karlsruhe (LTI 1996)
- [7] LiTG-Schrift: Das UGR-Verfahren. (Entwurf der AG Blendung 1996)
- [8] Eckert M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit. (Technik 1993)
- [9] Çakir A.E., Çakir G.: Licht und Gesundheit - Eine Untersuchung zum Stand der Beleuchtungstechnik in deutschen Büros. (Ergonomic Institut, Berlin 1994)
- [10] Çakir A.E., Çakir G.: Direktbeleuchtung am Bildschirmarbeitsplatz widerspricht Anforderungen des Arbeitsschutzes. (Ergonomic Institut, Berlin 1996)

Anhang zu „Unterschiede im individuellen Blendungsempfinden“

Tabelle 1: Blendwerte G

Versuch 1: Einfachrasterleuchte												
Versuchsperson (B=Brille)	Position											Korrelations- koeffizient R
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
VP 1 (B)	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	3.6	4.0	3.8	2.6	2.0	2.0	0.96
VP 2	0.0	0.0	1.0	3.0	4.5	5.0	5.6	5.3	3.7	2.2	2.0	0.94
VP 3 (B)	1.0	2.0	3.5	4.5	4.9	5.0	4.0	3.0	2.1	1.5	1.0	0.4
VP 4	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	2.0	4.0	4.0	3.0	2.0	2.0	0.91
VP 5	0.0	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.9	1.0	1.2	2.0	0.47
VP 6	0.4	1.9	3.0	4.2	4.6	5.0	5.5	5.7	5.7	5.9	5.9	0.91
VP 7 (B)	0.6	0.6	1.5	2.0	2.5	3.0	3.6	3.5	3.0	3.0	3.5	0.95
VP 8	0.0	0.0	0.6	1.0	2.0	2.5	3.8	4.8	5.0	5.2	5.2	0.79
VP 9 (B)	0.0	0.1	1.4	2.9	3.5	3.5	4.2	4.9	4.9	3.8	3.5	0.97
VP 10 (B)	0.0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.91
VP 11 (B)	0.7	1.0	1.5	3.0	4.0	4.2	4.2	4.1	4.0	3.7	3.2	0.98
VP 12 (B)	0.0	0.5	1.0	2.0	3.5	5.3	5.8	5.4	4.4	3.2	2.9	0.98
VP 13	0.0	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	1.5	1.0	1.0	0.87
VP 14	0.0	0.2	2.2	3.3	4.4	4.9	5.6	5.0	4.9	3.9	2.7	0.97
VP 15	0.0	0.8	1.5	2.2	3.7	4.3	4.5	5.0	4.5	4.0	4.0	0.98
VP 16 (B)	1.4	1.4	2.4	4.0	4.5	4.6	4.7	4.9	4.8	4.0	3.7	0.97
Mittelwert M (gesamt)	0.26	0.58	1.33	2.34	3.13	3.71	4.25	4.27	3.63	3.04	2.85	M_{alle} = 2.7
Standardabweichung S	0.43	0.66	1.00	1.24	1.35	1.34	1.25	1.13	1.33	1.38	1.39	R_{mittel} = 0.87
S_{rel} = S/M	1.67	1.14	0.75	0.53	0.43	0.36	0.29	0.27	0.37	0.45	0.49	
M (mit Brille)	0.46	0.76	1.54	2.68	3.49	4.15	4.44	4.20	3.60	2.90	2.60	M_{mit} = 2.8
M (ohne Brille)	0.05	0.39	1.13	2.00	2.78	3.28	4.06	4.34	3.66	3.18	3.00	M_{ohne} = 2.5

Brillenträger sind mit (B) gekennzeichnet.

Anhang zu „Unterschiede im individuellen Blendungsempfinden“

Tabelle 2: Blendwerte G

Versuch 2: Spiegelrasterleuchte												
Versuchsperson (B=Brille)	Position											Korrelations- koeffizient R
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
VP 1 (B)	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	3.0	2.8	2.0	3.0	0.0	0.0	0.95
VP 3 (B)	0.0	1.0	2.0	3.5	4.0	3.5	3.0	2.0	1.0	0.5	0.5	0.92
VP 4	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.1	1.1	0.79
VP 5	0.0	0.0	0.3	0.7	0.8	0.8	0.6	0.5	0.3	0.0	0.0	0.94
VP 6	0.0	2.0	3.0	4.5	5.2	5.2	4.3	3.7	2.0	0.0	0.0	0.94
VP 7 (B)	0.0	1.6	2.6	3.5	4.0	5.0	5.0	4.0	2.5	1.0	0.0	0.97
VP 9 (B)	0.2	0.9	1.1	1.8	2.2	2.4	3.0	2.2	1.0	0.3	0.0	0.97
VP 10 (B)	0.1	1.0	2.0	4.0	5.0	5.5	4.0	2.4	0.5	0.0	0.0	0.94
VP 11 (B)	0.5	0.5	1.5	2.0	3.0	3.0	2.8	2.2	0.5	0.5	0.5	0.97
VP 12 (B)	0.0	0.8	2.0	2.8	4.0	5.0	4.0	3.5	2.0	1.5	1.0	0.97
VP 13	0.0	0.3	0.3	1.8	2.6	2.9	2.0	1.5	0.6	0.0	0.0	0.96
VP 14	1.0	1.2	1.6	3.0	4.0	5.0	4.8	4.0	2.8	0.3	0.0	0.97
VP 15	0.0	0.1	0.7	1.2	1.9	2.9	4.0	3.5	2.2	1.2	0.9	0.80
VP 16 (B)	3.4	3.7	4.0	5.1	5.8	5.5	5.5	4.1	2.0	0.8	0.4	0.83
VP17	0.0	0.3	1.2	2.2	3.7	5.7	5.6	4.3	3.0	2.5	0.8	0.89
VP18	0.0	0.0	0.7	1.7	2.0	2.4	2.3	2.0	0.7	0.3	0.0	0.99
VP19	0.0	0.3	1.0	1.6	2.4	2.7	2.7	1.6	0.3	0.0	0.0	0.98
Mittelwert M	0.31	0.81	1.41	2.44	3.21	3.74	3.49	2.74	1.38	0.59	0.31	M_{alle} = 1.9
Standardabweichung S	0.81	0.93	1.07	1.27	1.34	1.40	1.29	1.08	0.95	0.67	0.40	R_{mittel} = 0.93
S_{rel} = S/M	2.66	1.15	0.76	0.52	0.42	0.38	0.37	0.39	0.69	1.14	1.31	
mit Brille	0.53	1.19	1.90	2.96	3.75	4.11	3.76	2.80	1.19	0.58	0.30	M_{mit} = 2.1
ohne Brille	0.11	0.47	0.98	1.97	2.73	3.40	3.26	2.68	1.54	0.60	0.31	M_{ohne} = 1.6

Brillenträger sind mit (B) gekennzeichnet.

Beleuchtung der Jesuitenkirche in Bratislava

Dipl.-Ing. Ján Kuma

Lehrstuhl für Elektroenergetik - Lichttechnische Abteilung,

FEI STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slowakei

In der Gegenwart ist die Problematik der Beleuchtung von Kirchen in der Slowakei immer aktuell. Es geht um die Ausarbeitung eines lichttechnischen Projekts bei neuen Bauten, wie auch bei Rekonstruktionen der Beleuchtung in alten Bauten.

Von der Aktualität dieses Bedürfnisses sprechen auch die Forschung und Messungen, die ich in Kirchen in Bratislava durchgeführt habe. Ich konzentrierte mich auf die bedeutendsten Kirchen, bedeutend durch ihren historischen Wert, ihre Größe, Lage und Besucherzahl. Beim Auswerten und bei Messungen beurteilte ich diese Parameter:

— ich meßte auf der Vergleichsebene den horizontalen Bestandteil der künstlichen Beleuchtung im Raum der Versammlung von Gläubigen (in Schiffen) und im Presbyterium,

— den vertikalen Bestandteil der künstlichen Beleuchtung meßte ich in den Punkten, wo guter vertikaler Vergleich nötig ist:

- beim Ambon,
- beim Opfertisch,
- beim Hauptaltar,
- bei den Nebentären,

— auf bedeutenden Flächen und Plätzen meßte ich Leuchtdichte:

- des Gesichts beim Opfertisch und beim Ambon,
- der Wände, der Decke, des Bodens und der Säulen,
- wichtiger Gegenstände wie Bilder und Statuen usw.,
- des Hauptaltars und der Nebentäre - dabei das Bild, die Statue, das Tabernakel,
- Leuchtdichte von Lichtquellen, Leuchten oder von Flächen und Materialien mit starker Widerspiegelfähigkeit wenn sie sich im Blickfeld befinden,

— ich beurteilte den Typ von benutzten Lichtquellen im Hinblick auf die Farbtemperatur und den Typ von benutzten Leuchten,

— ich bestimmte den Typ des Beleuchtungssystems in derjenigen Kirche (direkt, indirekt, gemischt).

Die gemessenen Resultate bearbeitete ich und wertete sie aus. In jeder Kirche bestimmte ich den maximalen, minimalen und mittleren Wert Horizontalbeleuchtungsstärke auf der Vergleichsebene. Diese Werte rechnete ich aus, sowohl für den Raum im Schiff der Kirche, wo die Arbeitsebene die Höhe der Bänke bildete, als auch im Presbyterium, wo die Arbeitsebene von der Höhe des Opfertisches bestimmt war. Weiter ermittelte ich die Leuchtdichte der Gegenstände und des Hintergrunds in kritischen Bereichen, um Kontraste zu bestimmen und die Möglichkeit einiger Objekte zu unterscheiden. Einige von erwähnten Angaben sind in den Tabellen.

Einige Auswertungen der Messungen:

Tabelle 1

Kirche	<i>Horizontalbeleuchtungsstärke in lux</i>		
	maximal	minimal	mittel
hl. Martin	260	30	108
Trinitätskirche	121	8	33
Ursulinen	130	5	87
Blumentál	380	33	142
Jesuiten	235	11	45

Typ der Lichtquelle und die Leuchte bei der Beleuchtung des Schiffs in der Kirche:

Tabelle 2

Kirche	<i>Typ der Lichtquelle und die Leuchte</i>
hl. Martin	Halogenscheinwerfer und Luster mit Kompaktleuchstofflampen
Trinitätskirche	mehrere Luster mit Allgebrauchs-Glühlampen
Ursulinen	Halogenscheinwerfer
Blumentál	Scheinwerfer mit Allgebrauchs-Glühlampen und Halogenscheinwerfer
Jesuiten	Leuchten mit lichtstreuenden Körpern und Luster mit Allgebrauchs-Glühlampen

Typ der Lichtquelle und die Leuchte bei der Beleuchtung des Presbyteriums:

Tabelle 3

Kirche	<i>Typ der Lichtquelle und die Leuchte</i>
hl. Martin	Halogenscheinwerfer
Trinitätskirche	Halogenscheinwerfer
Ursulinen	Scheinwerfer mit Allgebrauchs-Glühlampen
Blumentál	Halogenscheinwerfer
Jesuiten	Halogenscheinwerfer

Typ des Beleuchtungssystems in Schiffen der einzelnen Kirchen:

Tabelle 4

Kirche	Typ des Beleuchtungssystems
hl. Martin	direkt
Trinitätskirche	direkt
Ursulinen	indirekt
Blumentál	direkt
Jesuiten	direkt

Die Beleuchtung des Presbyteriums wurde in allen Kirchen mit einem direkten Beleuchtungssystem realisiert.

Die Gesamtwertung kann man in folgende Punkte zusammenschließen, die nicht nur für obengenannte Kirchen gilt, sonder für mehrere Kirchen bei uns.

1. Die Gesamtbeleuchtung erreicht ziemlich niedrige Werte und in manchen Fällen verursacht sie durch schlechte Verteilung der Leuchten ungewollte Blendung.
2. Das Beleuchtungssystem bestehet aus veralteten, oft beschädigten und verschmutzten Leuchten, in denen in der Mehrheit Lichtquellen mit kleiner Lichtausbeute und kurzer Lebensdauer installiert wurden.
3. Das Beleuchtungssystem ist weniger kreativ und schwer anpaßbar und verwendbar bei mannigfaltigen Gelenheiten.
4. Für ziemlich kleine Anzahl von Leuchten ist nicht möglich, viele historisch wertvolle und kunstvolle Gegenstände hervortreten zu lassen.

Die Kenntnisse bei der Beurteilung und bei Messungen nutzte ich beim Entwurf eines neuen Beleuchtungssystems in der Jesuitenkirche in Bratislava.

Entwurf der Beleuchtung der Jesuitenkirche.

Beschreibung der Jesuitenkirche

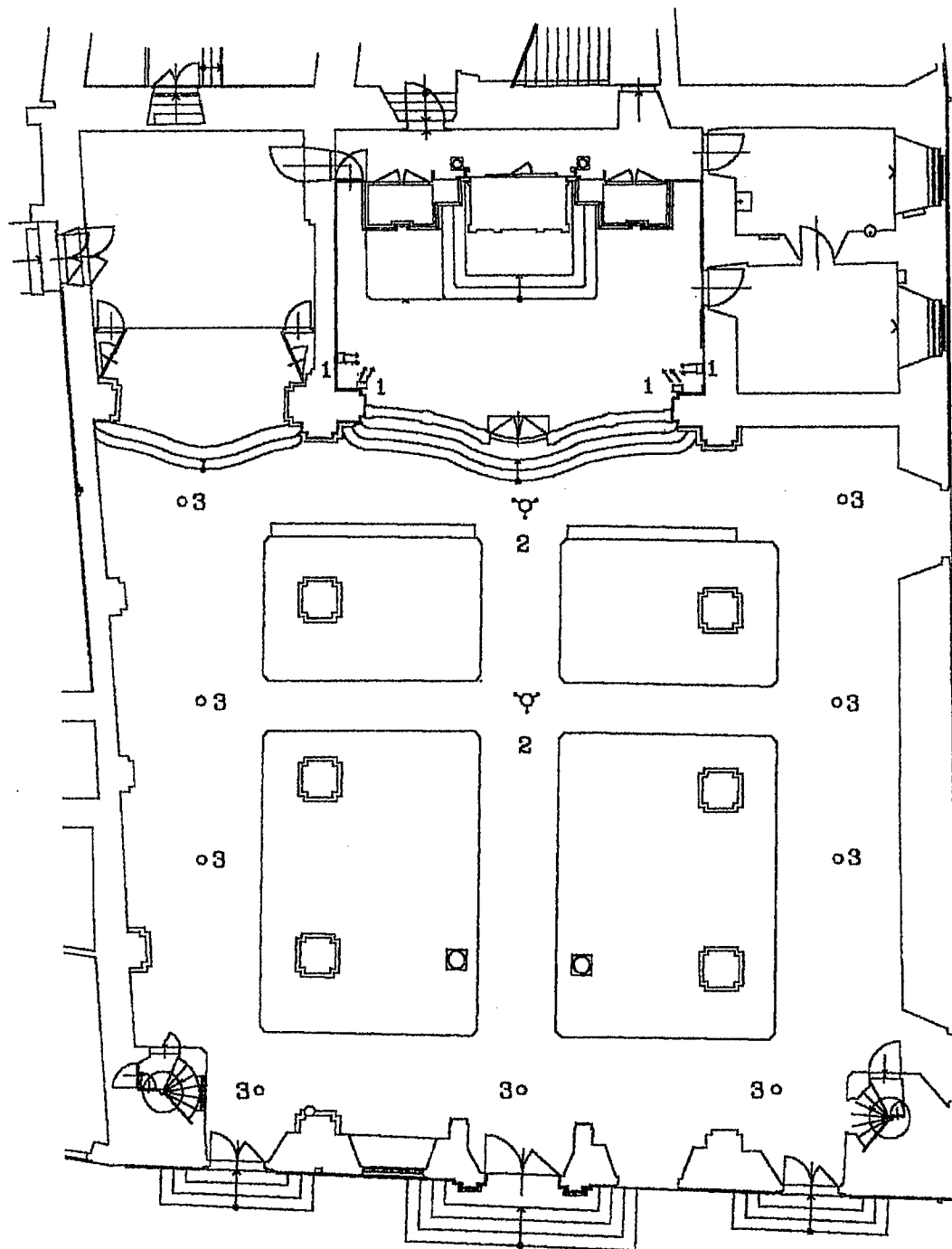
Die Kirche wurde in Jahren 1634 - 1638 im spätgotischen Stil erbaut. Sie ist 15 m hoch, 25 m breit und 22 m lang. Den gesamten Raum bilden das Hauptschiff und zwei Nebenschiffe. Die Gewölben sind hellgelber Farben ohne Fresken, nur in Hauptschiff sind im niedrigeren Teil Anschriften in hellbrauner Farbe. Die Wände sind hellgrüner Farbe, ohne Fresken mit Ausnahme des Presbyteriums, wo sich an der südlichen Seite eine Freske befindet. Auf der östlichen Seite ist ein großer Hauptaltar mit dem Bild der heiligen Dreifaltigkeit und das Tabernakel. Vor ihm stehen der Opfertisch, Ambon, Sitzplätze für Priester und Ministranten. Auf dem Boden ist gelbes Steinpflaster mit braunem Muster. In dem Presbyterium ist auf dem Boden ein hellroter Teppich. In den Nebenschiffen befinden sich zwei Nebenaltare, einer auf der vorderen Seite, der andere auf der Nebenseite, mit Bildern und Statuen von Heiligen. Alle Bilder auf Altaren sind dunkel, mit goldenen Verzierungen der Bilderrahmen. Im Hauptschiff und den Nebenschiffen sind dunkelbraune Bänke für Gläubige.

Das Tageslicht strömt in die Kirche durch zwei kreisförmige Fenster aus Buntglas auf der Nordseite und durch vier große rechteckige Fenster auf Südseite. Große hellbraune Haupttür befindet sich in der Mitte der westlichen Seite, links und rechts befinden sich noch zwei Nebentüre, die bei großen Festen geöffnet werden.

Das alte Beleuchtungssystem in der Kirche bestand aus zwei Glühlampen-Luster und aus neun kugelförmigen Difusleuchten. Die Luster bilden zehn kerzenförmige Glühlampen und eine Kugellampe. Das Presbyterium wird von vier Halogenscheinwerfern beleuchtet, ein Paar beleuchtet den Opfertisch, das andere den Hauptaltar. Die Nebenaltare werden gar nicht beleuchtet oder nur von unbedeckten Glühlampen.

Der Grundriß der Kirche, die Verteilung der Möbel, Altare und Leuchten sind auf dem Bild Nummer 1 gezeichnet.

Abb. 1 Der Grundriß der Kirche



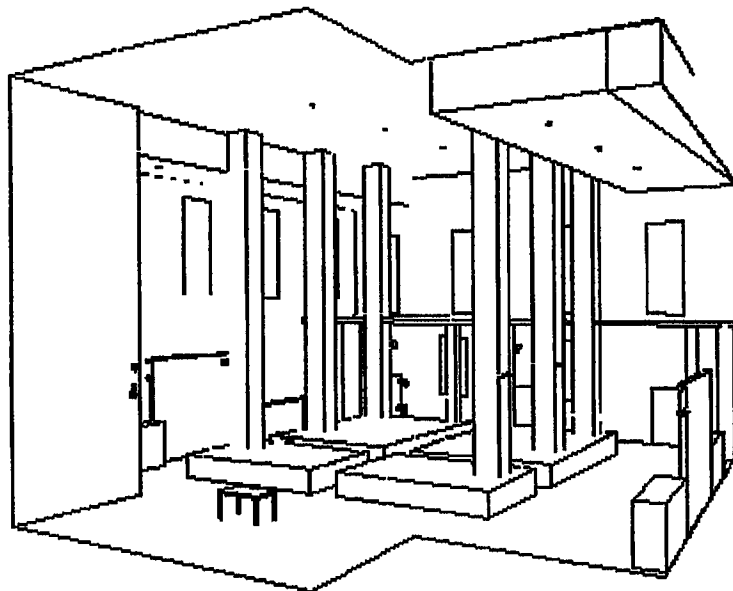
1 □ Halogenscheinwerfer 2 ♀ Luster 3 ° Leuchten mit Difuzor

Mit der Rekonstruktion des Beleuchtungssystems in der Jesuitenkirche verbessern sich nicht nur lichttechnische Parameter der künstlichen Beleuchtung, sondern auch ästhetische Ansprüche auf den so wichtigen Bau. Neue Beleuchtung wird genügende Lichtmenge sowohl für Messen als auch für Konzerte und touristische Führungen sichern. Heutige Beleuchtung, wie das die Resultate der Analyse zeigen, sind absolut ungeeignet.

Den Beleuchtungsentwurf führte ich mit Hilfe des Programms DIALUX 32 durch. Dieses Computerprogramm bietet große Möglichkeiten beim Modellieren unregelmäßiger Formen, ermöglicht in dem Inneraum Gegenstände wie Möbel hineinzugeben und so treu den wirklichen Raum darzustellen. Es bietet eine breite Skala modernster Leuchten von renomierten Herstellern.

Beim Modellieren des Raumes nutzte ich alle Möglichkeiten des Programms und die Gesamtdarstellung der Kirche ist auf dem Bild Nummer 2 gezeichnet.

Abb. 2 - Blick vom Hauptaltar in die Schiffe der Kirche



Verfahren beim Entwurf des lichttechnischen Projekts.

Den Entwurf der künstlichen Beleuchtung machte ich schrittweise. Ich modellierte Raumteile der Kirche und in ihnen wählte ich geeignete Beleuchtungskomponente. Zuerst löste ich die Hauptbeleuchtung der Schiffe und Nebenaltare, dann die des Presbyteriums mit dem Hauptaltar und dem Opfertisch und schließlich die zusätzliche Beleuchtung des Chors, des Raumes unter ihm und die Notbeleuchtung.

Hauptbeleuchtung

Nach Konsultationen mit dem Denkmalamt und mit dem Verwalter der Kirche schloß ich die Möglichkeit der Installierung von Lustern als Hauptbeleuchtung aus. Die Luster in diesem Raum waren eine Lichtquelle starken Blendens und sicherten nicht einmal genügende Beleuchtung. Undirektes Beleuchtungssystem ist wegen hohem Gewölbe und dunklen Wandoberflächen unmöglich und uneffektiv. Aus ästhetischen Gründen wählte ich Leuchten direkter Beleuchtung und lokalisierte sie in dem Scheitel des Gewölbes, bzw. sind sie in dem Gewölbe eingebaut und zwar in Öffnungen, durch die Seile für Befestigung der Luster und Difusleuchten führen. Für diesen Zweck wählte ich Scheinwerfer-Lichtkörper STAFF 7700534DL/E160HIT mit Farbtemperatur 3000 K und Farbwiedergabeindex 1B. Für die Beleuchtung von Nebenaltaren nahm ich direkte Leuchte - DEMO Strahler QT 18 mit Halogenglühlampen 150 W.

Beleuchtung des Presbyteriums

Bei dieser Beleuchtung ist es nötig, den Hauptaltar mit dem Bild und dem Tabernakel, den Opfertisch, Ambon und Sitzplätze für Priester und Ministranten - Sedes zu beleuchten. Hier entwarf ich für die direkte Beleuchtung des Altars den DEMO Strahler QT 18 mit Halogenglühlampen 150 W und für die Gesamtbeleuchtung des Presbyteriums Scheinwerfer mit breiter Lichtstärkekurve STAFF 7100311 Halogenfluter QT- DE 300 W.

Beleuchtung des Chors, des Raumes unter ihm und Notbeleuchtung

Der Raum unter dem Chor bildet den Eingang, durch den Gläubige in die Kirche eintreten. Für die zusätzliche Beleuchtung benutzte ich undirektes Beleuchtungssystem. Die Lichtkörper leuchten zur Decke, was in diesem Fall der Chorboden ist, und ihr

Die Leuchten leuchten zur Decke, was in diesem Fall der Chorboden ist, und ihr widerpiegeltes Licht beleuchtet den Raum unten. Bei der Wahl der Leuchten zog ich ihr ästhetisches Aussehen in Betracht, weil es ausgeschlossen war, diesen zu verstecken. Für diesen Zweck nahm ich die Leuchte REGIOLUX 455 0300 100 MDI 300QT - DE 12, 300W.

Auf dem Chor muß im Bereich der Orgel genügend Beleuchtung sein, die genügend Licht auf Noten und die Orgelklaviatur spendet. Ich wählte STAFF 250080 Round T 26. Für den Notfall, daß das ganze Beleuchtungssystem aussetzt, benutzte ich Leuchten PIKOLUX PL-S 9W, die ästhetisch leicht und geeignet mit der Architektur der Kirche in Einklang gebracht werden können.

Die Lokalisation der Leuchten und ihre Anzahl

Tabelle 5

Nummer der Leuchte	Anzahl der Leuchten	Name der Leuchte	Lichtquelle
1	9	STAFF 770534 DL/E 160 HIT	HIT 150 W
2	4	REGIOLUX 4550300 100 MDI 300	QT-DE 12 300 W
3	6	STAFF 710311 Halogenfluter QT-DE 12	QT-DE 12 300 W
4	8	DEMO 104006 Strahler QT 18	QT 18 150 W
5	1	STAFF 250080 ROUND T 26	T 26, 1 x 18 W
6	6	PIKOLUX PL-S 9	PL-S 9 W

Abb. 4 - Die Lokalisation der Leuchten

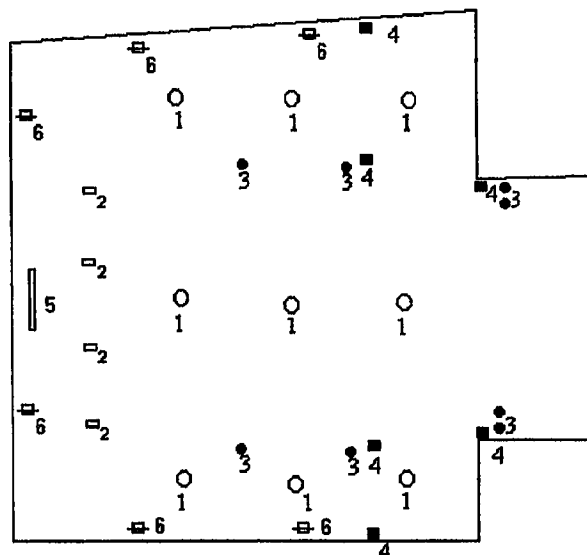
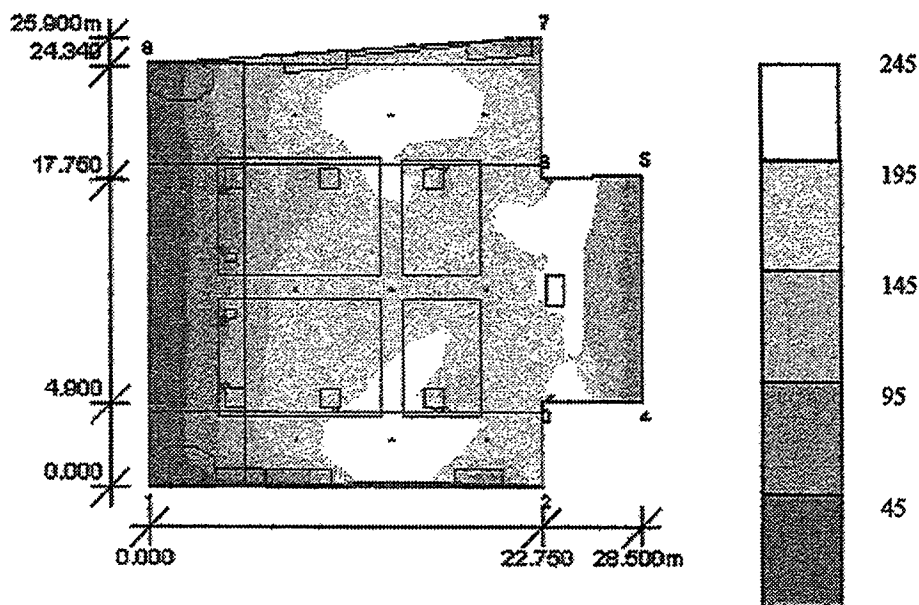


Tabelle 6 Gesamte installierte Leistung

Anzahl der Leuchten	Name der Leuchte	Lichtstrom	Leistung der Leuchte
9	STAFF 770534 DL/E 160 HIT	12500 lm	170 W
4	REGIOLUX 4550300 100 MDI 300	500 lm	300 W
6	STAFF 710311 Halogenfluter QT-DE 12	500 lm	300 W
8	DEMO 104006 Strahler QT 18	2400 lm	150 W
1	STAFF 250080 ROUND T 26	1500 lm	18 W
6	PIKOLUX PL-S 9	540 lm	9 W
Gesamtleistung			5784 W

Auf dem nächsten Bild 3 ist die Charakteristik der Beleuchtung mit Erwägungen aller Leuchten der Beleuchtung in der Jesuitenkirche.

Abb. 4 - Jesuitenkirche



E_m in lx	E_{max} in lx	E_{min} in lx	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
145	250	35	1:3,2	1:7,1

Den Entwurf machte ich mit Hilfe des Programms Dialux. Aus der Bilddokumentation kann man die Qualität des entworfenen Beleuchtungssystems künstlicher Beleuchtung sehen.

Aus der Ausbreitung der Intensität ist es klar, daß sie allmählich zum Zentrum der Kirche - zum Opfertisch steigt. So entspricht dieses dieses Beleuchtungssystem sowohl den lichttechnischen qualitativ-quantitativen Ansprüchen, als auch den ästhetischen.

Zu diesem lichttechnischen Entwurf arbeitete ich auch einen Elektroinstallierungsprojekt. Schließlich berechnete ich die Gesamtkosten auf die Realisation dieses neuen Beleuchtungssystems.

Literatur:

1. Hanus L.: Kirche als Symbol, Verlag Luc 1995, Bratislava.
2. Handbuch für Beleuchtung, Verlag W.Girardet 1975, Essen.
3. Attems, A. - Horňák, P: Koception der Beleuchtung von Katholischenkirchen, Jemná mechanika a optika -36, 1991.

A NEW ELECTRONIC BALLAST

Costea - Marcu, Ioan, senior research scientist, ICPE -ME S.A. 79623 Bucuresti

Grad, Alexandru Bogdan, dipl. engineer, ICPE - ME S.A. 79623 Bucuresti

Ilie, Serban Mihai, dipl. engineer, ICPE - ME S.A. 79623 Bucuresti

1. Introduction

The electronic ballast presented in the paper is intended to be used with usual tubular fluorescent lamps, as 20 W ones having a tube diameter of 36 mm and for 18 W ones with a tube diameter of 26 mm.

The design of the new ballast corresponds to technical prescriptions imposed by EN 60929/1993, "Electronic ballast for network supplying - Technical prescriptions". The ballast is fed with an a.c. voltage tension having a frequency between 20kHz and 45 kHz.

The current harmonics limits are those specified in IEC 1000-3-2: 995 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 2: Limits for harmonic current emission (equipment input current $I \leq 16$ A per phase).

This ballast corresponds to the limits imposed by EN 50081-1: 1992 - Electromagnetic compatibility - Standard emission - Part 1: For residential, commercial and services.

The paper presents the design principals and the features of the new electronic ballast. This one corresponds to the international standards in this field without being provided with supplementary filters. Its electronic design makes available the preheating of the tube filament before the electric discharge starting as the right imposes to such an equipment, thing unobserved for a usual ballast.

2. Design and specifications

The electronic ballast contains the following functional parts:

⇒ double alternation rectifier ($\omega R C = 1.6$);

- ⇒ power oscillator (at the frequency of 40 kHz);
- ⇒ fluorescent supplying circuit (RLC type);
- ⇒ filter dedicated to radioelectric perturbations reduction.

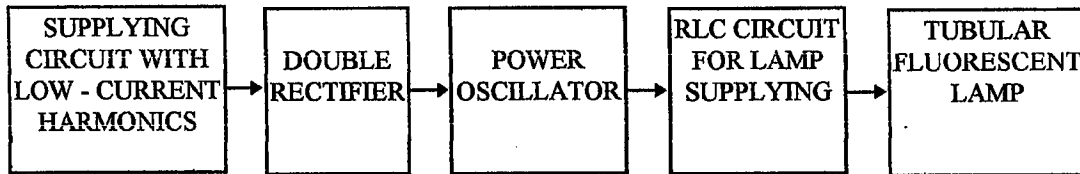


Figure 1 -Block scheme of the new electronic ballast

Figure 1 presents the block scheme of the new electronic ballast. The oscillator is working in rectangular pulses to have a high efficiency, and supplying circuit of the fluorescent lamp is of quasiresonant type having a PTC thermistor intended to preheating of the filaments.

The new electronic ballast has applying a special rectifier designed and made for lower harmonics of the current that corresponds to IEC 1000-3-2/1995 [1]. The rectifier was calculated having $\omega R C = 1.6$ ($\omega = 2 \pi f$, $f=100$ Hz, $R = U/I$, U is the continuous voltage tension of the rectifier, I is the the direct current fed by oscillator, C is the capacity of filtering capacitor of the rectifier).

The value of $\omega R C = 1.6$ resulted from the calculation of conduction angle of the rectifier and from the disturbances limits (considered from 3 to 9 order).

The new electronic ballast was realised as a working model and was used for supplying of a tubular fluorescent lamp of 15 W with a 26 mm diameter of the tube [2]. Calculating $C = 0.63 \mu F$ and for working frequency, $f = 42.3$ kHz, a complete measured characteristics list is presented in table 1.

The lamp supplied at a voltage tension of 49 V_{RMS} is fed at a 0.275 mA current, having the frequency of 42.3 kHz. The absorbed power is 13.5 W and the apparent power is 30 VA. It results a power factor of 0,45. The new ballast power efficiency is of 0,964, the losses being of 0,5 W.

Ballast characteristics were measured with an analyzer type Fluke 39 - Power Meter, an oscilloscope Tektronix 222 and a phasemeter.

Table 1. Electric parameters of the new ballast

Characteristic	RMS value	Total disturbances [%]	Third order harmonics [%]	Fifth order harmonics [%]	Seventh order harmonics [%]	Ninth order harmonics [%]
Supplying voltage	230 V	3.0	2.2	1.8	0.4	0.1
Network current	13,2 mA	14.1	9.5	7.8	4.5	3.8
Max. current disturbances	-	-	13.5	10.0	7.0	5.0

Table 2. Checking of radioelectric disturbances

FREQUENCY	MEASURED LEVEL	MAXIMUM PERMISSIBLE LEVEL
MHz	dB μ V	dB μ V
0.16	66.0	66.0
0.20	63.0	63.4
0.24	61.0	62.3
0.28	61.0	61.0
0.33	52.0	59.7
0.37	58.0	58.5
0.41	45.0	57.5
0.45	56.0	56.6
0.49	44.0	56.0
0.53	56.0	56.0
0.58	44.0	56.0
0.62	56.0	56.0
0.71	56.0	56.0
0.75	43.0	56.0
0.79	56.0	56.0
0.88	56.0	56.0
0.96	56.0	56.0
1.04	55.0	56.0
1.14	52.0	56.0
1.22	52.0	56.0
1.60	39.0	56.0
2.80	42.0	56.0
5.50	35.0	60.0
16.1	45.0	60.0
19.5	55.0	60.0
22.3	52.0	60.0

The new electronic ballast accomplishes the limits imposed by radioelectric disturbances [3], as one can see from table 2 and figure 2.

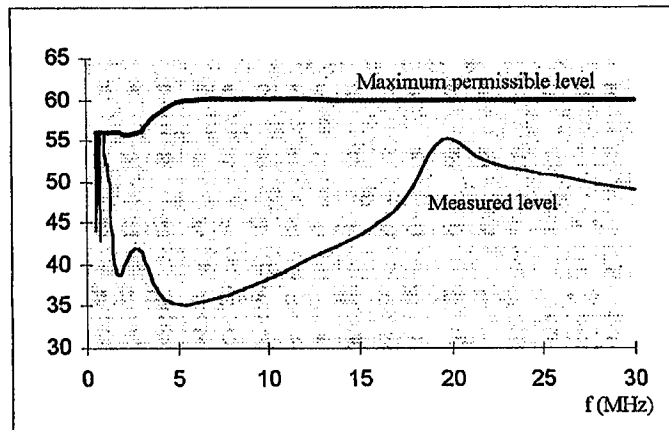


Figure 2 - Radioelectric disturbances

3. Conclusions

1. The new electronic ballast fulfils imposed standardised conditions as a result of an optimised design. Its electronic scheme is a simply one, without external filters. For this electronic scheme the electronic ballast becomes a cheap equipment in comparison with the regular solution.

2. On the market regular ballasts and the compact fluorescent lamps generate 3, 5, 7 and other important current harmonics disturbances with magnitude of 90 to 70 %. Such electronic ballasts are not fulfilling the limits imposed by new European standards.

3. The characteristics of the new electronic ballast recommend its use on the Romanian market. The authors are ready to assist the potential manufacturers who are eager to make this equipment.

Bibliography

- [1] IEC 1000-3-2/1995 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current $I_s \leq 16$ A per phase)
- [2] IEC 81/1984 Tubular fluorescent lamps for general lighting service

MODELLING OF SiC PHOTODIODE BY SPICE.

Authors: M. Košík, Doc. Ing. O. Vaněk CSc, Dr. Němeček

Introduction

Silicon carbide (SiC) is a wide bandgap semiconductor material. SiC absorbs radiation mainly in UV region of optical spectrum, therefore SiC is suitable as a material for photodiodes which detect UV radiation. The most investigated and used polytype of SiC is 6H-SiC. Photodiodes based on 6H-SiC have the best properties in comparison with photodiodes based on other polytypes of SiC [2]. 6H-SiC photodiodes absorb radiation in blue, violet and ultra violet region of optical spectrum. The maximum of quantum efficiency is in ultraviolet part. These photodiodes also have advantages as a small dark current, good sensitivity (in order miliampers/watt), they cannot be infatuated by a visible and infrared radiation.

Modelling of SiC photodiode in SPICE can help to understand behaviour of photodiode and allows simulation of circuits for detection of UV radiation with photodiodes. Model of photodiode can be applied in any circuits to simulate properties and behaviour of detection systems in DC, AC, transient, noise, fourrier and distortion analyses. Model is realised for real SiC photodiode JEC1, based on measured characteristics of this photodiode.

Model can be adjusted to any type of photodiode by a change of his parameters and coefficients.

Properties and modelling of SiC photodiode

Silicon Carbide (SiC) is a wide bandgap semiconductor material. SiC has a big amount of polytypes. The most investigated polytypes are 6H, 2H, 4H and 3C [1]. Polytype 6H is the most used for production of semiconductor elements. Width of bandgap 6H-SiC is 2.92eV, to this value corresponds absorpsion of optical radiation with wavelenghts less than 424nm, this is the reason why is 6H-SiC the most used for production of photodiodes which detect optical radiation in UV region of optical spectrum.

Spectral sensitivity of 6H-SiC photodiodes is without additional filters in range 200-400nm. 6H-SiC has a very small value of intrinsic carrier concentration: $n_i = 10^{-5} \text{cm}^{-3}$ [2] it means that photodiodes based on SiC have a very small dark current (in order of fento amps) [2]. Dark current of photodiode is defined by formula:

$$I_s = q \cdot A \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{D_p}{L_p \cdot N_d} + \frac{D_n}{L_n \cdot N_a} \right)$$

The most used structure of SiC photodiodes is N⁺PP [2]. Photodiode is realised by epitaxial growth of P layers. Layer N⁺ is deposited by epitaxy or by ion implantation. With precision technology is possible create very straight PN junction.

Photodiode is possible modelling by a parallel combination of normal SiC diode with source of photocurrent (Fig. 1). This model corresponds to following equation:

$$I_{PD} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_a}{nkT}\right) - 1 \right] - I_{PC}$$

Part $I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_a}{nkT}\right) - 1 \right]$ is a Shockley equation which represents current of diode. I_{PC} is a photocurrent of a photodiode generated by optical radiation absorbed in photodiode. I_{PC} is defined as: $I_{PC} = S_\lambda \cdot \phi$, where S_λ is a spectral sensitivity of photodiode and ϕ is an optical power flowing on photodiode.

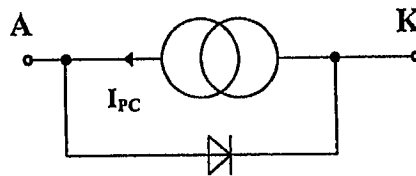


Fig. 1

Modelling in SPICE

SPICE allows to simulate electrical circuits by a simulation of electrical quantities like electrical voltage, current, charge, frequency, etc. SPICE allows simulate electrical circuits with passive electrical elements like resistors, capacitors, inductors and active electrical elements like diodes, transistors and controlled sources. SPICE doesn't allow simulate optical quantities like optical power of radiation or wavelength. It's required to substitute these optical quantities by electrical quantities.

Very advantageous is to simulate an optical power as an electrical voltage, where 1V of electrical voltage corresponds to 1W of an optical power. Likewise wavelength is also modelled by an electrical voltage, where 1nV of electrical voltage corresponds to a 1nm of wavelength of optical radiation.

Electrical elements are modelled by their models, which describe their behaviour. SPICE uses combination of mathematical and physical models. For example semiconductor diode is modelled by a Shockley equation. But modelling by a Shockley equation is not such accurate for behaviour of real diode, so model of diode in SPICE is supplemented with additional equations, which make behaviour of diode's model more accurate mainly in region of high injection and near to region of breakdown voltage.

Models in SPICE are realised through parameters. It means that is possible to change behaviour of model by changing of any parameter from parameters of model. Semiconductor diode has about 20 parameters which is possible to change and set to desired behaviour of diode model. Some of these parameters are: BV (breakdown voltage), IS (saturation current), N (ideality coefficient), CJO (capacitance of diode), etc.

SPICE also allows to use special controlled sources. SPICE provides four kinds of controlled sources:

- voltage controlled voltage source (VCVS)
- voltage controlled current source (VCCS)
- current controlled current source (CCCS)

-current controlled voltage source (CCVS)
 With these sources is possible realise any kind of functions.

Model of SiC photodiode for SPICE

Model of SiC photodiode is realised with a consideration on measured characteristics of a real SiC photodiode JEC1.

Principial schematic of model photodiode JEC1 is on Fig. 2.

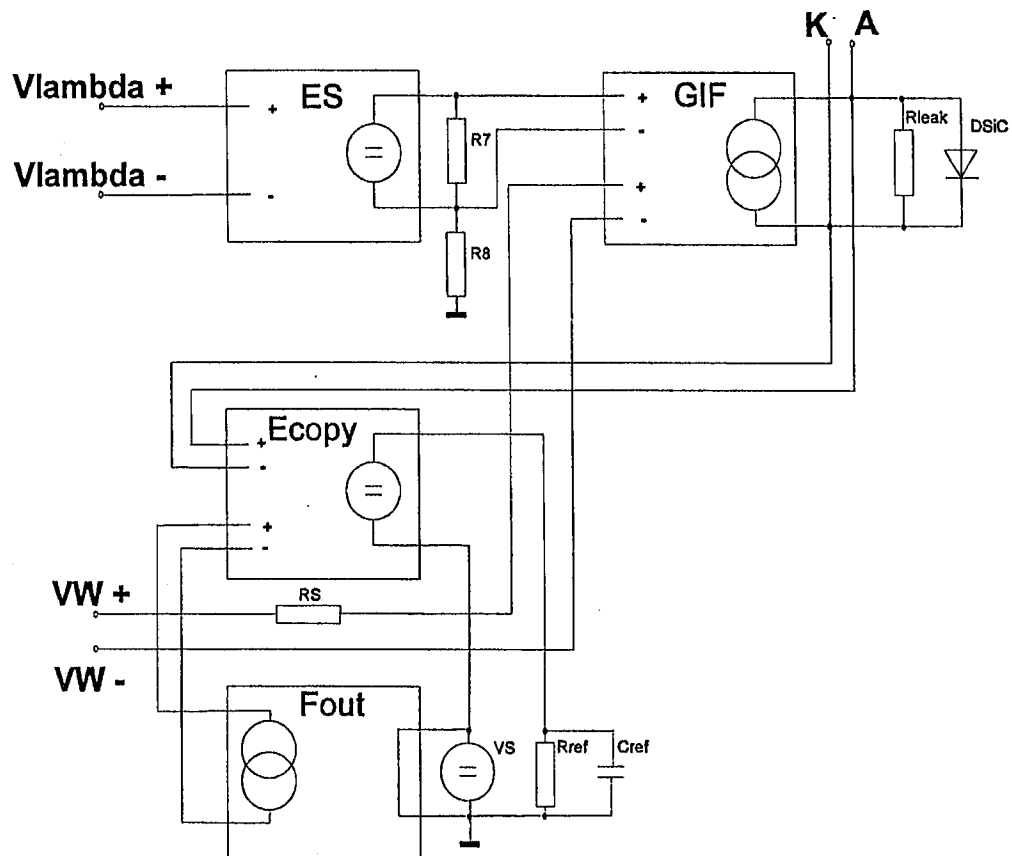


Fig. 2

Description of model's schematic:

Vlambda+, *Vlambda-*

These are inputs for a voltage source that determines wavelength of illumination. Value of voltage between these inputs is equal to wavelength.

VW+, *VW-*

These are inputs for optical power of radiation. Voltage between these two inputs is equal to an optical power of radiation flowing on photodiode.

A, *K*

A is an anode of photodiode. *K* is a cathode of photodiode.

ES

Voltage controlled voltage source. Numerical value of voltage on output of source ES represents relative spectral sensitivity of photodiode. Input is related to voltage which represents wavelength of illumination. Dependence between output and input voltage of source ES is polynomial and is defined by a polynomial of 9th degree. Coefficients of polynomial were gained by polynomial regression of measured spectral sensitivity of photodiode JEC1. Adapt spectral characteristic is possible by a change of coefficients of polynomial, it means that model can be used also for any photodiode. Comparison of measured and simulated relative spectral characteristics is on Fig. 3.

Ecapy

Voltage controlled voltage source.

Fout

Current controlled current source.

Ecapy and *Fout* together provide function of voltage controlled capacitance. They model capacitance of PN junction in dependence on voltage connected between anode and cathode of photodiode. This dependence is also defined by a polynomial approximation (polynomial of 6th degree). By a polynomial regression was approximated measured C-V characteristic of photodiode JEC1 (Fig. 4).

GIF

Voltage controlled current source. As output of GIF source is photocurrent I_{PC} of photodiode. Photocurrent I_{PC} is defined by a formula: $I_{PC} = U_{ES} * U_{VW} * 0.11284$, where U_{ES} is an output voltage of source ES and U_{VW} is a voltage that defines optical power of radiation. Value 0.11284 corresponds to measured absolute spectral sensitivity 0.11284 A/W at $\lambda=290\text{nm}$.

DSiC

SiC diode. Model is realised by a model of semiconductor diode in SPICE, with competent setting of parameters of this model to correspond to measured voltage-current characteristic of SiC photodiode measured without illumination.

Rleak

Resistor which is used to set up leakage current of photodiode.

Because model is realised for real photodiode JEC1, additional adjustment of model to some other photodiode is possible by a change of coefficients of polynomial in sources ES (relative spectral characteristic) and Ecapy (C-V characteristic). Also it's important to change parameters of model of diode DSiC and value of Rleak resistor.

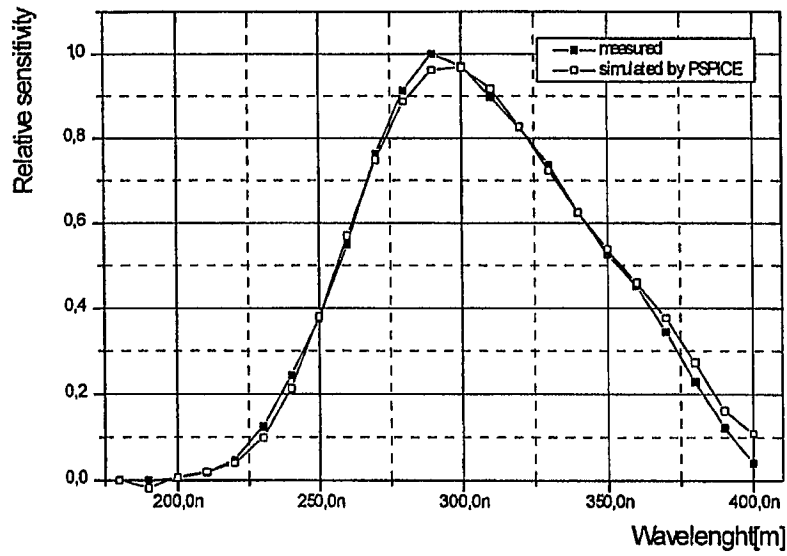


Fig. 3

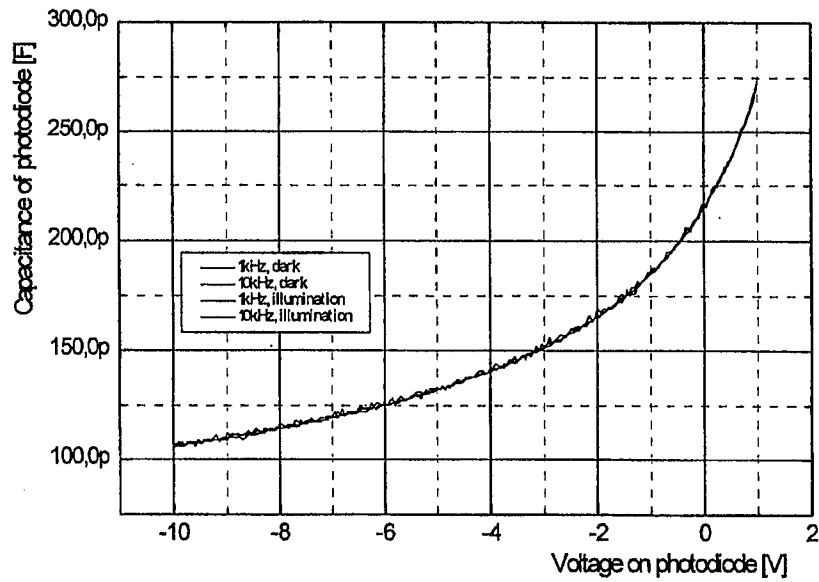


Fig. 4

Verifivation of model's behaviour

Model of photodiode JEC1 allows verification of model's behaviour in spectral, DC, frequency and time domain.

Verification of spectral characteristics

Simulation runs in a DC domain (DC analyse). Source Vlambda is connected to inputs of model Vlamba+ and Vlambda-. During simulation is voltage of source Vlambda rising from 200nV to 400nV, it corresponds to rising of wavelenght from 200 to 400nm. It can be said that source Vlambda is like a monochromator.

Any source of optical power can be connected to inputs of model VW+, VW-, optical power can be also dependent on wavelenght (on voltage of source Vlambda). For example on Fig. 5 is a spectral dependance of density of optical radiation in W/mm^2 . Because area of photodiode JEC1 is exactly $1mm^2$, numerical value of density of optical radiation in W/mm^2 corresponds to value of optical power flowing on area of photodiode JEC1 (charakteristic on Fig. 5 shows density of optical UV radiation flowing from Sun to Earth's surface during sunny day) [3].

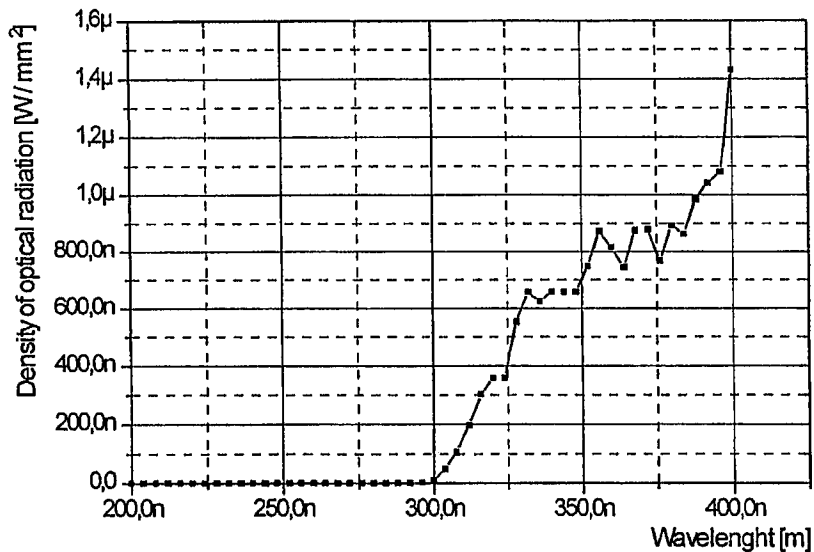


Fig. 5

On Fig. 6 is an absolute spectral sensitivity simulated by SPICE. On Fig. 7 is a photocurrent versus wavelenght like reaction on illumination of photodiode by an optical power from Fig. 5.

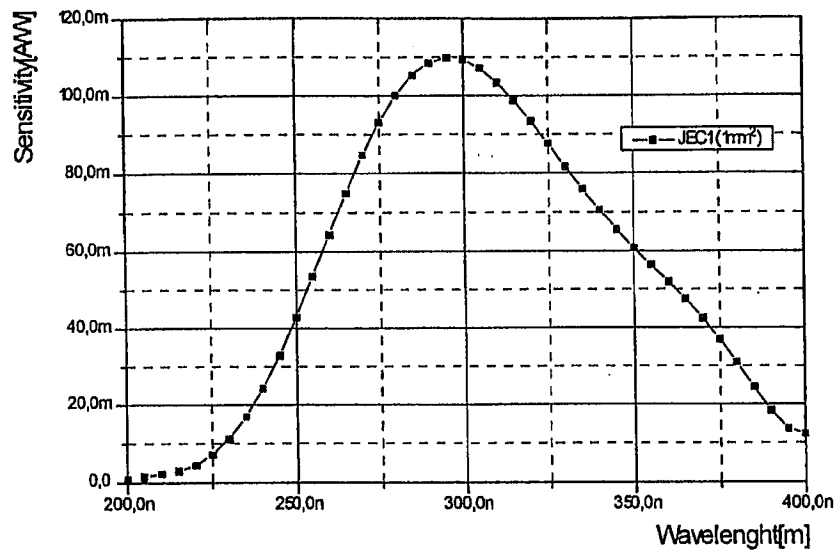


Fig. 6

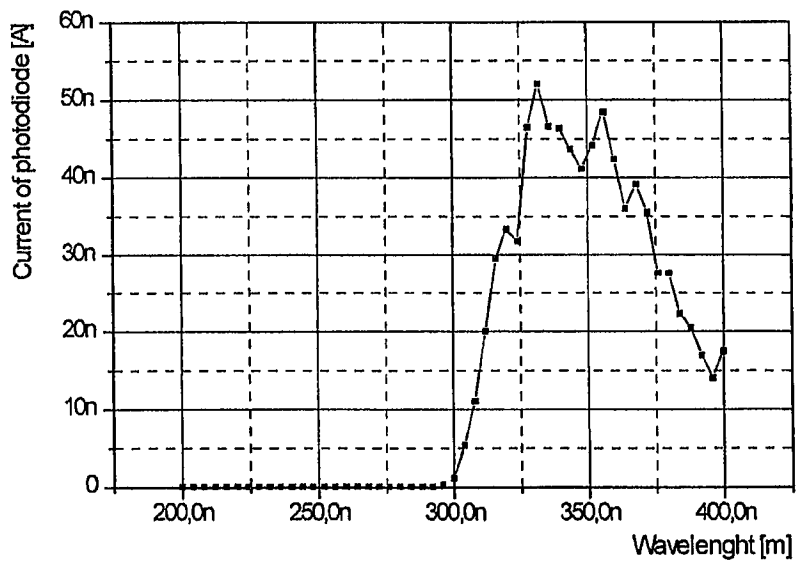


Fig. 7

Verification of voltage-current characteristics

During verification of voltage-current characteristics is to photodiode connected voltage which is changed within desired range. Current is measured. Parameter of simulation is optical power flowing on photodiode. Simulated characteristics are on Fig. 8.

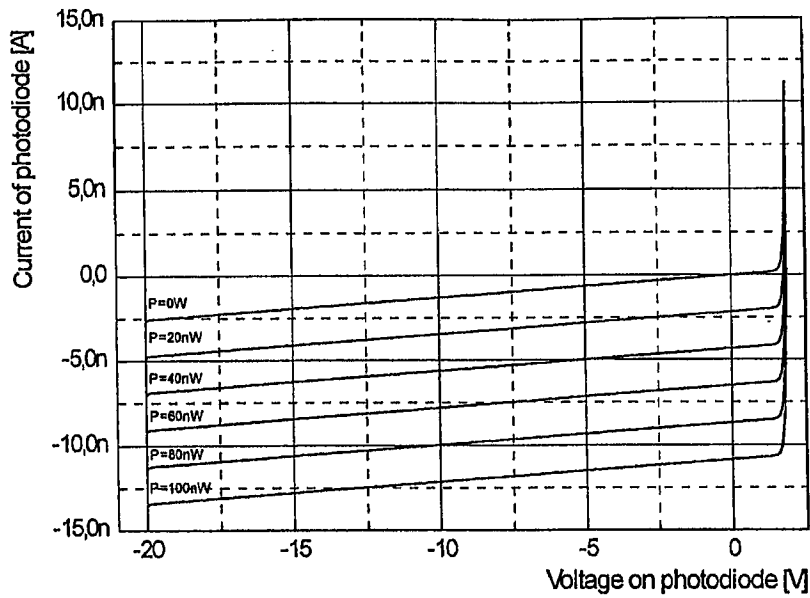


Fig. 8

Verification in frequency and time domains

Frequency characteristics are simulated by AC analyse. Frequency of AC source is changed within desired range. This frequency is practically frequency of „blinking“ of radiation source. Falldown frequency mainly depends on two parameters of model photodiode: on capacitance of PN junction and on transmit time parameter of DSiC. Simulated characteristics are on Fig. 9. Parameter is a voltage conected to photodiode in reverse bias. Capacitance of PN junction is rising with decreasing of reverse bias voltage and for this reason falldown frequency of model is decreasing.

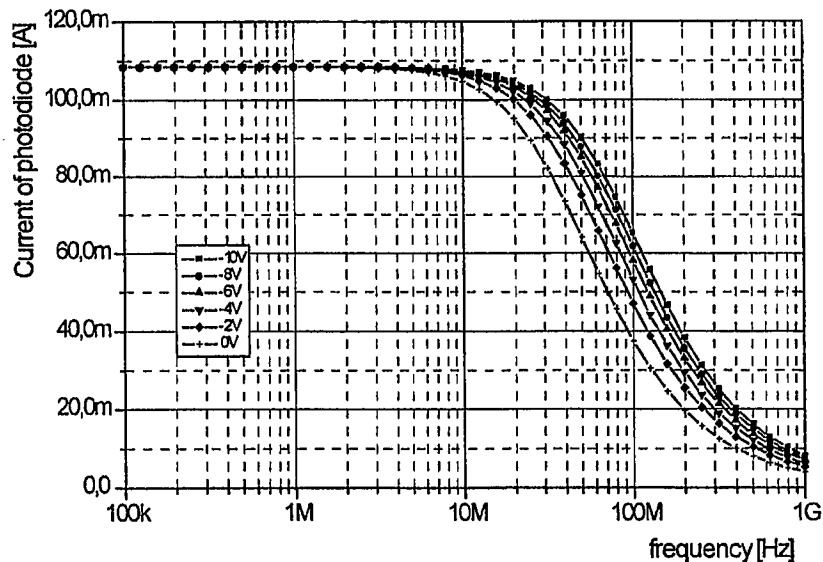


Fig. 9

In time domain is a photodiode illuminated by pulses of radiation. In this domain is possible to measure rise time t_{ON} and fall time t_{OFF} of photodiode. On Fig. 10 are simulated characteristics as reaction on illumination with pulses of optical power. Parameter is again voltage on photodiode in reverse bias. Effect of dependence of capacitance of PN junction is clear from this figure. With rising capacitance are times t_{ON} and t_{OFF} also rising.

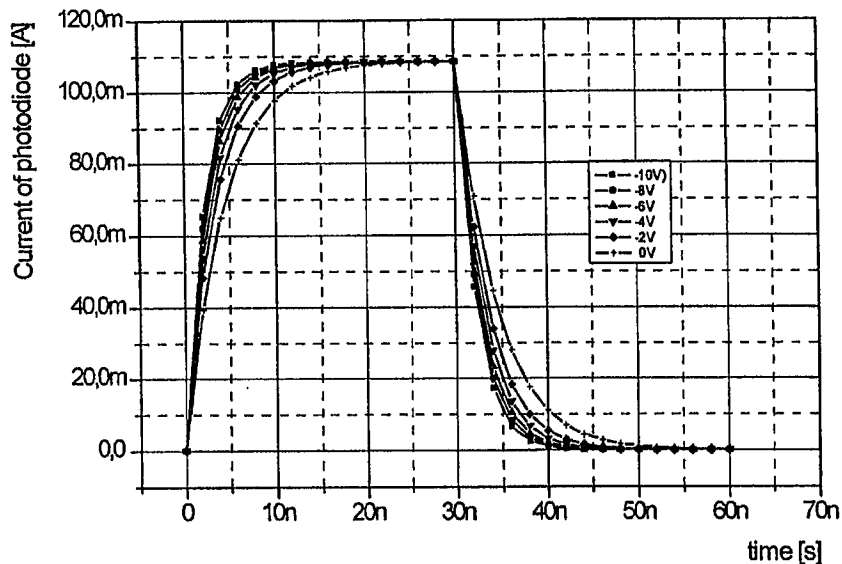


Fig. 10

Applications of SiC photodiodes and their models

Range of useful applications for SiC photodiodes is very wide. SiC photodiodes can be implemented in systems monitoring ozone layer. Another wide area of application of SiC photodiodes is in health service as method of diagnostic of human blood, skin, etc. Also other applications in diagnostic of materials.

Model of photodiode is very useful tool during design part of detection system, when is possible simulate behaviour of whole system before his practical realisation. Model can be also used for better understanding of photodiode's behaviour and application.

On Fig. 11 is a schematic of simple application of photodiode's model in simulation of behaviour a simple detection system. On Fig. 12 is simulated dependance of output of operational amplifier on optical power flowed on photodiode.

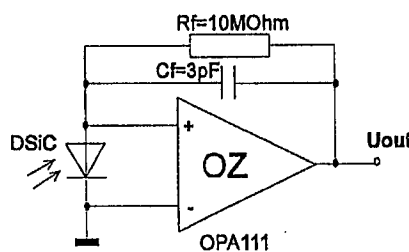


Fig. 11

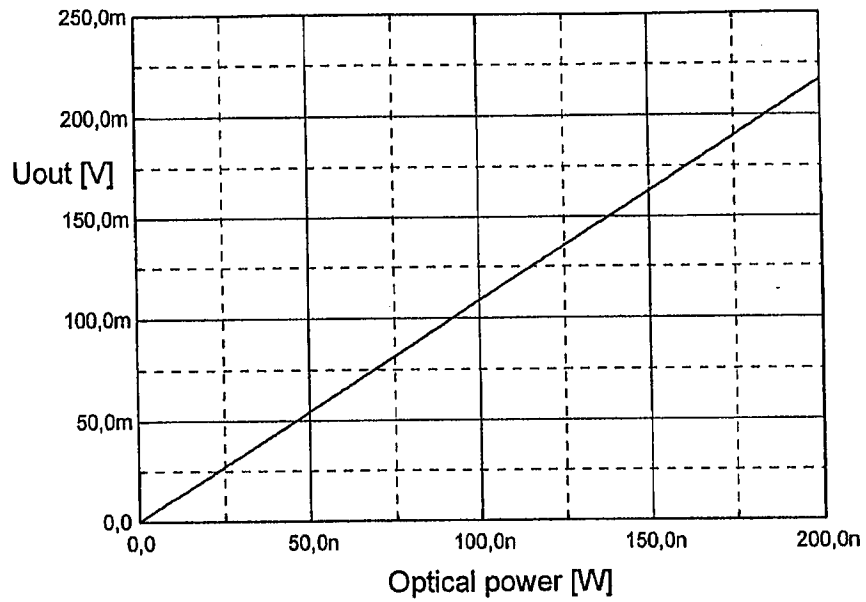


Fig. 12

Reference:

- [1] G. L. Harris, C. Y. W. Yang: *Amorphous and crystalline silicon carbide and related materials.*
- [2] John A. Edmond, Calvin H. Carter, Jr. Cary: *United States Patent - High sensitivity ultraviolet detector.*
- [3] H. Kaase: *Ozon layer depletion (in biologic effects of light).*

Durch das Vorschaltgerät in Verbindung mit der Lampe werden Netzstrom-Oberschwingungen erzeugt. Nach den Erkenntnissen des ZVEI /6/ sind diese Netzstrom-Oberschwingungen unabhängig von der Leuchtenkonstruktion und somit kann der Vorschaltgerätehersteller allein die Einhaltung dieser Norm beeinflussen.

4 Einhaltung der Störaussendung

Die Störaussendung muss bei Leuchten, die bereits bei den Netzstrom-Oberschwingungen aufgeführt sind, überprüft werden. Die Einhaltung der Störaussendung ist nicht an andere delegierbar. Somit ist der Leuchtenhersteller für die Einhaltung allein verantwortlich und muss die kompletten Leuchten entsprechend selber prüfen oder durch ein Prüfinstitut prüfen lassen.

4.1 Feldgebundene Störaussendung

Hier ist nur die Messung der magnetischen Komponente mittels Rahmenantenne gefordert. Die zu messende Leuchte steht dann in der Mitte der Rahmenantenne. Die drei Richtungen des Feldes sind einzeln nacheinander zu messen. Jeder der gemessenen Werte muss die Anforderungen erfüllen.

4.2 Leitungsgebundene Störaussendung

Die Funkstörung wird generell durch die Gasentladung der Lampe und durch das Vorschaltgerät verursacht. Weitere Einflussfaktoren sind die abschirmende Wirkung der einzelnen Leuchte und die Kapazität der Leuchtenverdrahtung.

Die leitungsgebundene Störaussendung wird in Abhängigkeit vom Vorschaltgerät gemessen. So wird bei Leuchten mit Leuchtstofflampen und magnetischen Vorschaltgeräten die Einfügungsdämpfungsmessung, bei Leuchten mit Gasentladungslampen und Niedervoltglühlampen, die an elektronischen Vorschaltgeräten bzw. elektronischen Transformatoren betrieben werden, die Störspannungsmessung durchgeführt.

4.2.1 Einfügungsdämpfungsmessung

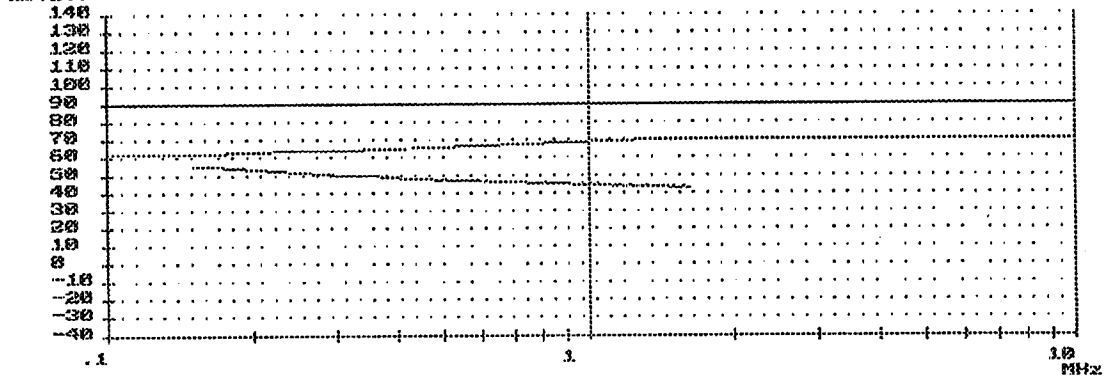
Für die Einfügungsdämpfungsmessung wird eine komplett verdrahtete Leuchtstofflampenleuchte genommen. Bei dieser Leuchte wird der Kondensator des üblichen Glimmstarters durch einen Kondensator von 5000 pF ersetzt. Die Leuchtstofflampe wird durch eine Phantomlampe, die die HF-Eigenschaften der Leuchtstofflampe nachbildet, ausgetauscht. Es wird keine Netzspannung an die Leuchte angelegt, sondern mit einem HF-Generator eine sinusförmige Spannung im vorgegebenen Frequenzbereich auf die Phantomlampe gegeben.

Bei diesen Messungen wird ein Frequenzbereich von 0,15 MHz bis 1,61 MHz abgefahren. Im Störspannungs-Frequenz-Diagramm ist dann die Messkurve und die Grenzkurve dargestellt. Liegt die gemessene Kurve unter der von der Norm vorgegebenen Kurve, ist die Leuchte in Ordnung, d.h., sie erfüllt die Norm (Bild 1).

Kommentar
CM-2/152/1 PF

Firma : BIG, Strullendorf
Abteilung : Technik
Bearbeiter : Frau Drauert

Messprotokollnr.: aa0803n1
dB(uV)



IF: 00.15000 MHz FF: 01.61000 MHz StA: 00.00000 MHz StB: 00.01000 MHz
 Detector: CISPR Modality: STANDARD Filter: NORM. Input: PRDT. INP.
 Atten. 20dB: ON Track_gen.: ON Variscan: DISABLE Autoran.: ENABLE
 Mask: CONST 90 90 dB Diagr. = 0 dB Daempfung
 Mask: Daempf90 VDE 0875 Tab.1 (Measuring Mask)
 Antenna: Default 0 dBuo attenuation Antenna

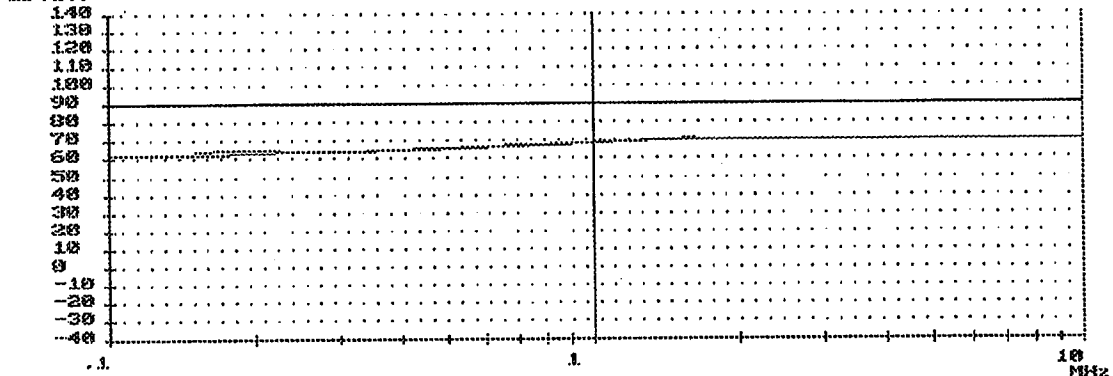
Bild 1: Einfügungsdämpfungsmessung mit X-Kompensation, die die Norm erfüllt

Liegt die gemessene Kurve auf oder gar über der von der Norm vorgegebenen Kurve muss kompensiert werden (Bild 2 und Bild 3).

Kommentar
TM-1/152

Firma : BIG, Strullendorf
Abteilung : Technik
Bearbeiter : Frau Drauert

Messprotokollnr.: aa0803n1
dB(uV)



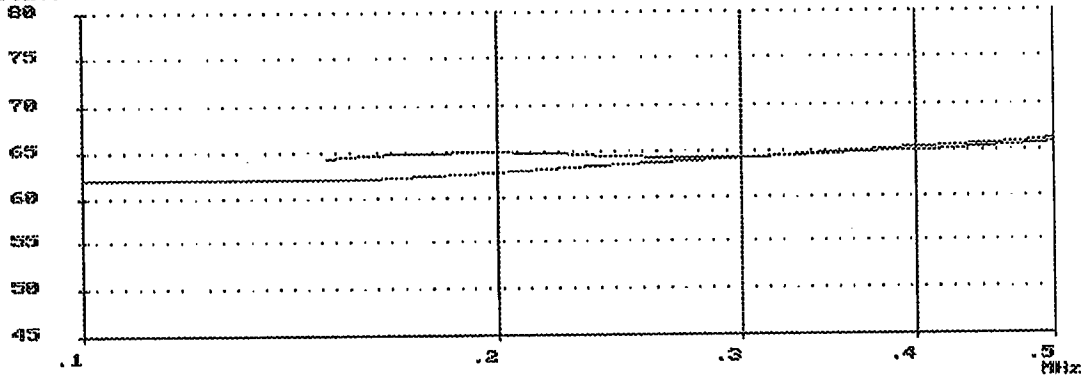
IF: 00.15000 MHz FF: 01.61000 MHz StA: 00.00000 MHz StB: 00.01000 MHz
 Detector: CISPR Modality: STANDARD Filter: NORM. Input: PRDT. INP.
 Atten. 20dB: ON Track_gen.: ON Variscan: DISABLE Autoran.: ENABLE
 Mask: CONST 90 90 dB Diagr. = 0 dB Daempfung
 Mask: Daempf90 VDE 0875 Tab.1 (Measuring Mask)
 Antenna: Default 0 dBuo attenuation Antenna

Bild 2: Einfügungsdämpfungsmessung mit X-Kompensation, bei der die gemessene Kurve über der Grenzkurve liegt

Kommentar
TM-1/152

Firma : BIG, Strullendorf
Abteilung : Technik
Bearbeiter : Frau Drauert

Messprotokollnr.: aam003n1
dB(uV)



If: 80.15000 MHz FF: 81.61000 MHz Sta: 80.00000 MHz StB: 80.01000 MHz
 Detector: CISPR Modality: STANDARD Filter: NORM. Input: PROT. INF.
 Atten. 20dB: ON Track_gen.: ON Variscan: DISABLE Autoran.: ENABLE
 Mask: CONST 90 90 dB Diagr. = 0 dB Daempfung
 Mask: Daempf98 UDE 8875 Tab.1 (Measuring Mask)

Antenna: Default 0 dBuo attenuation Antenna

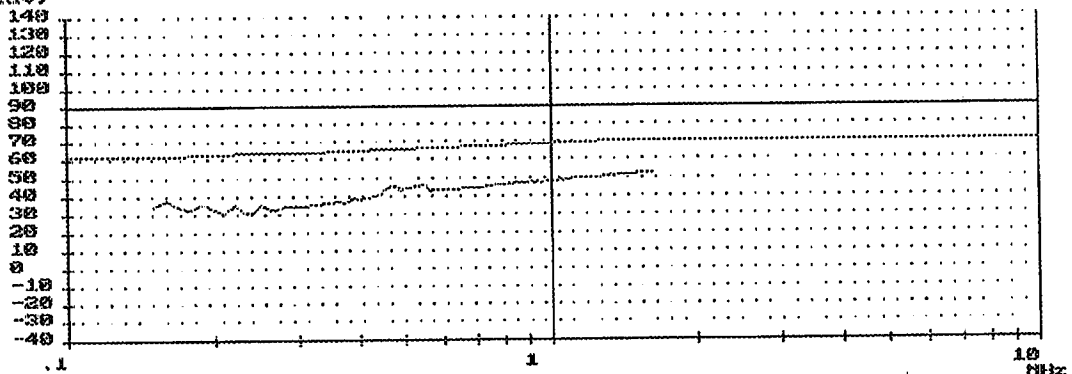
Bild 3: Vergrößerung zu Bild 2

In den meisten Fällen reicht zur Kompensation ein X-Kondensator, der an der Leuchtenklemme zwischen Null und Phase geschaltet wird. In manchen Fällen reicht das aber nicht aus und es muss zwischen Phase, Null und Schutzleiter mit einem sogenannten X1Y-Kondensator kompensiert werden (Bild 4).

Kommentar
TM-1/152 0,1nF+2x15000pF

Firma : BIG, Strullendorf
Abteilung : Technik
Bearbeiter : Frau Drauert

Messprotokollnr.: aam05n1
dB(uV)



If: 80.15000 MHz FF: 81.61000 MHz Sta: 80.00000 MHz StB: 80.01000 MHz
 Detector: CISPR Modality: STANDARD Filter: NORM. Input: PROT. INF.
 Atten. 20dB: ON Track_gen.: ON Variscan: DISABLE Autoran.: ENABLE
 Mask: CONST 90 90 dB Diagr. = 0 dB Daempfung
 Mask: Daempf98 UDE 8875 Tab.1 (Measuring Mask)

Antenna: Default 0 dBuo attenuation Antenna

Bild 4: Einfügungsdämpfungsmessung mit Kompensation durch einen X1Y-Kondensator

Die Verlegung und die Länge der Verdrahtung spielt bei magnetischen Vorschaltgeräten nach unsere Erfahrung keine Rolle. Es muss aber darauf geachtet werden, dass das Vorschaltgerät richtig angeschlossen wird, d.h. es muss auf die vom Hersteller angegebenen Lampen- und Phasenanschlüsse genau geachtet werden.

4.2.2 Störspannungsmessung

Für die Störspannungsmessung wird eine komplett verdrahtete Leuchte mit elektronischem Vorschaltgerät (EVG) oder mit elektronischem Transformator genommen. Es werden Messlampen in die Leuchte eingesetzt, die zuvor 100 Stunden gemäß Vorschrift /1/ eingebrannt wurden. Dann wird über den Funkstörmessempfänger Netzspannung zugeführt. Der Funkstörmessempfänger ermittelt die Störspannung in einem Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz. Das Ergebnis der Messung, die ca. 10-15 Minuten dauert, ist dann in einem Störspannungs-Frequenz-Diagramm dargestellt. Auch hier muss die gemessene Kurve unter der Grenzkurve liegen (Bild 5).

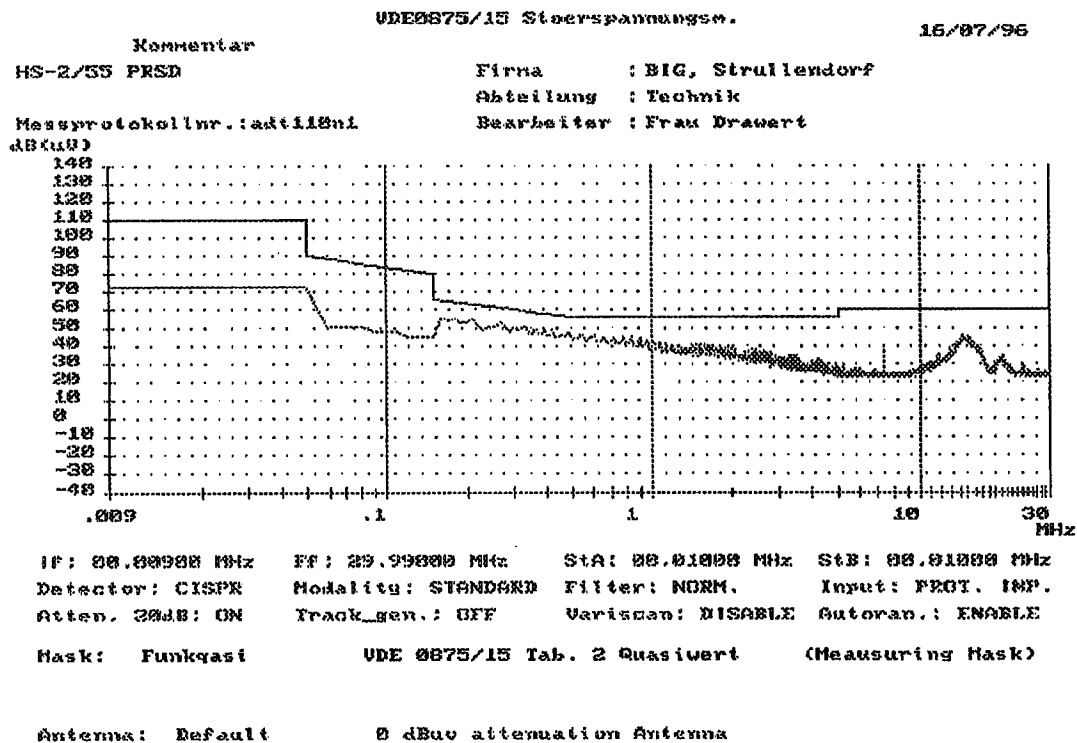


Bild 5: Störspannungsmessung bei der die Norm erfüllt wird

Hauptursachen für die Überschreitung der Grenzkurven sind schlecht entstörte elektronische Vorschaltgeräte und elektronische Transformatoren sowie schlechte Lage der Verdrahtung (Bild 6 und Bild 7). So darf die Verdrahtung nicht unter den Leuchtstofflampen und möglichst auch nicht unter deren Sockeln bzw. Fassungen entlang laufen. Die lampenseitige Verdrahtung darf keine Schleifen (Spuleneffekt) aufweisen und muss so kurz wie möglich geführt werden. Die vom Hersteller angegebenen sogenannten kurzen und langen Enden sowie deren Maximallängen müssen unbedingt eingehalten werden.

Die Netzzuleitung darf ebenfalls nicht unter den Leuchtstofflampen verlaufen. Die Strecken, bei denen die Lampenverdrahtung und die Netzzuleitung parallel laufen müssen, müssen so kurz wie möglich sein.

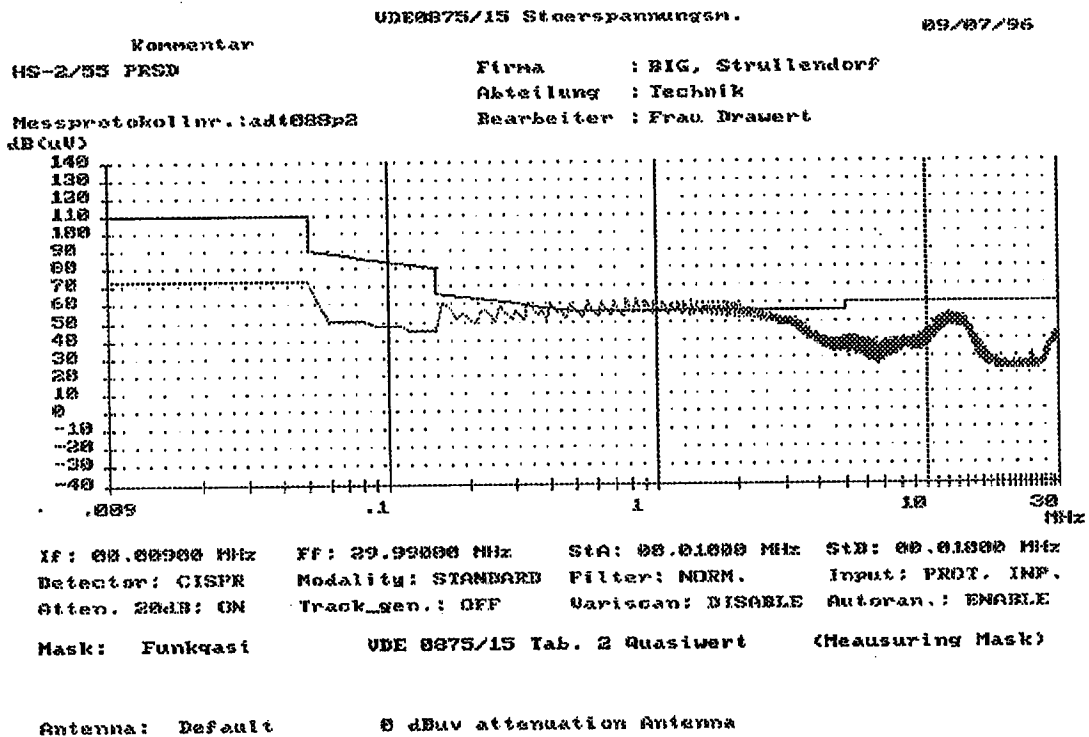


Bild 6: Störspannungsmessung bei der die gemessene Kurve teilweise über der Grenzkurve liegt

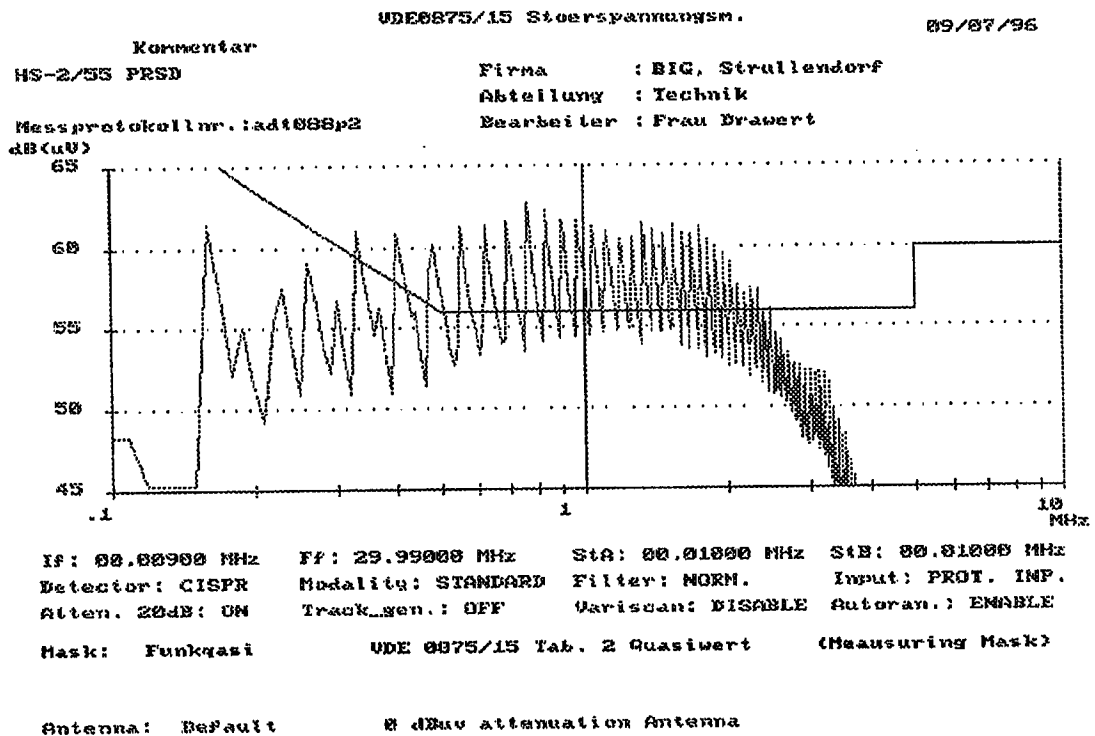


Bild 7: Vergrößerung zu Bild 6

5 Schlussbetrachtung

Wie die Betrachtungen und unsere Erfahrungen gezeigt haben, wird die Einhaltung der EMV-Grenzwerte nicht automatisch durch die Herstellung der Leuchte gewährleistet. Es lohnt sich für den Leuchtenhersteller, die ihm verbleibende Verantwortung der Störaussendung mit Messungen zu überprüfen und entsprechende Maßnahmen bei der Auswahl der Vorschaltgeräte, beim konstruktiven Aufbau der Leuchte und speziell bei der Führung der Verdrahtung zu treffen und gegebenenfalls geeignete Kompensationsmaßnahmen zu ergreifen. Die Notwendigkeit dieser Maßnahmen und speziell die Störeigenschaften von Leuchten und Leuchtmitteln wird in aktuellen Artikeln wie von Prof. U. Schwarz /7/ verdeutlicht.

Literaturverzeichnis

- /1/ EMV-Richtlinie 89/336/EWG letzte Fassung 92/31 EWG
- /2/ Bundesgesetzblatt, Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten vom 9. November 1992
- /3/ Einhaltung der Störfestigkeit DIN EN 61574
- /4/ Einhaltung der Netzstrom-Oberschwingungen DIN EN 61000-3-2
- /5/ Einhaltung der Störaussendung DIN EN 55015
- /6/ Fachverband Elektroleuchten ZVEI; CE-Kennzeichnung für Leuchten, Lampen und Leuchtzubehör, November 1995
- /7/ Prof. U. Schwarz, EMV in der Gebäudesystemtechnik, elektobörse Sonderausgabe / Juli 1997 / 49. Jahrgang

COMPUTER MEASUREMENT SYSTEM OF DEFORMED COURSES FOR DISCHARGE LAMPS

Dr Waław Kędziora
Małgorzata Zalesińska M.Sc.
Monika Sadowska (5th year student)

Poznan University of Technology
Lighting Division
ul. Piotrowo 3A
60-967 Poznań, Poland

I. INTRODUCTION

When discharge lamps are supplied with sinusoidal voltage of the mains frequency, nonsinusoidal current flows in their circuits, and voltage courses in circuit elements are also deformed. Deformation magnitude of currents and voltages in these circuits depends mainly on the lamp type and also on the kind of applied ballasts and starters, elements of passive power compensation, etc. Deformation of voltages and currents in discharge lamp circuits can cause disadvantageous phenomena both in the supply network, circuit elements, and in the discharge lamp itself. A wide range of disadvantageous effects requires a detailed recognition of the influence of different factors on the deformation magnitude of currents and voltages. A computer measurement system of time courses with programs for further processing of these data is necessary for the analysis of discharge lamp operation.

II. DESCRIPTION OF THE MEASURING SYSTEM

The computer measurement system of voltages and currents consists of a measurement set and an analysis unit for time courses. The measurement system includes a TEKTRONIX 2211 digital oscilloscope and an IBM computer set with the software to transfer store, and present graphically investigated signals. There is a possibility to store and show 4 time courses simultaneously on the oscilloscope screen (2 reference and 2 investigated ones). The courses of voltages and currents stored in the oscilloscope's memory can be transferred to the computer, show on the monitor screen, stored as files on the hard disk, or printed by a printer or plotter. Exemplary time courses obtained from the described measurement set are presented in Fig. 1.

A utility program called PRODAT is used for further studies of the investigated courses. This program enables to carry out many mathematical operations on the set of signals of up to 64 signals, of the length of 8000 steps. The program options concerning conversion of signals, approximations, smoothening, integrating and differentiating, harmonic analysis, and statistical analysis are especially useful for the signal analysis.

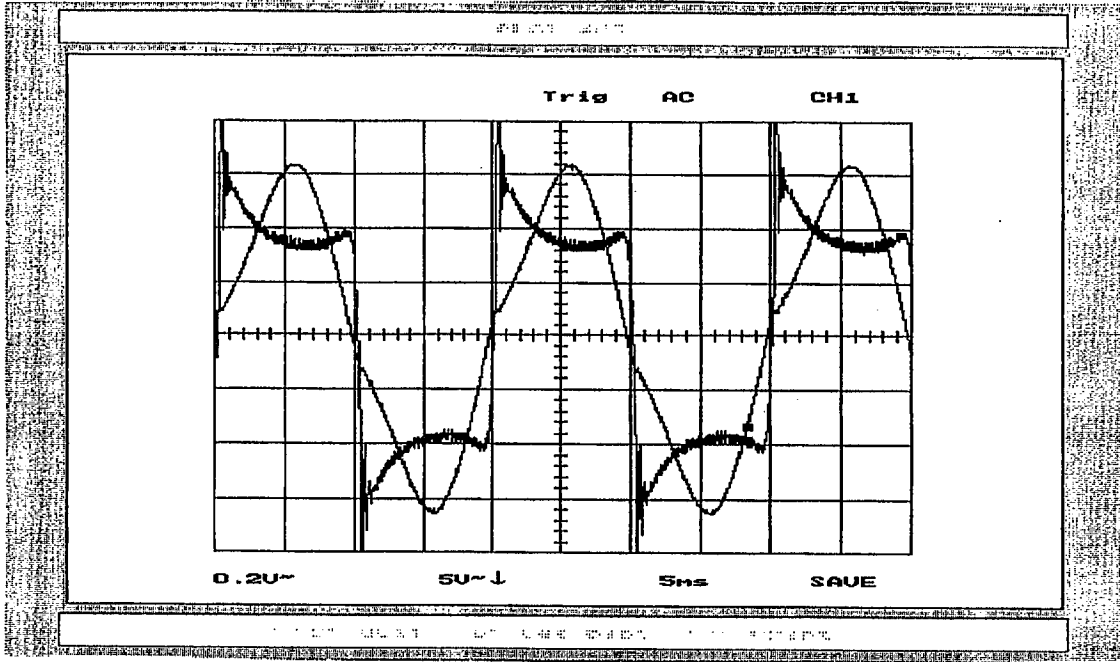


Fig.1. Oscillogram voltages and currents obtained from the described measurement set.

III. STUDIES OF THE DEFORMED SIGNALS

The analysis of various discharge lamps was carried out on the basis of voltage and current oscillograms measured in the circuit. The measurements were taken for fluorescent lamps at inductive, inductive-capacitive, capacitive, and resistance stabilisations and for high pressure sodium, mercury, and metal-halide lamps using laboratory meters and the computer measuring system. Exemplary research results are presented in Fig.2 and 3.

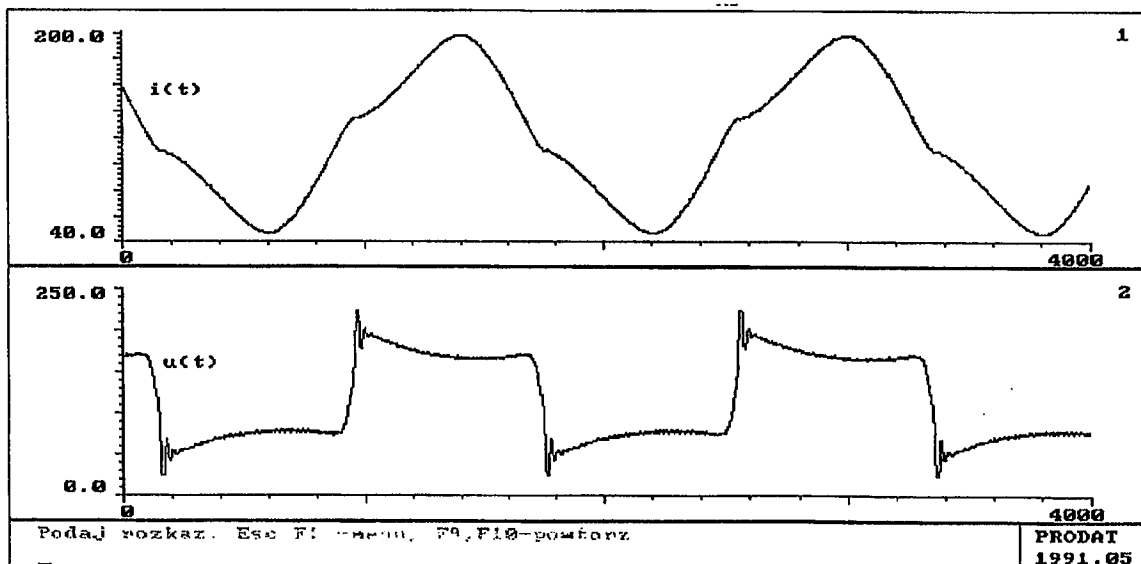


Fig.2. Time courses of voltage and current for fluorescent lamp at inductive-capacitive stabilisation.

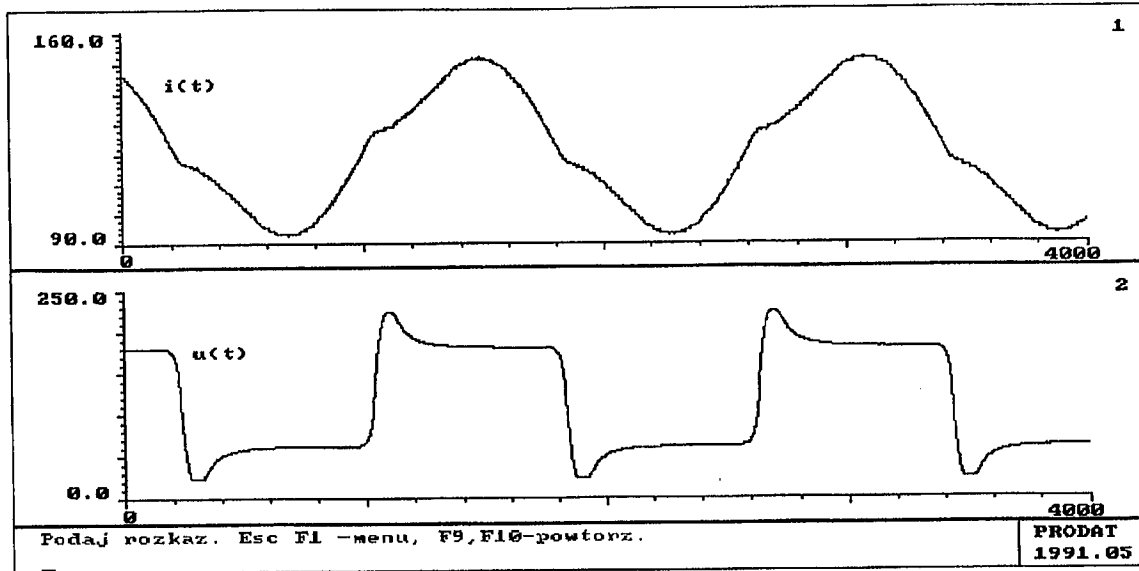


Fig.3. Time courses of voltage and current for high pressure sodium lamp.

Measurement results of time courses of voltages and currents for discharge lamps are present in Table 1.

TABELE 1

MEASUREMENT RESULTS OF TIME COURSES OF VOLTAGES AND CURRENTS FOR DISCHARGE LAMPS

Type of discharge lamp	Measurement			
	laboratory meters		computer measurement system	
	I_1 [A]	U_1 [V]	I_1 [A]	U_1 [V]
fluorescent lamp at inductive stabilisation	0.43	107	0.44	113
high-pressure sodium lamp	1.43	135	1.49	143
high-pressure mercury, lamp	1.15	127	1.17	119
high-pressure metal-halide lamp	1.73	87	1.78	91

An advantage of the presented computer measurement system is that we can obtain and analyze power time courses on a discharge lamp. Thus the research project included also an analysis of instantaneous power and active power of an investigated lamp. If we know these parameters we can evaluate the circuit's energetic balance, luminous efficacy, and lamp durability. Since the lamp's voltage and current are nonsinusoidal courses, instantaneous power will be deformed too. The instantaneous value of the active power carried by the electrodes at deformed courses is much higher than at sinusoidal current, which decreases the lamp's durability resulting from temperature increase of the cathode spot.

The course of instantaneous power, regardless of the nature of changeability in time of the lamp's voltage and current signals is possible to obtain directly in the PRODAT program as a product of these signals

$$p_1(t) = u_1(t) * i_1(t) \quad (1)$$

It is possible to calculate the active power of a discharge lamp as a mean value of the signal $p_1(t)$ on the basis of instantaneous power signals

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T p_1(t) \quad (2)$$

Exemplary courses of instantaneous power of discharge lamp are presented in Fig.4, and 5.

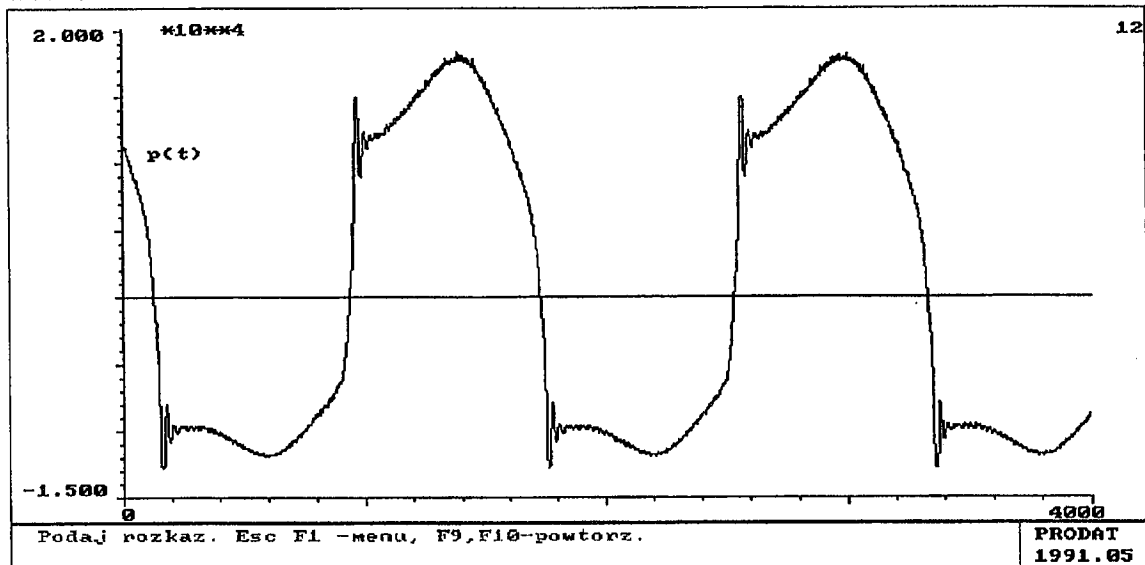


Fig. 4. Courses of instantaneous power of fluorescent lamp at inductive-capacitive

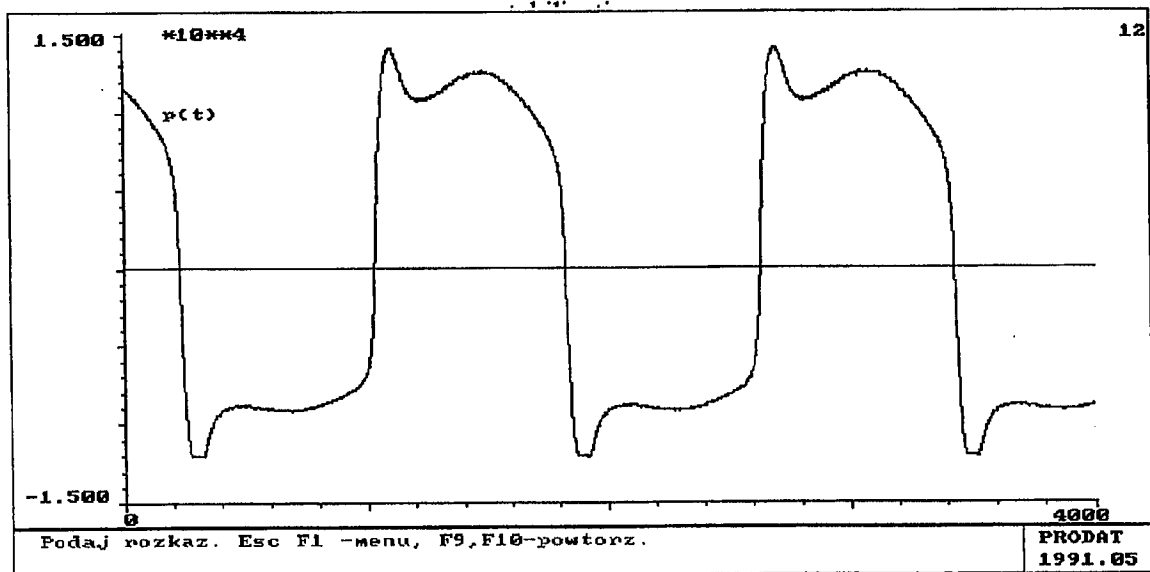


Fig. 5. Courses of instantaneous power of high - pressure sodium lamp.

The presented computer measurement system enables also to carry out accurate calculations of the harmonic content in the investigated signals of voltages, currents and instantaneous power of lamps (Table 3, Fig. 6 and 7).

TABLE 3

CALCULATIONS OF THE HARMONIC CONTENT IN THE INVESTIGATED SIGNALS OF VOLTAGES, CURRENTS AND INSTANTANEOUS POWER OF HIGH-PRESSURE SODIUM LAMP.

Electric signal	Proportional harmonic content in electric signal				
	2nd harmonic	3rd harmonic	5th harmonic	7th harmonic	9th harmonic
current of lamp	0.5	12.0	3.2	1.7	1.3
voltage of lamp	0.1	35.6	22.5	15.2	10.1
power of lamp	4.8	26.2	16.9	11.3	7.5

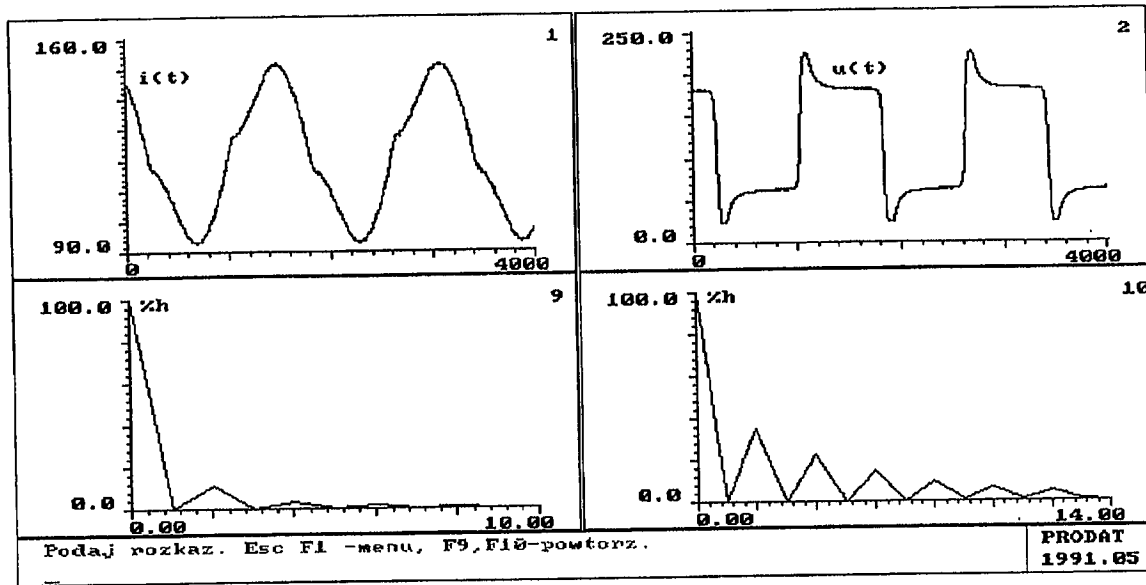


Fig. 6. The harmonic content in the investigated signals of voltage and current .

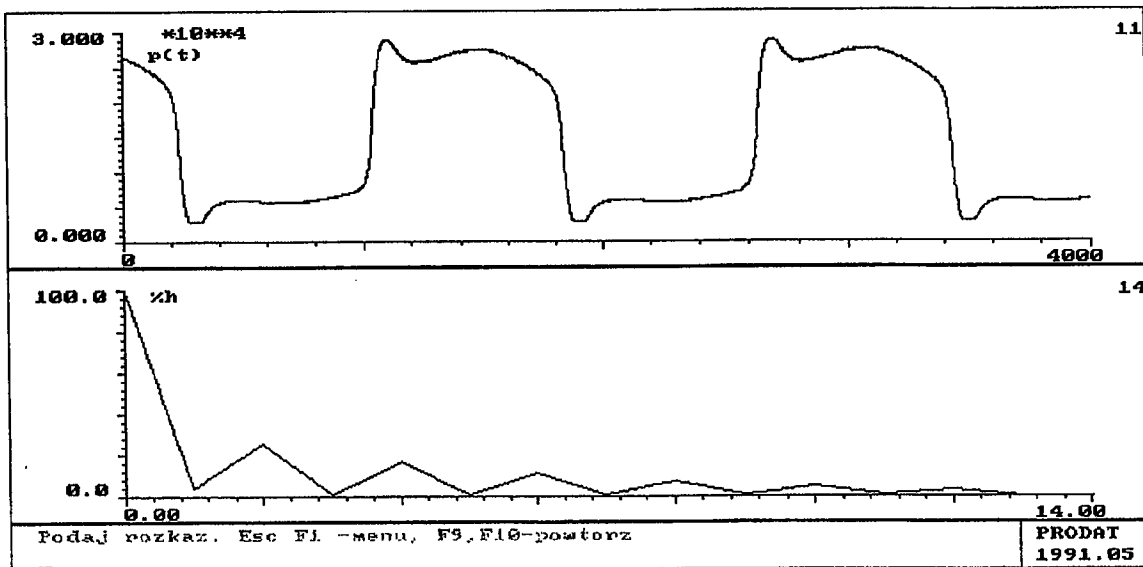


Fig.7. The harmonic content in the instantaneous power of lamp .

IV. CONCLUSION

The presented computer measurement system of deformed courses in discharge lamp circuits is a very useful, universal tool in laboratory research of lighting equipment. It enables a detailed quantitative and qualitative analysis of circuit parameters in different conditions, which provides a basis for the analysis of physical phenomena taking place in discharge lamps.

Visuelle Führung im Bereich von Arbeitsstellen kürzerer Dauer im nächtlichen Straßenverkehr

Freiding, Achim, Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Hochschule Darmstadt

1 Einleitung

Im Straßenverkehr müssen für geringe bautechnische oder pflegerische Maßnahmen kurzzeitig einzelne Fahrstreifen für den Verkehr gesperrt werden. Diese Arbeitsstellen sind Hindernisse für den fließenden Verkehr und speziell bei Nacht bergen sie ein erhebliches Gefahrenpotential für Verkehrsteilnehmer und Arbeitspersonal.

Die lichttechnische Ausrüstung einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer ist eingeschränkt, da diese in der Regel nur für wenige Stunden aufgebaut ist. Die Gestaltung der Arbeitsstelle ist aus Zeit- und Kostengründen an festgelegten Mindestanforderungen ausgerichtet.

Bei den meisten Arbeitsstellen kürzerer Dauer werden ein oder zwei Fahrstreifen gesperrt. Der Kraftfahrzeugfahrer hat in dieser Verkehrssituation einen Fahrstreifenwechsel vorzunehmen. Ein frühzeitiges Erkennen der Arbeitsstelle selbst und der Linienführung tragen daher entscheidend zu der Verkehrssicherheit bei.

Der Überleitungsbereich der Arbeitsstelle stellt eine wichtige visuelle Informationsquelle für den Kraftfahrzeugfahrer dar. Aus diesem Grunde soll der Überleitungsbereich auf seine visuellen Führungseigenschaften hin untersucht werden.

Hierzu wurde mit Hilfe des Softwarepaketes „3D-Studio“ eine Computersimulation erstellt, die das Zufahren auf eine Arbeitsstelle simuliert. Diese wurde so angepaßt, daß sie der realen Verkehrssituation und den Leuchtdichteverhältnissen entspricht.

2 Simulation durch ein 3D-Modell

Die Gestaltung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer ist in standardisierten Regelplänen den *Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen* (RSA) [5] festgelegt.

Die den Untersuchungen zugrundeliegenden computersimulierten Szenarien behandeln die Gestaltung des Überleitungsbereichs, der zwischen der freien Strecke und dem eigentlichen Arbeitsstellenbereich liegt.

Als Simulationsgrundlage dient eine dreistreifige Autobahn mit einer Fahrstreifenbreite von 4 m. Die Bestimmung der Beobachterposition und Perspektive erfolgt aus der Sicht des Kraftfahrers. Die Definition einer virtuellen Kamera gibt die Beobachterposition eines Kraftfahrers in der Computersimulation wieder. Die virtuelle Kamera wurde auf dem mittleren Fahrstreifen in 1,14 m Höhe und in einer Entfernung von 1,5 m von der linken Fahrbahnmarkierung aus positioniert. Durch die Kameraparameter der virtuellen Kamera, Kameraperspektive und Kameraposition läßt sich der beobachtbare Bildausschnitt und somit der Sehwinkel wählen.

Bedingt durch den Versuchsaufbau beträgt der vertikale Beobachtungswinkel für den Monitor 5°. Die Festlegung des Beobachtungswinkels der virtuellen Kamera auf 5° garantierte einen einheitlichen Sehwinkel für Testpersonen und virtuelle Kamera. Diese wurde in einer Entfernung von 1000 m vor der Absperrtafel positioniert. Um eine Fahrt auf die Absperrtafel hin zu simulieren, ist eine Bildfolge definiert worden, in der sich die virtuelle Kamera jeweils schrittweise um 2,5 m auf die Absperrtafel zubewegt. Die Darbietung der Testszenarien erfolgte in einer Auflösung von 1280×1024 Pixel auf einem 20-Zoll Monitor.

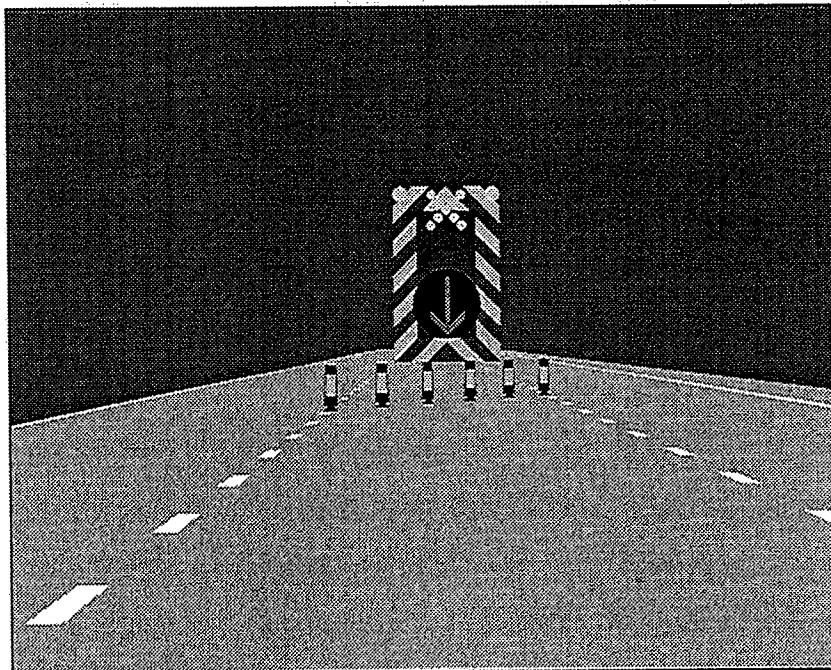


Abbildung 2.1: Ansicht einer simulierten Arbeitsstelle aus 200 m Entfernung

Die für die Untersuchungen benötigten Objekte, wie Leitkegel, Baken und Absperrtafel, wurden maßstabsgetreu als Basismodelle im Rechner nachgebildet. Mit Hilfe dieser

Basismodelle wurden die zu untersuchenden Szenarien aufgebaut und nach einer Zuordnung der Materialeigenschaften berechnet.

Die in den Untersuchungen simulierte Fahrgeschwindigkeit betrug 90 km/h.

3 Untersuchungsmethodik

Mit Hilfe der Untersuchungen sollte die optimale Gestaltung der Überleitung ermittelt werden. Die verwendeten Untersuchungsparameter waren: Anzahl der Überleitobjekte, Aufstellungsgeometrie, Gestaltung oder Musterung und Leuchtdichte des Reflexstoffes.

3.1 Versuchsaufbau

Abbildung 3.1 zeigt schematisch die Versuchsanordnung, die aus einem Monitor und einem Bereich zwischen Monitor und Beobachterposition, dem Vorfeld, bestand.

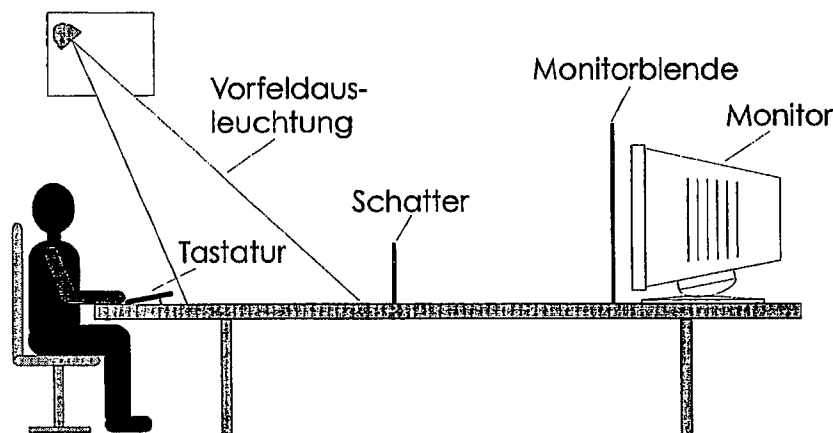


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Der Maßstab des Versuchsaufbaus betrug 1:10. Die Beobachterposition befand sich 3 m von dem Monitor entfernt, auf dem die Darbietung der Testszenarien erfolgte. Dies entspricht in der Realität also einer Entfernung von 30 m. Vor dem Monitor war eine Blende aufgestellt, die den Beobachtungswinkel auf $\pm 2,5^\circ$ vertikal und $\pm 4^\circ$ horizontal für den Monitor beschränkte. Diese Beobachtungswinkel entsprechen denen der virtuellen Kamera in den Simulationen. Der Hintergrund der dargebotenen Szenarien wurde so gewählt, daß sich eine Umfeldleuchtdichte von $L_U \cong 0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ergab, dies entsprach der niedrigsten Leuchtdichte, die auf dem Monitor in der gewählten Einstellung erreicht werden konnte.

Die Untersuchungen wurden im Labor durchgeführt, und sollten die nächtliche Ver-

kehrssituation so gut wie möglich wiedergeben. Die Vorfeldausleuchtung der Kraftfahrzeugscheinwerfer wurde für das simulierte Testpersonenfahrzeug durch eine Halogenglühlampe realisiert, die oberhalb der Versuchsebene angebracht war. Es war notwendig, die Halogenglühlampe abzuschatten, um einen definierten Vorfeldausleuchtungsbereich zu erhalten und Streulicht zu vermeiden. Die Realisierung der Vorfeldausleuchtung erfolgte mit einer Leuchtdichte von $L_v = 0,5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ in einer entsprechenden Entfernung von 10 m bis 20 m vor dem Kraftfahrer.

Mit Hilfe einer Computertastatur, die sich vor der Testperson befand, konnte die Simulation gesteuert werden. Ein schwarzes Tuch, das die Tastatur abdeckte, sorgte dafür, daß das Adaptationsniveau ausschließlich durch das definiert beleuchtete Vorfeld und die Monitorleuchtdichte festlegt war.

3.2 Versuchsdurchführung

Alle Versuchsreihen wurden mit fünf Testpersonen durchgeführt. Zur Eingewöhnung absolvierten die Probanden nach fünfzehnminütiger Adaptation an die Leuchtdichteverhältnisse eine Testreihe. Die Darbietung der zu untersuchenden Szenarien erfolgte in jeder Testreihe mehrmals.

3.2.1 Erkennbarkeitsentfernung

Die Testpersonen erhielten die Aufgabe, anhand der Gestaltung der Überleitung während der Annäherung zu erkennen, ob sie nach links oder rechts geleitet wurden. Wenn die Testperson die Richtungsweisung erkannt hatte, mußte sie eine Taste der Computertastatur betätigen, um den Simulationsablauf zu unterbrechen. Anhand der abgespielten Bilder ließ sich die zurückgelegte Strecke und somit die Entfernung zu der Absperrtafel errechnen. Nach der Einführung der Testpersonen begann in einer Entfernung von 1000 m vor der Absperrtafel (Anfangsposition der virtuellen Kamera) der Testdurchlauf.

3.2.2 Leuchtdichtebewertung

Den Testpersonen wurde für die Bewertung der dargebotenen Leuchtdichten der verwendeten Überleitobjekte nur ein Bild dargeboten. In diesem Bild war die virtuelle Kamera in einer Entfernung von 300 m vor der Absperrtafel positioniert. Die Überleitung wurde mit sechs Überleitobjekten gestaltet. Die Probanden hatten die

Aufgabe, die dargebotenen Leuchtdichten zu beurteilen. Dazu wurde folgende Bewertungsskala zugrundegelegt:

1	2	3	4	5	6	7	8	9
zu dunkel		dunkel		optimal		hell		zu hell

Tabelle 3.1: Bewertungsskala

3.3 Untersuchungsparameter

In den durchgeführten Testreihen wurde u. a. die Gestaltung und Anordnung der Überleitobjekte untersucht. Die visuellen Führungseigenschaften sind abhängig von der Anzahl der Überleitobjekte, Aufstellungsgeometrie, Leuchtdichte, Farbe und Gestaltung der Überleitobjekte.

Bei den ersten Untersuchungsparametern, Aufstellungsgeometrie und Anzahl der Überleitobjekte, wurde die Leuchtdichte des Sichtzeichenreflexstoffes für eine Entfernung von 400 m auf $L=1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ festgelegt.

3.3.1 Aufstellungsgeometrie

Die Regelpläne der RSA [5] enthalten keine Vorgabe über die Aufstellungsgeometrie von Überleitobjekten, es wird jedoch ein maximaler Objektabstand von 10 m empfohlen.

Die Aufstellungsgeometrie wird durch das Verhältnis $x:y$ beschrieben. Der x -Wert gibt den Seitenabstand und der y -Wert den Tiefenabstand wieder. Ein Verhältnis von 1:10 weist demzufolge bei einem Seitenabstand von 1 m einen Tiefenabstand von 10 m auf.

Für die Testreihen wurde die Überleitung mit 6 Sichtzeichen ausgestattet, deren weißer Reflexstoff eine Leuchtdichte von $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ besaß. Die untersuchten Aufstellungsgeometrien betragen: 1:5, 1:10, 1:15 und 1:20.

3.3.2 Anzahl der Überleitobjekte

Die Gestaltung der Überleitung erfolgte mit 3, 6 und 9 Sichtzeichen mit weißem Reflexstoff, die in einer Geometrie von 1:10 aufgestellt waren.

3.3.3 Leuchtdichte und Farbe

Für das visuelle Wahrnehmen ist die Leuchtdichte und die Farbgebung der Überleitobjekte von Bedeutung. Aus diesem Grund wurde deren Einfluß auf die Erkennbarkeitsentfernung untersucht.

Die Untersuchungen beinhalteten keine Schwellenuntersuchungen: Alle dargebotenen Leuchtdichten lagen im überschwelligen Bereich. Für die Testreihen bestand die Überleitung aus 6 Sichtzeichen in einer Aufstellungsgeometrie von 1:10.

Für die Leuchtdichteuntersuchungen wurde zusätzlich die Farbvalenz (weiß und gelb) des Reflexstoffes variiert.

Aufgrund der logarithmischen Empfindlichkeit des Auges sind die dargebotenen Leuchtdichten wie folgt logarithmisch gestuft worden: $L=0,5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, $L=1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, $L=2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, $L=5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ und $L=10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

3.3.4 Gestaltung

Die Gestaltung der Überleitobjekte sollte Aufschluß darüber geben, ob eine Richtungsinformation auf den verwendeten Objekten zu einer Vergrößerung der Erkennbarkeitse Entfernung führte.

Als Standard wurde erneut das Sichtzeichen mit weißem Reflexstoff verwendet. Die Gestaltung der Überleitung erfolgte mit 6 Überleitobjekten in einer Aufstellungsgeometrie von 1:10. Die Leuchtdichte des weißen Reflexstoffes betrug $L=5,0 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, die des roten $L=0,66 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

Die folgende Abbildung zeigt die für die Testreihen verwendeten marktüblichen Überleitobjekte mit annähernd gleicher Größe der Reflexstoffflächen.





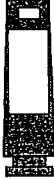
				
Leitkegel	50 %- Bake	Pfeilbake rot-weiß	Pfeilbake weiß-rot	Sichtzeichen
50×30×5	50×12,5	50×12,5	50×12,5	35×17

Tabelle 3.2: Gestaltung der Überleitobjekte und Maße (Höhe × Breite) der Reflexstoffflächen in cm (Abbildung nicht maßstabsgetreu).

Bereits vorliegende Untersuchungen [1] haben gezeigt, daß 1 m hohe Baken für den Kraftfahrzeugfahrer nicht überschaubar sind und somit anhand ihrer geometrischen Anordnung nur bedingt eine Richtungsinformation weitergeben können. Außerdem ver-

schwimmen die Konturen der Überleitobjekte mit denen der Absperrtafel bei einer großen Beobachtungsentfernung, was sich ebenfalls negativ auf die Erkennbarkeit auswirkt.

Die Reduzierung der Breite und Höhe der normalen Bake [6] um die Hälfte sollte diese Ergebnisse berücksichtigen. Auf diese Weise entstand die sogenannte 50%-Bake, wie sie in *Tabelle 3.2* wiedergegeben ist. Das Sichtzeichen als unifarbene Element war als Alternative zu den Leitkegeln und den Baken gedacht.

4 Ergebnis

Mit den Ergebnissen aus den vorangegangenen Untersuchungen wurde eine Überleitung mit sechs Objekten in einer Aufstellungsgeometrie von 1:10 gestaltet und die Leuchtdichte der Objekte in logarithmischen Stufen variiert. Die Ausstattung der Objekte erfolgte sowohl mit einem weißen als auch mit einem gelben Reflexstoff.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für den weißen Reflexstoff dargestellt.

In *Abbildung 4.1* sind die Ergebnisse in einem Wahrscheinlichkeitsdiagramm über der Erkennbarkeitsentfernung dargestellt.

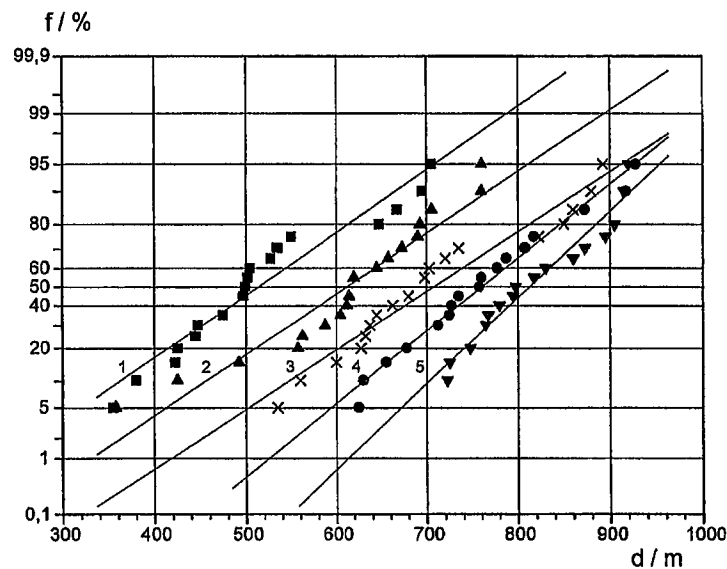


Abbildung 4.1: Erkennbarkeitsentfernung d/m aufgetragen im Wahrscheinlichkeitsdiagramm für die Leuchtdichten

- 1) $L=0,5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 2) $L=1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 3) $L=2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 4) $L=5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$
 5) $L=10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$

Die Ausgleichsgeraden für die Leuchtdichten $L=0,5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, $L=1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ und $L=2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ verlaufen parallel und sind mit zunehmender Leuchtdichte zu höheren Erkennbarkeitsentfernungen hin verschoben. Die Geraden für die Leuchtdichten $L=5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ und $L=10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ verlaufen nicht exakt parallel zueinander und zu den anderen Geraden. Diese nicht exakte Parallelität ist durch die geringere Streuung der Testergebnisse für diese Leuchtdichten zu erklären. Für die Leuchtdichten von $0,5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ und $2 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ sind die Testergebnisse deutlich in zwei Klassen aufgeteilt. Eine Klasse, in der die Überleitung früher und eine, in der sie später erkannt wurde. Prinzipiell ist zu erkennen, daß eine Erhöhung der Leuchtdichte auch eine Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung bewirkt. Bei einer Erkennbarkeitswahrscheinlichkeit von 95 % verursacht eine gleichmäßige logarithmische Stufung der Leuchtdichte von $L=0,5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ auf $L=5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ eine Zunahme der Erkennbarkeitsentfernung um jeweils ca. 90 m. Die weitere Erhöhung der Leuchtdichte von $L=5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ auf $L=10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ bedingt nur noch eine Zunahme der Erkennbarkeitsentfernung von 78 m. Allgemein ist davon auszugehen, daß eine weitere Erhöhung der Leuchtdichte eine weitere Zunahme der Erkennbarkeitsentfernung bewirkt, der Betrag der Zunahme aber abnehmen wird. Dieses Phänomen, das sich in der durchgeführten Untersuchung abzeichnet, entspricht einem Sättigungsverhalten der Erkennbarkeitsentfernung für ansteigende Leuchtdichten.

Wahrscheinlichkeit $p / \%$	Leuchtdichte $L / \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$				
	0,5	1	2	5	10
50	515 m	614 m	708 m	761 m	813 m
95	321 m	414 m	503 m	596 m	672 m

Tabelle 4.1: Erkennbarkeitsentfernung d / m in Abhängigkeit der Leuchtdichte für die Erkennbarkeitswahrscheinlichkeiten $p=50 \%$ und $p=95 \%$

Die Ergebnisse der nachfolgenden Bewertungsuntersuchung sind in *Abbildung 4.2* dargestellt. Auf der Ordinate sind die Bewertungsstufen von 1 bis 9 (siehe *Tabelle 3.1*) und auf der Abszisse die logarithmisch gestuften Leuchtdichten aufgetragen.

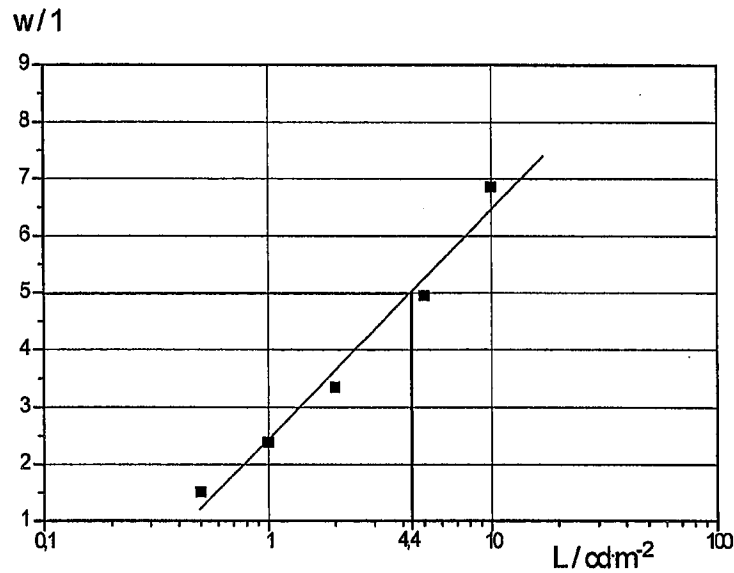


Abbildung 4.2: Optimale Leuchtdichte; weißer Reflexstoff

Dargestellt sind die mittleren Bewertungsstufen der dargebotenen Leuchtdichten über alle Probanden.

Hieraus ergab sich die mittlere optimale Leuchtdichte von $4,4 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

Aus der Forderung der optimalen Leuchtdichte von $4,4 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ergibt sich ein spezifischer Rückstrahlwert von $700 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ unter Standardgeometrie und der Annahme, daß die Beleuchtungsstärke von üblichen Scheinwerfern in einer Entfernung von 400 m vor dem Kraftfahrzeug $6,25 \text{ mlx}$ beträgt. Dieser spezifische Rückstrahlwert von $700 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ ist mit den heute zur Verfügung stehenden retroreflektierenden Materialien, unter bestimmten geometrischen Voraussetzungen, erreichbar.

5 Literaturverzeichnis

- [1] AULBACH, J.: Lichttechnische Gestaltung von Arbeitsstellen
Forschungsbericht FE-Nr. 03.213 G 89 F, Im Auftrag des
Bundesministers für Verkehr, Darmstadt: Januar 1992

- [2] AULBACH, J.: Lichttechnische Gestaltung von Arbeitsstellen Teil 2 Praxiserprobung
Forschungsbericht FE-Nr. 03.241 G 91 F, Im Auftrag des
Bundesministers für Verkehr, Darmstadt: März 1994

- [3] AULBACH, J.: Ermittlung optimaler Farben und Formen zur Verbesserung von
Leiteinrichtungen, insbesondere bei Dunkelheit
Forschungsbericht FP-Nr. 9.8909, Im Auftrag der Bundesanstalt für
Straßenwesen, Darmstadt: Januar 1992

- [4] Bleymüller, J., Gehlert, G., Gülicher, H.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler
München: Verlag Franz Vahlen, 7. Auflage 1991

- [5] BUNDESMINISTER FÜR VERKEHR: Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an
Straßen (RSA), Verkehrsblatt-Verlag 1995

- [6] BUNDESMINISTER FÜR VERKEHR: Technische Lieferbedingungen für Absperrbaken,
TL-Baken 87 Ausgabe 1987

- [7] DAMASKY, J.: Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-
Scheinwerfer, Darmstädter Dissertation D17 1995

- [8] HAV: Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen
Bonn: Kirschbaum Verlag, 9. Auflage 1992

- [9] SACHS, L.: Angewandte Statistik
Springer Verlag, 5. Auflage 1978

- [10] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: Grundlagen der Lichttechnik. Skriptum zur Vorlesung.
Darmstadt: Fachgebiet Lichttechnik der THD, 1996

- [11] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: Ausgewählte Kapitel der Lichttechnik. Skriptum zur
Vorlesung. Darmstadt: Fachgebiet Lichttechnik der THD, 1996

Untersuchungen zur Optimierung eines Kraftfahrzeugscheinwerfers bei eingeschränkter Sichtweite (Nebelsituation)

Stefan Dietz, Fachgebiet Lichttechnik der TH Darmstadt

1 Einleitung

Nebel stellt für den Kraftfahrer eine nicht unerhebliche Beeinträchtigung der Fahr-sicherheit dar. Aufgrund der Streuung des Lichts werden die zur Orientierung notwendigen Kontraste herabgesetzt, und Objekte werden erst später erkannt.

Im nächtlichen Straßenverkehr wird dieser Effekt durch zwei weitere verstärkt. Zum einen wird das Scheinwerferlicht im Nebel von dem zu beleuchtenden Objekt weggestreut, zum anderen an den Nebeltröpfchen in das Fahrerauge reflektiert. Die somit erzeugte Nebelleuchtdichte führt zu einer Anhebung des Adaptationsniveaus des Fahrers oder sogar zur Blendung.

Eine Scheinwerferlichtstärkeverteilung, die sich für die Nebelsituation besonders eignet, minimiert die Blendung und sorgt trotzdem für eine ausreichende Ausleuchtung des Verkehrsraumes. So wird eine größtmögliche Sichtweite erreicht, die eine optimale Orientierung ermöglicht und somit die Fahrsicherheit vergrößert.

Um verschiedene Scheinwerfer im Hinblick auf ihre Eignung in Nebelsituationen miteinander vergleichen zu können, müssen Versuche unter reproduzierbaren Bedingungen stattfinden. Natürlicher Nebel ist jedoch nicht konstant genug, um eine ausreichende Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Aus diesem Grund muß der Nebel nachgebildet und die Erkennbarkeit des Straßenraumes im Nebel miteinander verglichen werden.

Es muß ein Versuchsstand konstruiert werden, der die Streuleuchtdichten im Nebel berechnet und dem Fahrer in der Realsituation ins Gesichtsfeld einblendet, so daß es zu einer Überlagerung der Streuleuchtdichten mit der Realsituation kommt. Um auch für diese eine realistische Wiedergabe zu erreichen, müssen zusätzlich die Scheinwerfer des Versuchsfahrzeuges so an die Dämpfung im Nebel angepaßt werden, daß Fahrbahnleuchtdichten erzielt werden, die der Nebelsituation entsprechen.

2 Nebelbeschreibung und -berechnung

2.1 Effekte im Nebel

Im Nebel treten verschiedene Effekte auf, die zum Teil gegenläufig sind:

- zum einen die Schwächung aufgrund der Trübung der Atmosphäre,
- zum anderen die Streuung, die zu einer Aufhellung des Gesichtsfeldes führt.

Diese Effekte können unabhängig voneinander beschrieben werden.

2.1.1 Schwächung

Aufgrund der trüben Atmosphäre wird das Lichtes geschwächt. Der auf einem Weg dx gestreute bzw. absorbierte Lichtstrom $d\Phi$ ist mit μ proportional zu dem eintretenden Lichtstrom Φ_0 und der Dicke dx . Es gilt also die Differentialgleichung

$$-d\Phi = \mu \cdot \Phi_0 \cdot dx \quad (2.1)$$

Da der Nebel hinreichend homogen ist, kann diese DGL durch das Integral

$$\int_0^r \frac{d\Phi}{\Phi_0} = -\mu \int_0^r dx \quad (2.2)$$

und somit der Nebel durch das Lambert-Bouguer'sche Gesetz

$$\Phi_r = \Phi_0 \cdot e^{-\mu r} \quad (2.3)$$

beschrieben werden. Diese Schwächung tritt sowohl auf dem Weg von den Scheinwerfern zum Objekt als auch auf dem Weg vom Objekt zum Fahrerauge auf, das Licht hat also etwa die doppelte Entfernung zurückzulegen. Dies führt zur Herabsetzung der Leuchtdichte L_{Nebel} eines Objektes gegenüber der Leuchtdichte L_{klar} bei klarer Sicht. Vereinfacht gilt deshalb:

$$\frac{L_{\text{Nebel}}}{L_{\text{klar}}} = e^{-2\mu x} \quad (2.4)$$

2.1.2 Streuung

Im Gegensatz zur Schwächung läßt sich die Streuung nicht in einer Formel herleiten. Es läßt sich jedoch mit Hilfe der Mie-Theorie eine Streufunktion $f(\alpha)$ ¹ aus der Tröpfchen-größenverteilung berechnen.

¹ Die Streufunktion beschreibt das Verhältnis der Lichtstärke $I(\alpha)$ zum einfallenden Lichtstrom Φ

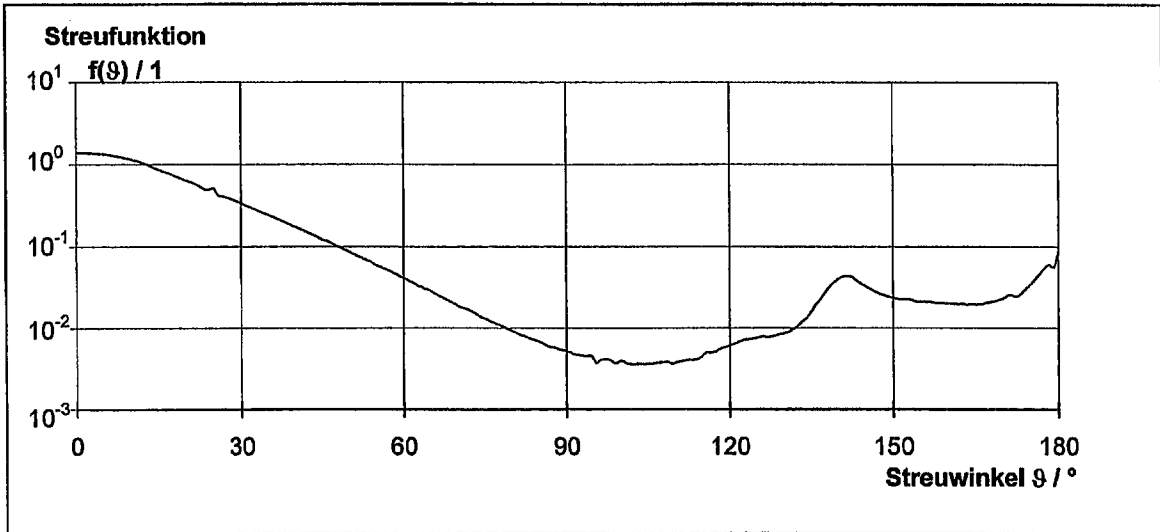


Abbildung 2.1: Streufunktion $f(\theta)$

2.2 Nebelberechnung

Die Streuleuchtdichten können in einer Simulation berechnet und auf einem Bildschirm dargestellt werden. Dabei ordnet dabei jedem Bildelement (Pixel) eindeutig eine Beobachtungsrichtung zu. Den direkten Anteil, der nur geschwächt wird, wird vom Streuteil getrennt berechnet.

2.2.1 Einfachstreuung

Der Anteil des Gesamtlichtsroms, der von einer Lichtquelle ausgehend an nur einem Nebeltröpfchen gestreut wird bevor er ins Fahrerauge gelangt, wird durch die Einfachstreuung beschrieben. Seine Berechnung erfolgt wie folgt:

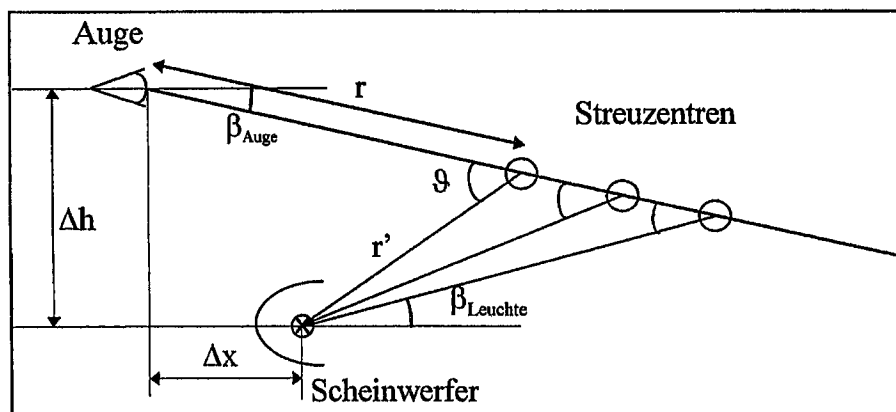


Abbildung 2.2: Einfachstreuung

Die Gesamtleuchtdichte L einer Beobachtungsrichtung $(\alpha_{\text{Auge}}, \beta_{\text{Auge}})$ berechnet sich aus dem Integral über die Einzelleuchtdichten dL der einzelnen Volumenelemente dV . Das Licht, das unter dem Winkel $(\alpha_{\text{Leuchte}}, \beta_{\text{Leuchte}})$ aus dem Scheinwerfer austritt, wird entlang der Strecke r' mit dem Sichtweitungskoeffizienten μ geschwächt, entsprechend der Streufunktion $f(\vartheta)$ reflektiert und entlang der Strecke r erneut geschwächt. Somit ergibt sich als Leuchtdichte für das einfach gestreute Licht

$$L(\alpha_{\text{Auge}}, \beta_{\text{Auge}}) = \int \frac{I(\alpha_{\text{Leuchte}}, \beta_{\text{Leuchte}})}{r'^2} \cdot \mu \cdot f(\vartheta) \cdot e^{-\mu(r+r')} dr \quad (2.5)$$

2.2.2 Mehrfachstreuung

Die Mehrfachstreuung beschreibt das Licht, das mehr als einmal gestreut wird. Die Berechnung wird hier kurz am Beispiel der Zweifachstreuung erläutert.

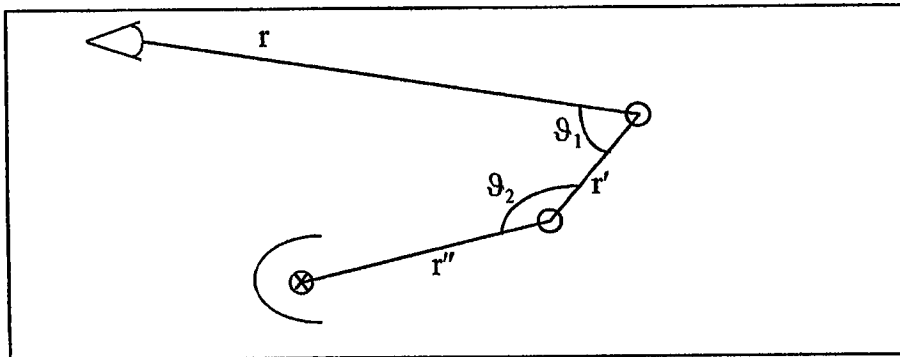


Abbildung 2.3: Zweifachstreuung

Wie bei der Einfachstreuung, so wird auch hier die Gesamtleuchtdichte durch das beschrieben. Der Ort des zweiten Streuzentrums ist dabei nicht festgelegt, es müssen alle übrigen Volumenelemente im Raum mit berücksichtigt werden.

Zur Berechnung muß also über vier Variablen integriert werden:

- wie vorher über die Entfernung r vom Auge,
- über die Entfernung r' zwischen den Streuzentren,
- über den horizontalen Anteil α_{ϑ_1} des Streuwinkels ϑ_1 und
- über den vertikalen Anteil β_{ϑ_1} des Streuwinkels ϑ_1 .

Die übrigen Größen ergeben sich wie oben aus der Geometrie. Entsprechend Formel (2.5) berechnet sich die Leuchtdichte L der Zweifachstreuung aus

$$L(\alpha_{\text{Auge}}, \beta_{\text{Auge}}) = \iiint \int \frac{I(\alpha_{\text{Leuchte}}, \beta_{\text{Leuchte}})}{r'^2 \cdot r''^2} \cdot \mu^2 \cdot f(\vartheta_1) \cdot f(\vartheta_2) \cdot e^{-\mu(r+r'+r'')} dr' da_{\vartheta_1} d\beta_{\vartheta_1} dr \quad (2.6)$$

Jede Streuung höherer Ordnung läßt sich als Einfachstreuung der nächst niedrigeren Ordnung ansehen, so kommt bei der Berechnung einer höheren Ordnung jedesmal ein Dreifachintegral hinzu. Bei höheren Streuordnungen wird der Rechenaufwand zu groß, die Berechnung muß durch ein leistungsstarkes Rechnersystem und/oder durch einen geeigneten Algorithmus unterstützt werden.

Am Fachgebiet Lichttechnik der Technische Hochschule Darmstadt erfolgt die Berechnung der Mehrfachstreuung durch die Monte-Carlo-Methode. Dies ist eine statistische Methode, bei der durch eine zufällige Wahl einer Streurichtung ein Wert innerhalb einer vorgegebenen Genauigkeit berechnet werden kann. Die Verteilungsfunktion der Streuwinkel wird dabei so angepaßt, daß sie die Streufunktion nachbildet. Dadurch ist es möglich mit akzeptablem Rechenaufwand auch Streuungen bis zur siebten Ordnung mit einzubeziehen.

3 Scheinwerfermodifikation

Scheinwerfer können entsprechend ihrer Reflektoren in drei Kategorien aufgeteilt werden, in die Paraboloid-, die Ellipsoid- und die Freiflächenreflektor-Scheinwerfer. Im folgenden werden nun die Funktionsprinzipien der drei Scheinwerfertypen erläutert.

3.1 Scheinwerferprinzipien

3.1.1 Paraboloid-Scheinwerfer

Bei einem Paraboloid-Reflektor wird ein im Brennpunkt der Parabel liegender Punkt im Unendlichen abgebildet. Wird nun eine ausgedehnte Lichtquelle, z.B. eine Glühwendel, defokussiert, so werden durch den Reflektor unterschiedlich große Bilder dieser Glühwendel erzeugt.

Die Hell-Dunkel-Grenze wird durch eine Abschattung der Wendel (H4-Glühlampe) erzeugt. Eine streuende Optik in der Streuscheibe sorgt u.a. für eine breite und gleichmäßige Ausleuchtung. Es ist daher nicht möglich, einem Winkelbereich der Lichtstärkeverteilungskurve eindeutig einen Lichtweg zuzuordnen.

3.1.2 Ellipsoid-Projektions-Scheinwerfer

Befindet sich bei einem Ellipsoid-Reflektor eine ausgedehnte Lichtquelle im ersten Brennpunkt, so werden auch hier Bilder der Lichtquelle im zweiten Brennpunkt erzeugt. Eine Linse im zweiten Brennpunkt des Ellipsoids bildet aber nicht die Wendel in den Verkehrsraum ab, sondern eine Ebene zwischen den Brennpunkten.

Die Hell-Dunkel-Grenze wird erzeugt, indem ein Schatter in der Scharfebene der Linse auf die Straße projiziert wird. Eine Streuscheibe ist nicht erforderlich. Bei einem Projektionssystem wie diesem können gezielt bestimmte Winkelbereiche durch Einbringen weiterer Schatter ausgeblendet werden.

3.1.3 Freiflächenreflektor-Scheinwerfer

Eine dritte Klasse, die der Freiflächenreflektoren, wird hier nicht berücksichtigt, da die einzige Möglichkeit zur Veränderung der Lichtstärkeverteilung eines solchen Scheinwerfers durch Verformung des Reflektors gegeben ist.

3.2 Auswahl des Scheinwerfers

Eine Realisierung für einen Scheinwerfer (z.B. Ablendscheinwerfer) sollte auf einen anderen Scheinwerfer (z.B. Nebelscheinwerfer) übertragbar sein. Die gewünschte Veränderung muß also erzeugt werden, indem an geeigneten Stellen optische Elemente angebracht werden, die das Licht durch Reflexion anders verteilen oder absorbieren. Eine Modifikation in dieser Art ist nur bei einem Ellipsoid-Scheinwerfer möglich, deshalb wurde ein Ellipsoid-Projektions-Scheinwerfer der BMW 3er-Reihe für die Versuche verwendet.

3.3 Durchgeführte Modifikationen

3.3.1 Ziel der Modifikation

Berechnet man die Beleuchtungsstärke auf der Straße je einmal für klare Sicht (Sichtweite 5000 m) und für dichten Nebel (Sichtweite 50 m) berechnet, so entspricht das Verhältnis zweier Beleuchtungsstärkewerte in gleicher Entfernung der Transmission der Atmosphäre bis zu diesem Punkt. Die Transmission des Nebels in einer der Entfernung entsprechenden Richtung muß durch ein optisches System nachgebildet werden.

Für die Transmission der Anpassung muß gelten

$$\tau(\beta) = \left(\frac{E_{Nebel}(x)}{E_{klar}(x)} \right)^2 \quad \text{mit} \quad x = \frac{h}{\tan(\beta)} \quad (3.1)$$

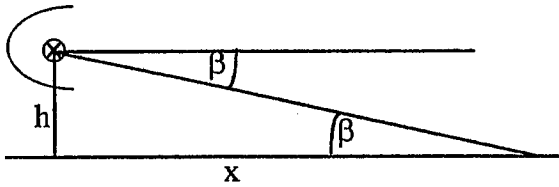


Abbildung 3.1: Anbaugesometrie der Fahrzeugbeleuchtung

Diese Formel gilt unabhängig für jeden Scheinwerfer, da nur die Effekte im Nebel berücksichtigt werden.

Der Vergleich der Beleuchtungsstärken ergibt folgende Nebeltransmission bzw. Soll-LVK:

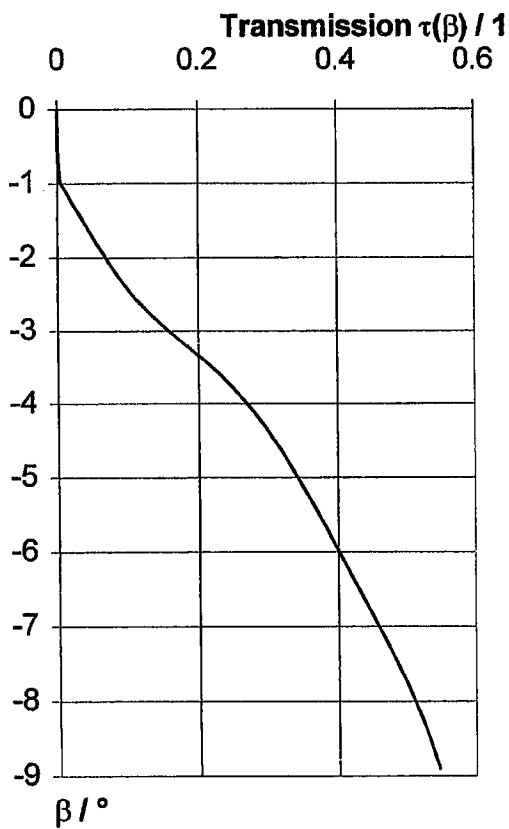


Abbildung 3.2: Transmission des Nebels $\tau(\beta)$

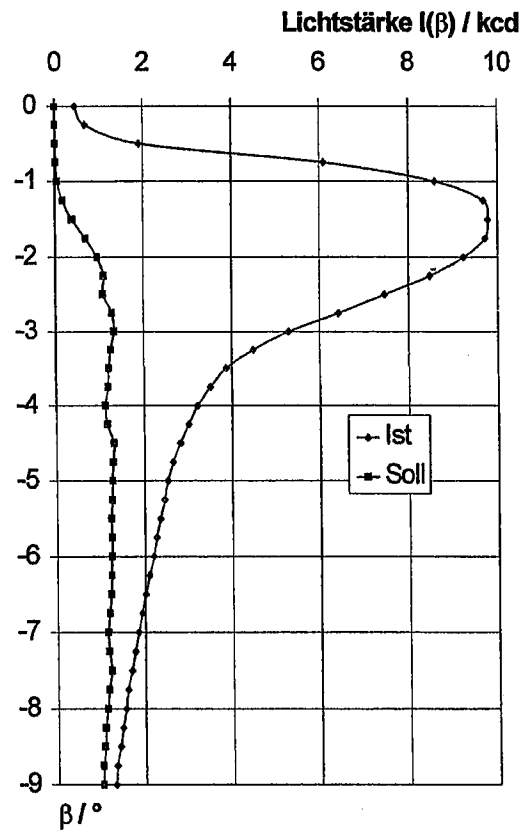


Abbildung 3.3: Lichtstärkeverteilungskurve ($\alpha = 0^\circ$)

3.3.2 Modifikationsarten

Die Modifikation der Scheinwerfer soll dadurch erfolgen, daß die Lichtstärkeverteilung durch verschiedene optische Elemente gezielt verändert wird. Dies kann auf mehrere Arten geschehen.

Die einfachste Art, die gewünschte Schwächung zu erreichen, ist ein Verlaufsfilter mit einem entsprechendem Gradienten. Das ist jedoch nicht möglich, da bei den im Scheinwerfer auftretenden Temperaturen ein Verlaufsfilter aus Acrylglas schmilzt und ein Glasfilter den thermischen Spannungsbeanspruchungen nicht standhält.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, vor der Streuscheibe durch Filter die Scheinwerferlichtstärkeverteilungskurve zu beeinflussen. Da jedoch die gesamte Streuscheibenoberfläche zur Lichtstärke einer Richtung beiträgt, ist es nicht möglich, bestimmten Bereichen auf der Streuscheibe einen Winkelbereich der LVK zuzuordnen.

Daher kann die Modifikation nur durch Einbringen von Schattern erreicht werden, die innerhalb des Scheinwerfers entsprechend positioniert werden.

3.3.3 Versuchsreihen und -ergebnisse

3.3.3.1 Zahndiagramm

Die oben gefundene Transmissionskurve wird als Zahnform in einem Aluminiumblech abgebildet. Der Transmissionsgrad ist dann aus dem Verhältnis Zahnbreite/Zahnabstand zu berechnen.

Um eine scharfe Abbildung der Zähne auf der Straße zu vermeiden, benötigt diese Modifikation ein Abbildungssystem, daß eine scharfe Abbildung in vertikaler Richtung durchführt, die horizontale Abbildung muß aber unscharf sein. Für eine derartige Abbildung wäre eine Zylinderlinse geeignet, eine solche ist aber aus Platzgründen im Scheinwerfer nicht mehr unterzubringen.

3.3.3.2 Drahtgitter

Spannt man einen Draht über einen Rahmen, so läßt sich durch eine höher werdende Wicklungsdichte ein Gradient in der Transmission nachbilden (siehe Abb. 3.7). Diese

Möglichkeit produziert aber durch Reflexion am Draht zu viel Streulicht oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze, wodurch gerade der Bereich kleiner Winkel, das heißt die großen Entfernungen, zu gut beleuchtet würde.

3.3.3.3 Schatter

Verschiedene Schatterformen haben unterschiedliche Auswirkung auf die Lichtstärkeverteilung. Im Rahmen der Untersuchung sind folgende Formen getestet worden:

1. ein Schatter, der in der Scharfebene am HotSpot liegt,
2. ein Ring, der die äußeren Bereiche der Linse abschattet, und
3. eine Abdeckung, die die obere Hälfte der Linse abdeckt,

Da der Schatter sich in der Scharfebene des Scheinwerfers befindet und somit scharf abgebildet wird, eignet er sich gut dazu, den Anstieg nachzubilden. Die anderen beiden Elemente erreichen aufgrund ihrer Unschärfe nur eine allgemeine Abschwächung des Lichtstroms.

Eine Verschiebung aus dem Scharfpunkt bewirkt, daß der Gradient an der Hell-Dunkel-Grenze flacher wird, daß damit aber auch das Streulicht oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze zunimmt. Eine weitere Verringerung der Streulichtstärken läßt sich erreichen, indem alle Schatterelemente geschwärzt werden.

Das Streulicht oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze kann durch Abkleben des Streubereichs auf der Streuscheibe auf ein Minimum reduziert werden, wobei jedoch die Ausleuchtung des Vorfeldes abnimmt hat. Diese muß durch einen zusätzlichen Scheinwerfer (z.B. Nebelscheinwerfer) realisiert werden.

4 Realisierung des Versuchstands

Das am Fachgebiet Lichttechnik vorhandene Versuchsfahrzeugs, ist mit einem Scheinwerfer-Rack ausgerüstet, auf dem verschiedene Scheinwerfer angebaut und unabhängig voneinander geregelt werden können. In einem Dachkoffer über dem Kopf des Fahrers befindet sich ein PC-Monitor, mit dem, über einen 100%-Spiegel und eine teildurchlässige Scheibe vor dem Fahrerauge, dem Fahrer Bilder in das Gesichtsfeld eingeblendet werden können (Head-Up-Display).

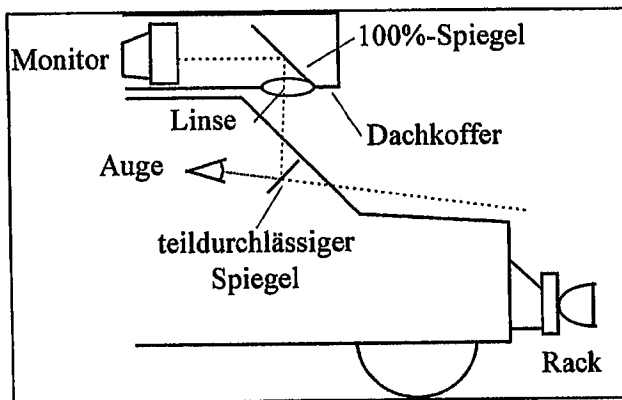


Abbildung 4.1: Versuchsfahrzeug

Durch die Linse wird das Bild so in das Gesichtsfeld eingeblendet, daß der Fahrer fernakkommodiert das Bild betrachtet. Es kommt daher zu einem realitätsnahen Fahreindruck der Fahrers.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Boehlau-Godau, M.: *Meßtechnische Erfassung und mathematische Beschreibung der optischen Eigenschaften von Nebel*, Bericht zur Diplomarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, 1993.
- [2] Bohren, C.F.; Huffman, D.R.: *Absorption and scattering of light by small particles*, Wiley-Interscience, New York, 1983.
- [3] DIN 5037 Teil 1: *Lichttechnische Bewertung von Scheinwerfern*, Deutsches Institut für Normung, 1963.
- [4] Koos, D.: *Simulation der Streuleuchtdichte von Autoscheinwerfern im Nebel aus der Sicht eines Autofahrers*, VDI-Verlag Düsseldorf, 1993.
- [5] Schmidt-Clausen, H.-J.: *Ausgewählte Kapitel der Lichttechnik*, Skriptum zur Vorlesung, Technische Hochschule Darmstadt, 1995.
- [6] Schmidt-Clausen, H.-J.: *Grundlagen der Lichttechnik*, Skriptum zur Vorlesung, Technische Hochschule Darmstadt, 1995.
- [7] Wambsgaß, H.; Damasky, J.: *Optimale Lichtverteilung für Nebelscheinwerfer*, Bericht zur Diplomarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, 1989.

Bewertung des Streulichtanteils von beschichteten Lampen beim Einsatz im Kfz-Scheinwerfer

Ingolf Sischka, Philips Automotive Lighting Aachen

Bei der Betrachtung von Lampen wird häufig der Idealfall einer einzig leuchtenden Wendel angenommen. Praktisch treten jedoch Reflektionen an der Gestellkonstruktion, an den Quetschungen und am Glaskolben auf. Reflektionen am Glaskolben können verschiedene Gründe haben, z.B. die verschiedenen Beschichtungen. Im folgenden werden die Einflüsse von Lampenbeschichtungen auf das Scheinwerferbündel untersucht.

1 Einleitung

Die Eigenschaften eines Scheinwerferbündels unterscheiden sich, je nach Beschichtung der verwendeten Lampe. Ursache dafür kann sein, daß das Licht an der Oberfläche der Beschichtung gestreut wird. Das gestreute Licht würde die Umgebungsleuchtdichte (Leuchtdichte des beschichteten Glaskolbens) erhöhen und zu höheren Blendwerten im Scheinwerferbündel führen.

Beschichtungen kann man verwenden

- ◆ für eine veränderte Lichtfarbe,
- ◆ um infrarote Strahlung zu reflektieren,
- ◆ für Antireflex-Effekte.

Im Bereich Automotive Lighting werden seit einigen Jahren Interferenzfilter angewendet, um Verschiebungen in der Lichtfarbe der Lampen zu erreichen: für „selective yellow“ mit Interferenzfilter (Philips Gold) und für „white with slightly yellow“ (Philips Allweather). Mit speziell ausgelegten Interferenzbeschichtungen kann man auch einen Teil der nicht-sichtbaren infraroten Strahlung auf die Glühwendel zurückreflektieren. Die Wendeltemperatur wird erhöht und mehr Strahlung emittiert. Dadurch kann der Lichtstrom erhöht oder die Leistungsaufnahme verringert werden (= höhere Effizienz).

Antireflexschichten dienen der Erhöhung des Transmissionsgrades des Glaskolbens.

Im Applikationslabor des PHILIPS Glühlampenwerkes Aachen wurde versucht, anhand des gesamten Lichtstromes, der von einem Kfz-Scheinwerfer in das Blendungsgebiet (Zone III nach ECE R20) abgegeben wird, einen Rückschluß auf das praktische Streuverhalten von beschichteten Autolampen zu ziehen. Die Eignung eines Streulichtfaktors zur Beschreibung wird ebenfalls untersucht.

2 Vorbetrachtungen

Für eine eindeutige Schlußfolgerung bei komplexen Zusammenhängen wird vorausgesetzt, daß man (bis auf die zu untersuchende) alle variablen Einflußgrößen konstant gestaltet. Dazu verhilft hier eine genaue Betrachtung der verwendeten Lampen hinsichtlich Fotometrie und Geometrie.

Auch Geometrieabweichungen einer Lampe haben Auswirkungen auf das Scheinwerferbündel. Da es extrem aufwendig und daher nicht praktikabel (und nichtzuletzt vom Meßequipment abhängig) ist, Lampen auf dem Nulltoleranzniveau zu bauen, wurden für die Untersuchungen im Scheinwerferbündel Lampen mit vergleichbaren Geometriemaßen ausgewählt. Die maximale Abweichung relevanter geometrischer Maße beträgt ein Drittel der nach ECE R37 zulässigen Toleranz. Bei derart geringen Geometriefehlern kann die Schärfe und Gestalt der Hell-Dunkel-Grenze HDG nur geringfügig verändert werden. Diese Einflüsse bleiben auf das Übergangsgebiet zwischen HDG und Blendungsgrenze beschränkt. Von einer meßbaren Erhöhung der Lichtstärken im Blendungsgebiet wird nicht ausgegangen.

Außerdem wurden alle Lampen fotometriert. Sämtliche Messungen fanden bei eingestelltem gleichen Lampenlichtstrom statt. Somit lassen sich erhöhte Blendlichtstärken auf die Lichtstreuung an den Grenzflächen der Beschichtung zurückführen.

3 Durchgeführte Untersuchungen

Gemessen wurde die Leuchtdichtevertelung der Lampen. Aus der Leuchtdichte der Glühwendel und der Leuchtdichte des Glaskolbens ergibt sich ein Kontrast. Mit Hilfe dieses Kontrastes läßt sich theoretisch bestimmen, ob man mit dieser Lampe ohne Abschattungen (z.B. mit Freiformreflektoren/Complex Shape) die Anforderungen an die Schärfe der HDG eines Scheinwerferbündels nach ECE erreichen kann.

Ebenfalls wurde die Lichtstärkeverteilung des Scheinwerfers in einem hochaufgelösten Raster aufgenommen. Dabei interessiert es besonders, welche Lichtstärken im Blendungsgebiet oberhalb der HDG vorliegen. Bezieht man diesen Blendlichtstrom auf den gesamten Lichtstrom des Scheinwerfers, so soll dieses Verhältnis durch einen Streulichtfaktor SLF definiert sein.

$$\text{SLF} = \frac{\Phi_{\text{Zone_III}}}{\Phi_{\text{gesamt}}} \quad (1)$$

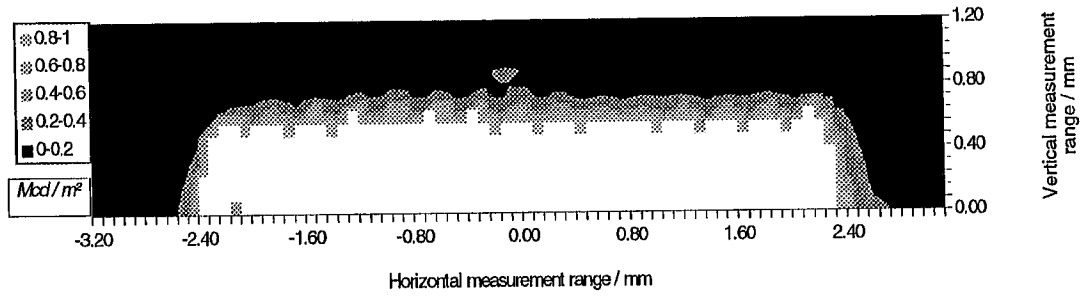


Abb. 2: Philips H1 Allweather - Leuchtdichteverteilung

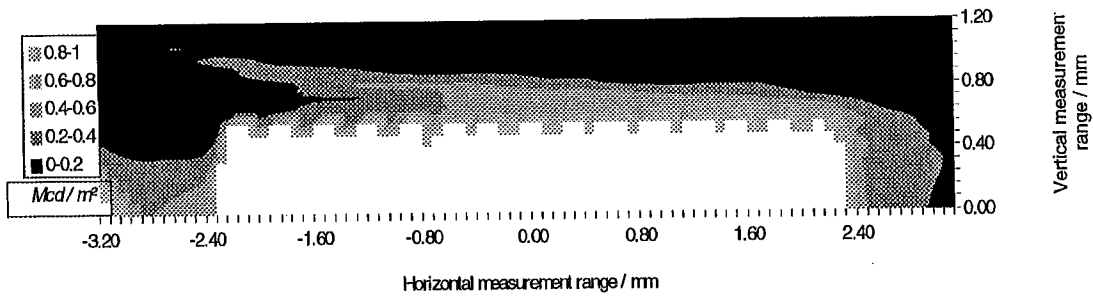


Abb. 3: Philips H1 Gold - Leuchtdichteverteilung

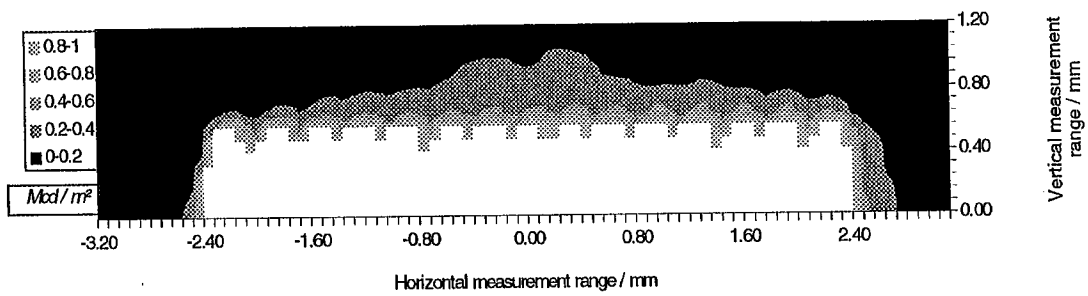


Abb. 4: H1 Versuchslampe mit Interferenzschichten - Leuchtdichteverteilung

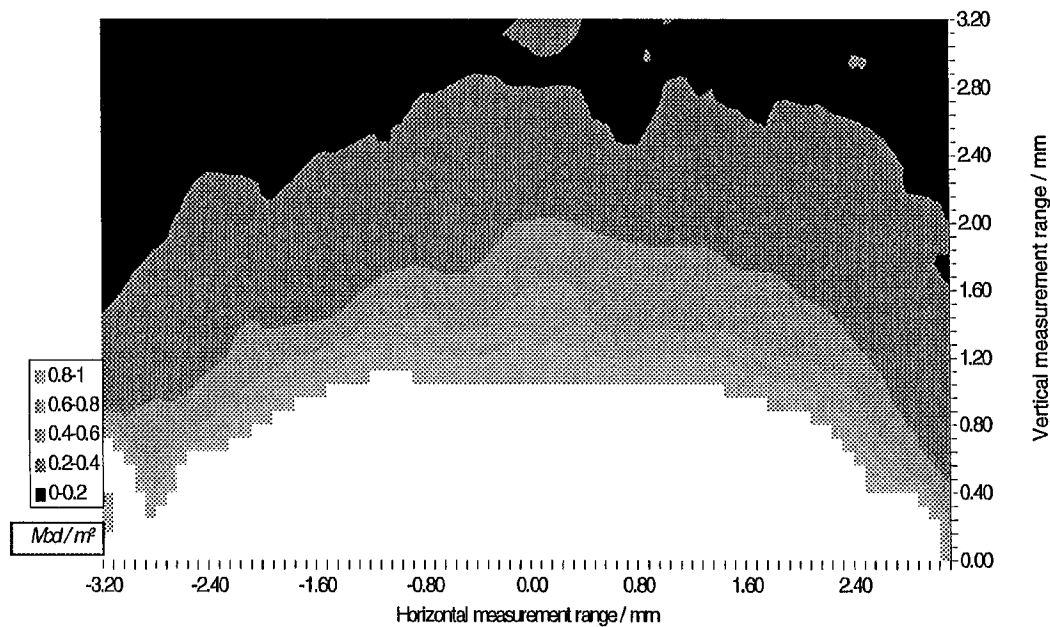


Abb. 5: HIR1 - Leuchtdichtevertelung: L_U hoch, geringer Leuchtdichtegradient

Betrachtet man die vorherrschenden Umfeldleuchtdichten, so wird offensichtlich, daß die Beschichtung einen Einfluß auf das Streulicht der Umgebung der Glühwendel hat. Die klare Beschichtung der Allweather Lampe zeigt keinen wesentlichen Unterschied in der Umgebungsleuchtdichte zur unbeschichteten H1 Spot. Im Gegensatz dazu zeigt die infrarotreflektierende Beschichtung der HIR1 Lampe deutlich sichtbare Strukturen. Entsprechend hohe Umgebungsleuchtdichten führen zu einem deutlich geringeren Kontrast K als bei den anderen untersuchten Lampen.

$$K = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (2)$$

L_O .. Objektleuchtdichte (Wendel), L_U .. Umfeldleuchtdichte (Glaskolben)

Leuchtdichten in der Wendelumgebung

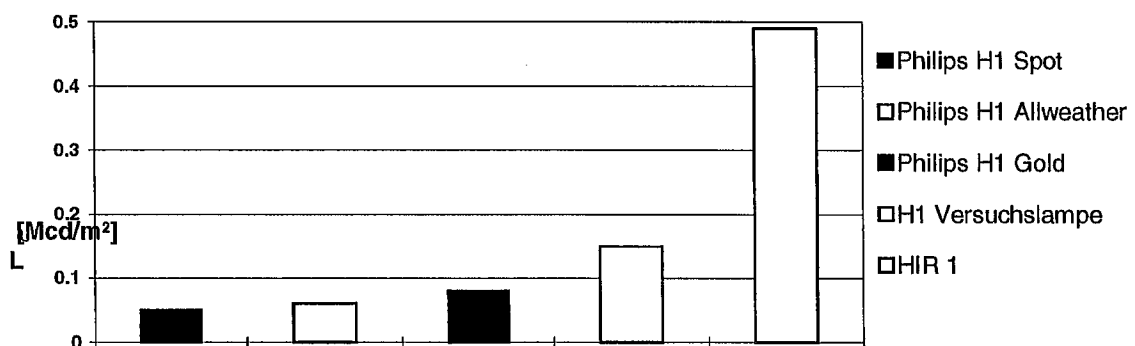


Diagramm 1: Leuchtdichten in der Wendelumgebung

Im weiteren soll untersucht werden, ob sich anhand der Leuchtdichteverteilung einer Lampe Rückschlüsse auf den Blendlichtstrom im Scheinwerfer ziehen lassen.

Betrachtet man die Kolbenleuchtdichte in einer definierten Umgebung um die Wendel, so erkennt man einen Zusammenhang zwischen Kolbenleuchtdichte und Lampenkontrast. Für etwa gleich große Objektleuchtdichten gilt: je niedriger das Leuchtdichteniveau der Wendelumgebung ist, desto höher ist der Kontrast.

Leuchtdichtekontraste

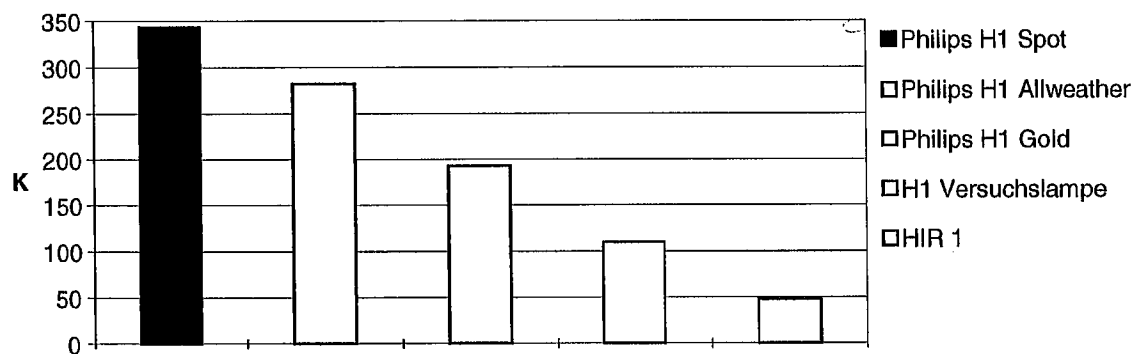


Diagramm 2: Leuchtdichtekontraste

Geht man nun davon aus, daß sich in Complex Shape Scheinwerfersystemen die Leuchtdichtekontraste abbilden, so kann man vermuten, daß diese auch einen Einfluß auf das resultierende Scheinwerferbündel haben.

Die hochaufgelösten Aufnahmen von praktischen Lichtverteilungen eines Scheinwerfers ermöglichen es gleichzeitig, die Vorschläge zur objektiven Bewertung der Scheinwerferlichtqualität [1] zu erproben.

Weitere Untersuchungen zu diesem Thema werden derzeit durchgeführt.

- [1] Hannes Bertling: Scheinwerfer-Lichtqualität objektiv bewertet.
Sonderdruck aus ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 97 (1995) Heft 3,
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart.

Development of Standard Measurement Methods for Luminous Characterization of Sea Signals

Orreveteläinen, Pasi, M.Sc. (El. Eng.), Helsinki University of Technology

Abstract

This is a short introduction to the DESMEMLUCSS-project, which purpose is to develop a method to characterize sea signals. The project is a part of the European Union's SMT (Standards, Measurements and Testing) program. The project will last for 24 months and end in October 1998. The methods used by different authorities or manufacturers are presented using two examples. Thereafter follows a description of the method we have chosen for closer inspection.

1. About the project

The main objective of the project is to develop a robust and reliable measurement procedure to characterize the luminous distribution and reach of certain sort of beacons used for maritime navigation. The necessity of the work carried out in this project comes from the unavailability of standards and recommendations, which could clarify the measurement methods that we need for the characterization. This fact implies that in a commercial catalogue the relate features of those devices depends on the 'point of view' of each manufacturer:

- * Theoretical calculations based in mean features of the used lamps and lenses.
- * Measurements done under better than real conditions.
- * Mean measurements at distance limited by the size of the laboratory.
- * Measurements made studying real conditions and their simulation in laboratory.

As can be seen, many different results can be obtained from the same sample measurements, and the comparison of these is not necessary clear. Actually there is technology enough for making accurate measurements, but it is necessary to systemize the measuring methods, with their possible variations, in order to determine clearly and objectively the luminous features of the beacons. This fact is important, not only to improve the commerce, but also to improve the safety of sea navigation. The characteristics have very specific constraints that are given in the recommendations published by the IALA (International Association of Lighthouse Authorities). [1]

2. Partners

The partners in this project are:

- * Asociacion Industrial de Optica (AIDO), Spain (co-ordinator)
- * Helsinki University of Technology (HUT), Finland
- * Service Technique de la Navigation Maritime et des Transmissions de l'Equipement (STNMTE), France
- * Istituto Giordano, Italy
- * La Maquinista Valenciana SA, Spain (manufacturer)

HUT participates as a research partner in this project. We participate in documentation research and validation of measurement methods and we collaborate in the evaluation of the results. Our specific task is the realization of the outdoor measurements.

3. Main characteristics of a sea beacon

One of the main characteristics of a sea signal is its reach. It reveals from how far it can be seen. IALA's recommendations mention that for point lights the threshold value used for leading lights is 0,2 μlx [2]. From the inverse square law

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (1)$$

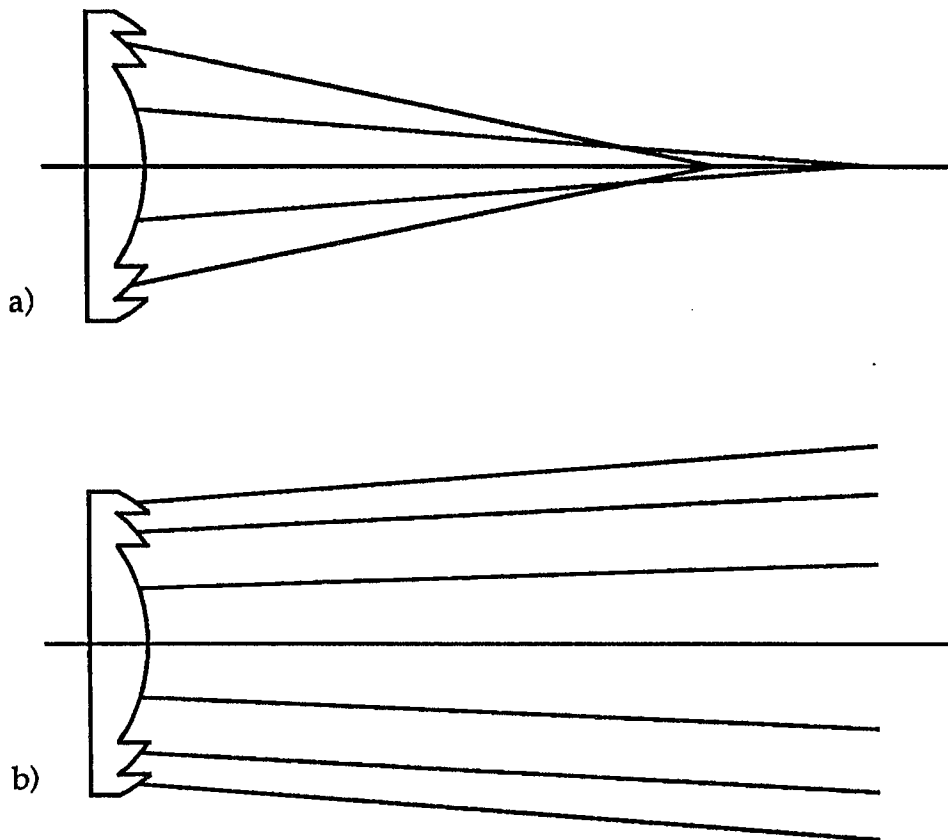
where I = luminous intensity (cd)
E = illuminance (lx)
r = distance (m)

we can see that the reach is determined by the luminous intensity of the beacon. Therefore it is important to determine this quality. The determination may cause problems if the measurements are done from a short distance. They should be made from a distance where the photometric and the inverse square law apply. For larger beacons this could mean a distance of several hundred meters. The appropriate minimum distance has been determined in various ways by different measurers. This has led to a situation where all measurers would like to use a distance of their own. More reasonable way, however, is to test if the inverse square law applies. The determination is easier for diverging lenses as can be seen in picture 1 where both diverging and converging lenses are shown. This picture also shows the danger if we use short distances: the luminous intensity appears to be high, but if we investigate the situation closer, we may notice that the luminous intensity has a peak at that particular distance. This can lead to a situation where the lenses are (unintentionally) designed for that particular distance in order to get proper values. The main reason for using too short distances is the fact that the laboratories are simply too short. It is difficult to find a tunnel long enough for these measurements and it may be far too expensive to build one just for this purpose.

Another important characteristic is the luminous distribution. For horizon beacons the horizontal intensity is constant in an ideal situation. This does not, of course, apply in actual conditions. Main reasons for this are:

- * Imperfections of the lens.
- * The fact that the lamp is not a point source.
- * The filament of the lamp is not exactly in the focal point of the lens.

Imperfections of the lens originate in the production phase. The prisms are not ideally formed and there is a moulding seam between the parts. Paradoxically all imperfections are not harmful. If every part were ideal, a directional beacon would give a very narrow beam of light. If the beacon rotates, the beam would be visible only for a extremely short period of time. This could lead to a situation where it could not be detected or identified.



Picture 1. Two types of lenses: a) converging type and b) diverging type.

4. Some measuring methods used around the world

The measuring methods are basically quite similar. Measuring distances and ranges, goniophotometers and detectors may vary but the principle is usually the same. As an example of the “main stream” measuring method, the method used by Nippon Koki Kogyo (Japan) is presented here. As a different method the U.S. Coast Guard’s “zero length photometer system” is also shortly described.

Picture 2 shows the situation of the measurement used by Nippon Koki Kogyo [3]. For the determination of the minimum measuring distance they use the following parameters: size of the lens, length of the filament and focal length. Using these parameters and empirical results they have developed a formula for the minimum measuring distance:

$$D = (5 \dots 10) \cdot f \cdot \frac{H}{h} \quad (2)$$

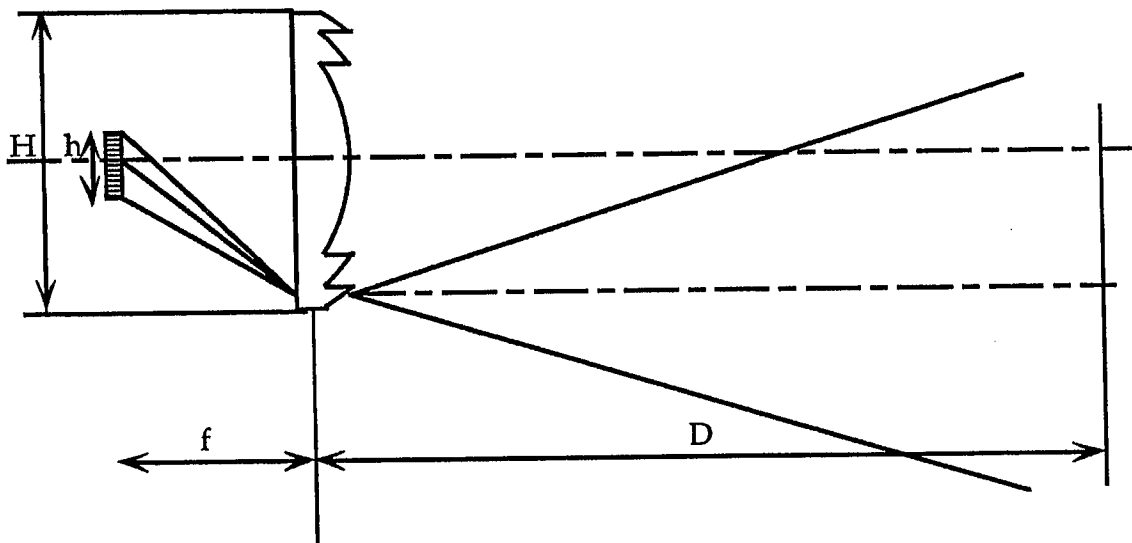
where D = minimum measuring distance (mm)
 f = focal length of the lens (mm)
 H = height of the lens (mm)
 h = length of the filament (mm)

From this equation it is possible to calculate distances for different lens sizes. Some results are shown in table 1.

Table 1. Minimum recommended measuring distances calculated from equation 2.[3]

Filament	h = 6 mm		h = 8 mm	
	assume 1/5	assume 1/10	assume 1/5	assume 1/10
200 mm H=168 mm	14 m	28 m	10.5 m	21 m
300 mm H=264 mm	33 m	66 m	24.8 m	49.5 m
375 mm H=380 mm	59.4 m	118.8 m	44.5 m	89.1 m

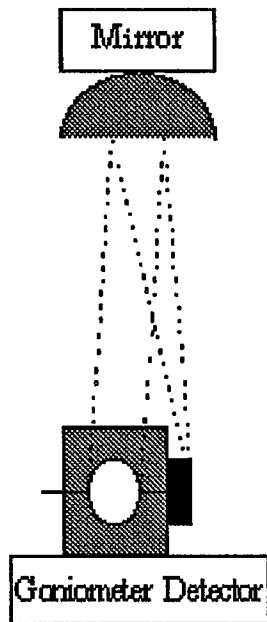
Equations used by other organizations takes in consideration the same factors but in different way or weight.



Picture 2. Parameters used to determine the minimum measuring distance. [3]

U.S. Coast Guard is developing method where the measuring distance is very short [4]. They call it the "zero length photometer system". Its special feature is a large mirror, which reflects the light from the beacon to the detector. The length of the system is 10 meters, which gives a total measuring distance of circa 20 meters. The beacon is attached to the goniophotometer as shown in picture 3. The light beam is sent towards the mirror, which reflects it on the detector. The detector is attached on the other side of the goniophotometer system. A baffle is set between the beacon and the detector, so the results will not be affected. This system is under development, but a short presentation of it can be found on the internet (<http://www.rdc.uscg.mil/rdcpages/current/2784/>)

2784.html). Reducing the measurement length to a fraction of the present methods has a great advantage as the length of the laboratory is often critical.



Picture 3. The zero length photometer system developed by the U.S. Coast Guard. The light from the beacon is sent towards the mirror, which reflects it to the detector.[4]

5. Method chosen for closer inspection

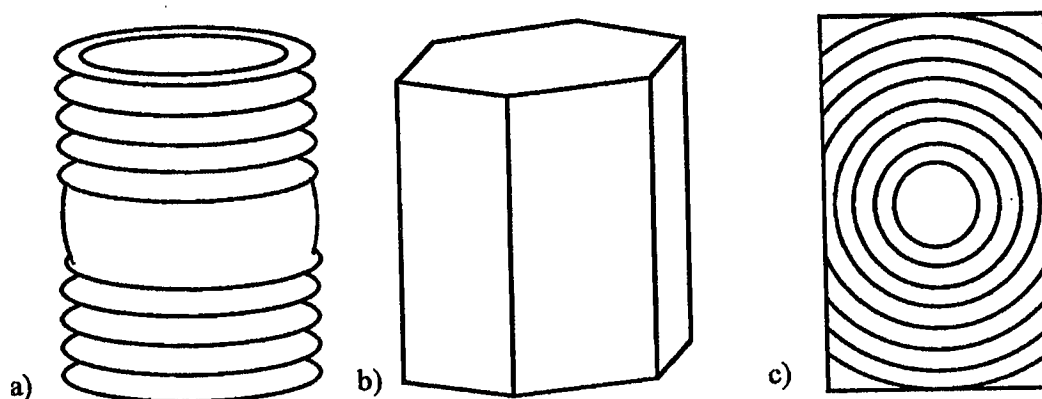
The measuring method we are going to investigate closer is a combination of those used around the world. As mentioned earlier, the measuring distance is a problematic thing to define. Therefore in this project all partners measure the same beacons from several different distances. This way we can find an approximation of the distance where the inverse square law applies and can be used as a criterion. For larger beacons this can lead to a distance of several hundred meters. Therefore one part of this project is to make outdoor measurements with long distances (up to 1 km). Each partner has facilities that allow different possibilities. We have agreed that every partner will measure from the maximum distance possible and in addition from a distance of two-thirds of the maximum. Thus the measuring distance varies from circa 16 meters up to 200 meters in the laboratory measurements. The distance in the outdoor measurements should be as long as possible. By making the outdoor measurements we can also see if the results apply in actual conditions.

5.1 Equipment

The measurements need a set of equipment. First and the most important is the detector, which can be an illuminance or a luminance meter. Also a spectroradiometer is a possible selection. The detector should be able to measure low illuminance values accurately. Second major device is the goniophotometer. In laboratory measurements the goniophotometer is used only for horizontal movement and the movement in the vertical direction is carried out with the detector. This is necessary because the beacon should be

kept in its nominal working position. This restriction can not be applied in the outdoor measurements because the vertical deviation becomes very large when the measuring distance is long. For example a 1° angle at 1000 meter distance leads to a 17,5 meter deviation and is far too large to be handled without tilting the beacon itself.

In this project we use two horizon and two directional beacons for testing (picture 4). Each beacon is provided with 12 V halogen lamps with different power ratings (20...50 W). We use the nominal lamp voltage. The lamps are positioned in a lampchanger, which contains six lamps. The lamp must be situated in the focal point of the lens and it should not deviate much from that. The reason for this is that even a very small ($< 0,5$ mm) deviation affects the luminous intensity and distribution dramatically.



Picture 4. Two lens types used in maritime beacons: a) drum lens (horizon beacon) and b) hexagonal lens (directional beacon). c) One lens panel of the directional beacon.

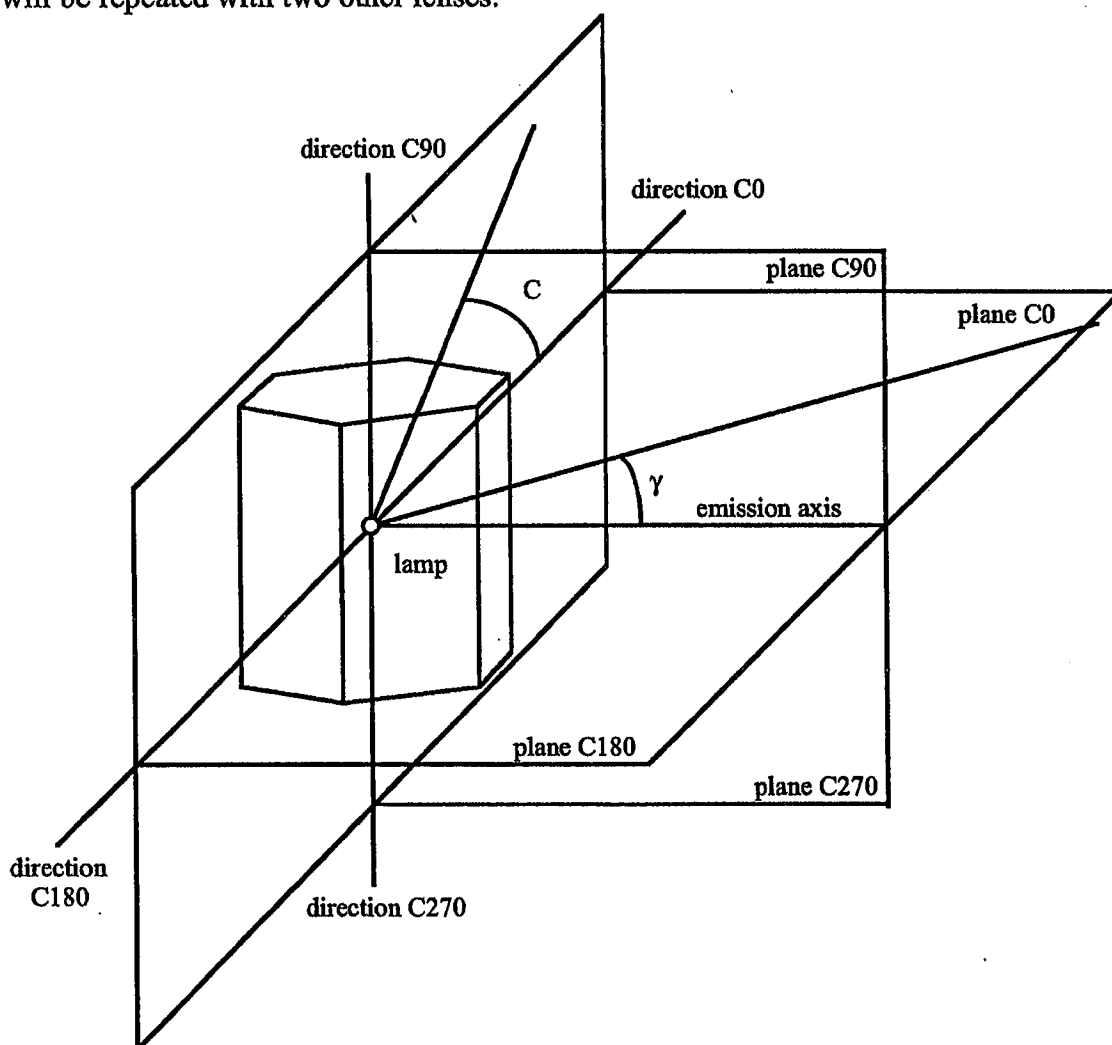
5.2 Measurement procedure

The beacon is placed in that way its centre goes through the rotating axis of the goniophotometer. As said before, the goniophotometer rotates only in the horizontal direction. The lamp and the lampchanger are located inside the beacon in that way the filament of the lamp is in the focal point of the lens or lenses. If necessary, the location of the lamp can be changed by means of adjusting screws. The lamp is positioned in that way the beacon will give its maximum luminous intensity. The lamp in the horizon beacon can be moved only in the vertical direction. In the directional beacon all directions are possible. After the beacon and the lamp have been fixed properly, the detector is positioned at the required distance and on the same level (height) than the centre of the beacon's lens. The alignment can be done with a laser.

The next phase is to find the direction of the maximum luminous intensity. Several possibilities exist and two of them are described here. For the directional beacons it is useful to have a large vertical plane (wall) which is approximately on the same distance as the detector. An illuminance meter is put on the wall and is moved manually or computer controlled on the surface of the wall. In this manner the direction of the maximum luminous intensity can be found. That direction will then be selected as the main axis. The horizon beacon rotates around its vertical axis. By measuring the

illuminance value continuously on the horizontal level the maximum intensity can be found. However, because the maximum intensity is not always clear, we need another approach in this project: we will determine one of the two seams as the main axis. The lens will give a local minimum in that direction and because the direction is thus the same to all partners the results are more comparable.

After the preliminary work the actual measurements can be done. The maximum value of the luminous intensity has already been found in the previous stage. The continue of the measurement depends on the beacon type. For the directional beacons we will measure both vertical and horizontal directions around the emission axis. The task is to continue the measurement until a value of 10% of the maximum is achieved. After this, the whole range will be shared in 21 (equally spaced if possible) angles and the measurement will be done in all those angles. This is the case in both vertical and horizontal directions. This way we can determine the luminous distribution of the beacon. Same procedure will be repeated with two other lenses.



Picture 5. Planes and directions of a beacon with six directional lenses. The emission axis is perpendicular to the lens. In this project we use the (C, γ) coordinate system, as recommended by the CIE.

The measurement of the horizon beacon is somewhat different. After the 0-direction has been defined the whole horizontal plane will be shared in to 72 parts (5° between each direction). The measurement will be done in all those directions. By doing this we can determine the general uniformity of the luminous distribution. After the horizontal plane has been measured, some vertical planes will also be measured. The number of those planes is four and the measurement is similar to the directional beacon: the purpose is to find the 10 % value etc.

In order to ensure the repeatability and reliability of the measuring method, all the measurements are repeated several times. All lenses are measured with two lamps. Also the effect of the alignment is studied by repeating it with all beacons.

6. Final phase

After the test round has completed, results will be compared and evaluated. In the test round numerous measurements are done. For the standard proposal we will study how many measurements are sufficient to characterize the properties of a maritime signal. For example: it is highly unlikely that the horizon beacon needs 72 measurements to determine the horizontal plane and its uniformity. More likely fewer measuring points are sufficient.

The last phase is to formulate the final report and standard proposal for IALA (International Association of Lighthouse Authorities) and CEN (European Committee for Standardization).

7. References

- [1] DESMEMLUCSS-project introduction
- [2] IALA, Recommendation for the Notation of Luminous Intensity and Range of Lights, 1966
- [3] Nippon Koki Kogyo Co., Ltd., Advisable Distance for Measuring the Luminous Intensity of a Lens (provided by Managing Director Naomasa Kitamura)
- [4] U.S. Coast Guard, Zero Length Photometer System (provided by Project Manager Robert Stachon)

Subjektiv gewünschte Beleuchtungsniveaus an Arbeitsplätzen mit geringen Sehanforderungen

Völker, S. (Ilmenau)

Einleitung

Seit vielen Jahrzehnten beschäftigen sich Lichttechniker mit der Frage eines optimalen Beleuchtungsniveaus. Im "Handbuch für Beleuchtung" (Ausgabe 1995) /1/ findet man, daß für ein optimales Beleuchtungsniveau am Arbeitsplatz etwas 2000 lx gewünscht werden. Entstanden sind diese 2000 lx 1970 durch die Auswertung verschiedener Literaturstellen durch Fischer /2/. Neuere Untersuchungen (siehe unten) bestätigen, aber wiederlegen diese Forderung auch. Der folgende Artikel beschäftigt sich daher mit der Fragestellung, was beeinflußt die subjektive Einstellung an Industriearbeitsplätzen und welche Beleuchtungsniveaus werden an Arbeitsplätzen mit geringen Sehanforderungen gewünscht.

Rückblick

Nach der genannten Literaturlauswertung von Fischer /2/ folgte eine umfangreiche Bearbeitung dieses Themenkomplexes durch Lindner /3/. 1985 stellte er eine Untersuchung mit Schülern vor, bei der ein Beleuchtungsniveau von 750 lx gewünscht wurde /4/. Dieser Wert lag deutlich über den in der DIN 5035 Teil 2 geforderten Werten für Klassenräume, zugleich aber auch signifikant unter den von Fischer als optimal ermittelten Werten. Ein Jahr später folgten weitere Untersuchungen durch Lindner mit normalsichtigen und sehschwachen Versuchspersonen /5/. Auch hierbei ergaben sich deutlich geringere Beleuchtungsniveaus. Während normalsichtige jüngere Versuchspersonen um die 1000 lx je nach Lichtfarbe wählten, bevorzugten ältere Versuchspersonen zwischen 400 lx und 600 lx. Sehschwache Versuchspersonen mit Glaukom wählten zwischen 500 lx und 700 lx, Versuchspersonen mit Katarakt zwischen 500 lx und 1000 lx je nach Lichtfarbe.

1989 veröffentlichte Schmidt-Clausen eine Untersuchung bei der zwischen 700 lx und 1000 lx für eine elektrotechnische Firma angegeben wurden /6/. Für ein zahntechnisches Labor lag das Optimum dagegen bei 3000 lx (ohne zusätzliche Einzelplatzbeleuchtung). Dieser hohe Wert entspringt einerseits der Tatsache, daß es sich bei der auszuführenden Tätigkeit um ein hohen Schwierigkeitsgrad handelt, andererseits die Laborassistenten an Tageslicht in einem solchen Raum gewöhnt sind. Ein hohes Adaptationsniveau führt zwangsläufig zu sehr hohen gewünschten Beleuchtungsstärken, was nachfolgende Ausführungen noch zeigen werden.

Halonen /7/ bestätigte die Ergebnisse von Lindner in ihrem 1995 veröffentlichten Report für normalsichtige ältere Beobachter. Das gewünschte Beleuchtungsniveau lag bei ihren Untersuchungen zwischen 230 lx und 1000 lx, wobei der Mittelwert 510 lx betrug.

Für Büroarbeitsplätze gibt Tenner /8/ 1996 in einer Studie 800 lx als gewünschtes Beleuchtungsniveau an, welches ohne Tageslicht eingestellt wurde. Kommen Tageslicht und Einzelplatzbeleuchtung hinzu, liegen die ermittelten Optimalwerte zwischen 1500 lx und 2000 lx.

Versuchsmethodik

Zur Klärung der Fragestellung, welche Beleuchtungsniveaus werden an Industriearbeitsplätzen mit geringen Sehansforderungen gewünscht, wurden sowohl Labor- als auch Feldversuche durchgeführt. Da es im Feldversuch nicht möglich war, Beleuchtungsniveaus stufenlos auf der Arbeitsfläche einzustellen, um so ein Optimum für die Versuchsperson zu finden, sollen in erste Linie die Laborversuche hier dargestellt und ausgewertet werden. Die bei den Feldversuchen erhaltenen Ergebnisse mittels Fragebogen unterstützen die zuvor gemachten Aussagen.

Versuchsraum

Die Laborversuche fanden in einem Versuchsraum der Größe $5 \times 3,5$ m statt. Die Raumhöhe betrug 3 m. Der Reflexionsgrad der Wände betrug 40 % der der Decke 90 %, der des Bodens 30 %. Die Feldversuche wurden an 87 typischen Industriearbeitsplätzen insbesondere der Metall- und Elektroindustrie durchgeführt.

Beleuchtungsanlage

Die Beleuchtung im Labor wurde mittels einer leuchtenden Decke realisiert. Die leuchtende Decke bestand aus sechs Lichtleisten. Diese waren mit Leuchtstofflampen bestückt. Unter den Lichtleisten befand sich eine abgehangene 10 mm dicke Zwischendecke aus Schaumpolystyrolplatten. Damit konnte eine gute diffuse Beleuchtung realisiert werden. Der Gleichmäßigkeitsgrad g_{1E} ($= E_{\min}/E_{\text{mittel}} = 410 \text{ lx}/600 \text{ lx}$) betrug 0,68 und g_{2E} ($= E_{\min}/E_{\max} = 410 \text{ lx}/740 \text{ lx}$) 0,55. Die Leuchtstofflampen ließen sich an einem Schaltpult mittels elektronischen Vorschaltgeräten dimmen, so daß in der Nutzebene (0,75 m über dem Fußboden) Beleuchtungsstärken von 30 lx bis 600 lx realisiert werden konnten. Die Lichtfarbe betrug etwa 3500 K und änderte sich bei Veränderung des Beleuchtungsniveaus um weniger als 70 K ($< 2 \%$).

Die Beleuchtung bei den Feldversuchen wurde mittels zusätzlicher Industriebandleuchten realisiert, welche über den Arbeitsplätzen montiert wurden.

Versuchspersonen

Die Laboruntersuchungen unterteilten sich in Laborkurzzeituntersuchungen ($5 \times 2\frac{1}{2}$ Stunden) und Laborlangzeituntersuchungen (15×8 Stunden). An den Laborkurzzeituntersuchungen nahmen 50 Versuchspersonen teil, an den Laborlangzeitversuchen 12 Versuchspersonen. Bei den Feldversuchen wurden 87 Versuchspersonen mehrfach befragt. Sowohl bei den Labor- als auch bei den Feldversuchen war der Anteil der männlichen und weiblichen Versuchspersonen etwa gleich groß. Auch die Altersverteilung entsprach in etwa der der arbeitenden Bevölkerung.

Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Optimale Helligkeit

Zur Bestimmung der optimalen Beleuchtungsstärke wurden im Labor verschiedene Industriearbeitsplätze simuliert, an denen nach der Aufgabenerfüllung (z.B. Kabel abisolieren, Löcher bohren usw.) das gewünschte Beleuchtungsniveau für derartige Tätigkeiten einzustellen war. Zum Zeitpunkt des Einstellens betrug die Adaptationszeit bei den Kurzzeitversuchen zwei Stunden und bei den Langzeitversuchen 7 Stunden.

In Tabelle 1 sind die Mittelwerte der gewünschten Beleuchtungsstärken für leichte bis

mittelschwere Schaufgaben für den Kurzzeit- und den Langzeitlaborversuch dargestellt. Die Konfidenzintervalle für 95 % statistische Sicherheit sind eingetragen.

Versuchsgruppe	Adaptationsbeleuchtungsstärke			
	30 lx	100 lx	200 lx	600 lx
2½ - Stunden - Versuch	431,3 lx ± 65 lx	452,7 lx ± 61 lx	512,2 lx ± 55 lx	k.NV Median: 800 lx
8 - Stunden - Versuch	-	371,6 lx ± 49,4 lx	493,3 lx ± 52,2 lx	529,1 lx ± 49,7 lx

Tabelle 1: Mittelwert der gewünschten Helligkeitsniveaus von den Laborkurzzeit- und den Laborlangzeitversuchen mit 95%-tigen Konfidenzintervall (k.NV .. keine Normalverteilung, deshalb Angabe des Medianes)

Probleme bereitete die statistische Verteilung des 600 lx - Niveaus im Kurzzeitversuch. Die Ursache ist in der Stelleinrichtung der Beleuchtungsanlage zu suchen. 600 lx war bereits die obere Grenze. Wer ein höheres Niveau einstellen wollte, konnte dies nur verbal mitteilen. Erfolgte dies, wurden willkürlich 800 lx als gewünschtes Beleuchtungsniveau eingetragen. Im Langzeitversuch hatte diese Einschränkung jedoch keine Auswirkung auf die statistische Verteilung.

Adaptationsniveau als wichtigste Einflußgröße

Man sieht sehr deutlich, daß das gewünschte Helligkeitsniveau vom Adaptationsniveau abhängig ist. Auch wenn dies bekannt ist, so wird doch immer wieder in Veröffentlichungen auf dessen Angabe verzichtet. Für das Adaptationsniveau ist neben der Tageszeit auch die Bewölkung des Himmels entscheidend, wie vorliegende Untersuchungen zeigen.

Tageszeit

Im Laufe eines Tages steigt die Höhe des gewünschten Beleuchtungsniveau deutlich an. Beginnt die Arbeit um 7.00 Uhr, liegt das gewünschte Beleuchtungsniveau etwa 20 % unter dem Beleuchtungsniveau, welches zu einer späteren Tageszeit als optimal empfunden wird.

Bewölkung

Während sich der Unterschied zwischen klarem Himmel und teilweise bewölktem Himmel kaum auf das gewünschte Beleuchtungsniveau auswirkt, liegen die gewünschten Helligkeitswerte bei vollständig bedecktem Himmel deutlich darunter. Ein automatisches Nachregeln des Beleuchtungsniveaus auf einen konstanten Wert kann demnach nicht gewünscht sein. Die Psyche des Menschen stellt sich auf die äußeren Einflüsse ein.

Individuelle Einflußfaktoren auf das gewünschte Beleuchtungsniveau

1. Alter

Das Alter ist eines der bekanntesten aber auch umstrittensten Faktoren, welcher sich auf das gewünschte Helligkeitniveau auswirkt. Bei den vorliegenden Untersuchungen wünschen sich ältere Menschen ein niedrigeres Beleuchtungsniveau als Jüngere. Diese Aussage steht in Übereinstimmung mit Lindner, Riemenschneider und Levitt, jedoch entgegen den Untersuchungen von Bodmann und Nordlichter.

2. Augenfehler

Versuchspersonen ohne Augenfehler stellten durchweg ein höheres Beleuchtungsniveau ein, als Versuchspersonen mit Augenfehler. Von den Versuchspersonen mit Augenfehlern stellen weitsichtige Versuchspersonen ein niedrigeres Beleuchtungsniveau ein als

kurzsichtige Versuchspersonen. Letzteres konnte jedoch nicht statistisch gesichert werden.

3. Augenkorrektur

Auch eine Augenkorrektur wirkte sich auf die Höhe des gewünschten Beleuchtungsniveaus aus. Versuchspersonen mit einer Augenkorrektur forderten deutlich niedrigere Beleuchtungsniveaus unabhängig vom Alter, wie Versuchspersonen ohne Augenkorrektur.

4. Nahvisus

Versuchspersonen mit einem Visus größer gleich eins bevorzugen ein höheres Beleuchtungsniveau als Versuchspersonen mit einem Visus unter eins. Da sich nachweislich die Kontrastempfindlichkeit mit höherem Beleuchtungsniveau verbessern läßt, wäre eher ein höherer Lichtbedarf der Sehschwächeren zu erwarten.

5. Geschlecht

Frauen sind bei geringen Beleuchtungsniveaus genügsamer (insbesondere Frauen unter 30 Jahre). Bei Beleuchtungsniveau um die 600 lx war kein Unterschied im gewünschten Beleuchtungsniveau zwischen den Geschlechtern mehr feststellbar.

6. lichttechnische Kenntnisse

Bekanntermaßen wirken sich lichttechnische Kenntnisse deutlich auf das gewünschte Beleuchtungsniveau aus. Es zeigt sich auch bei der vorliegenden Untersuchung, daß ausgebildete Lichttechniker höhere Beleuchtungsniveaus fordern als nicht ausgebildete.

Arbeitsplatz als Einflußfaktor

Für Industriearbeitsplätze ergibt sich, daß die gewünschten Beleuchtungsniveaus nur geringfügig variieren. Allgemein zeigt sich, daß ein höherer Schwierigkeitsgrad auch einen höheren Lichtbedarf aufweist. Dies gilt insbesondere für Beleuchtungsniveaus unter 500 lx.

Schlußfolgerungen

1. Für das gewünschte Beleuchtungsniveau ist das Adaptationsniveau entscheidend. Es wird bestimmt durch die vorhandene künstliche Beleuchtung und den Tageslichteinfluß, welcher von der Fenstergröße, der Tageszeit und dem Bewölkungsgrad abhängig ist. Versuchsaufbauten mit großen Fenstern, die zur Ermittlung eines gewünschten Beleuchtungsniveaus dienen sollen, müssen zwangsläufig zu deutlich höheren Beleuchtungsniveaus führen. Rückschlüsse, die künstliche Beleuchtung nach solchen Versuchsaufbauten zu dimensionieren sind unzulässig.
2. Ältere Versuchspersonen, kurzsichtige oder weitsichtige Versuchspersonen, Versuchspersonen mit Augenkorrektur und Versuchspersonen mit geringem Nahvisus wünschten geringere Beleuchtungsniveaus als jüngere bzw. in der gleichen Altersklasse normalsichtige Versuchspersonen. Dies steht im Widerspruch zu der Tatsache, daß nachweislich die Kontrastempfindlichkeit bei höheren Beleuchtungsniveaus bei älteren bzw. nicht normalsichtigen Versuchspersonen deutlich besser ist. Man darf demzufolge Beleuchtungsniveaus nicht ausschließlich mit rein subjektiven Methoden festlegen. Wie bereits Lindner in /3/ feststellte, darf die Sehleistung bei der Festlegung von Beleuchtungsniveau nicht außer Acht gelassen werden.
3. Lichttechnische Kenntnisse der Versuchspersonen führen zu höheren gewünschten Beleuchtungsniveaus. Entsprechende Versuche sollten daher nicht mit lichttechnisch Ausgebildeten gemacht werden.
4. Für die reine Sehleistung sind bei einfachen Arbeiten häufig 200 lx ausreichend. Garantiert man für Industriearbeitsplätze 500 lx, so ist das Wohlbefindlichkeitskriterium

bereits voll erfüllt. Forderungen von 2000 lx künstlicher Beleuchtung sind überzogen und nach vorliegender Untersuchung auch nicht gerechtfertigt. Wie Van Bergem-Jansen /9/ bereits feststellte, ist für höhere Ansprüche eine arbeitsplatzbezogene Beleuchtung unter Beachtung der anderen Gütemerkmale weit effizienter, als ein extrem hohes Allgemeinbeleuchtungsniveau.

Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, daß die Höhe des gewünschten Beleuchtungsniveaus sowohl vom Adaptationsniveau, als auch von individuellen Einflußfaktoren abhängig ist. Die Art des Arbeitsplatzes für das gewünschte Beleuchtungsniveau spielt bei Arbeitsplätzen mit mittleren und leichten Sehaufgaben eine eher untergeordnete Rolle.

Regelstrecken, die das Beleuchtungsniveaus unabhängig vom Tageslicht konstant halten, können nach den hier vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht empfohlen werden. Da ältere Personen häufig ein niedrigeres Beleuchtungsniveau bevorzugen, wird sich das Optimum für Industriearbeitsplätze zwischen 500 lx und 1000 lx bewegen.

Das die rein subjektive Wahl eines Beleuchtungsniveaus jedoch seine Grenzen hat, zeigt die Tatsache, daß trotz zunehmender Kontrastempfindlichkeit bei höheren Beleuchtungsniveaus von bestimmten Personengruppen kein höheres Beleuchtungsniveau gewünscht wird. Die Sehleistung darf also keinesfalls außer Acht gelassen werden. Nur mit einer komplexen Betrachtung aller Verfahren, wie sie von Gall/Völker /10/ veröffentlicht wurde, lassen sich Beleuchtungsniveaus fundiert festlegen.

Literatur

- /1/ "Handbuch für Beleuchtung", Herausgeber: SLG, LiTG, LTAG, NSVV), Verlag ecomed 5. Auflage, 1992, S. II-1.2,5
- /2/ Fischer, D.; "Optimale Beleuchtungsniveaus in Arbeitsräumen." Lichttechn. 22 (1970) 2; S.61/63; 3, S. 103-105
- /3/ Lindner, H.; "Beleuchtungsstärke und Arbeitsleistung - Systematik experimenteller Grundlagen" Zts.f.d.gesamte Hygiene und ihre Grenzgebiete, 21.Jhg., Heft 2, Febr.1975, S.143A-146A
- /4/ Lindner, H.: "Untersuchungen zum Helligkeitsbedarf von Schülern", Zts. Augenoptik, 102 (1985) 5, S. 130ff
- /5/ Lindner, H.; Palm, K.; Schlote H.-W.: "Subjektive Helligkeitsempfindung bei verschiedenen ophthalmologischen Krankheitsbildern", Folia ophthalmol. 11 (1986) S. 341-353
- /6/ Schmidt-Clausen, H.-J.; Finsterer, H.: "Beleuchtung eines Arbeitsplatzes mit erhöhten Anforderungen im Bereich der Elektronik und Feinmechanik", Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb 593, Dortmund 1989
- /7/ Halonen, L.; Eloholma, M.; Lehtovaara, J.: "Lighting Control and Dimensioning in Integrated Daylight Systems", Report 19 (Draft), Otaniemi 1995, Helsinki University of Technology
- /8/ Tenner, A.; Begemann, T.; Van den Beld, G.: "Tageslicht, künstliche Beleuchtung und Menschen: Die gewünschten Beleuchtungsstärken bei getrennter Tisch und Wandbeleuchtung." Vortrag Licht'96 Leipzig, Tagungsband S.482
- /9/ Van Bergem-Jansen, P.M.: "Sehleistung oder Sehkomfort als Kriterium für das Lichtniveau am Arbeitsplatz?", Vortrag Licht'90, Rotterdam, Tagungsband S. 94ff
- /10/ Gall, D.; Völker, S.; Eberhard, S.; Wolf, S.; Helm, P.: "Nutzen einer besseren Beleuchtung", Abschlußbericht, TU Ilmenau 1996, AiF-Nr. 9955B

Mit dem Begriff „OP-2000“ soll hier kein fester Zeitpunkt verstanden werden, zu dem die Beleuchtungstechnik in Operationsräumen betrachtet werden soll. Vielmehr soll der Begriff als Schlagwort, vertretend für den Begriff „Zukunfts-Operationsraum“, verstanden werden. Er soll zeigen, daß Beleuchtungsanlagen in Operationsräumen im Laufe der nächsten Jahre mehr Beleuchtungssituationen als bisher ermöglichen müssen.

Der Einsatz „neuer“ Operationsmethoden, z.B. der mikroskopischen, endoskopischen oder minimal-invasiven Chirurgie, bei denen der Operationsort über kleine, „schlüssellochartige“ Manipulationsöffnungen erreicht und über Okulare oder Monitore betrachtet wird, erfordert unterschiedlichste Beleuchtungsniveaus. Um die Dimension dieser neuen Methoden zu verdeutlichen, können sie auch mit dem „Tapezieren eines Raumes durch ein Schlüsselloch“ verglichen werden.

Dabei erlangt die Umfeld- und Allgemeinbeleuchtung stärkere Bedeutung. Um neben den „herkömmlichen“ Operationen auch Operationen mit „neuen“ Manipulationsinstrumenten durchzuführen, bei denen die Sicht auf den Operationsort häufig nur indirekt über den Monitor erfolgt, kann der tatsächliche Informationsgehalt des Bildes vom Operationsort durch Störleuchtdichten, die durch die Allgemein- und Umfeldbeleuchtung verursacht werden können, verfälscht werden. Bei variabel nutzbaren Operationsräumen ist daher eine Steuerung der Allgemein- und Umfeldbeleuchtungsanlage von 100 % bis zu unter 1 % zukünftig unverzichtbar.

Bei der Steuerung kann es jedoch zu Schwierigkeiten mit in Operationsräumen eingesetzten Infrarotsteuerungen kommen. In Arbeitskreisen zur „ENV 50185-1, Infra-red free air application“ (Europäische Vornorm) werden

zur Zeit diese Probleme, die beim Einsatz von Leuchten mit elektronischen Vorschaltgeräten in Operationsräumen auftreten können, behandelt und eine Beispielliste mit Anwendungen, die mögliche Infrarot-Störpotentiale darstellen, erstellt. Diskussionsstand Ende 1996 war, daß Beleuchtungseinrichtungen keine Infrarot-Anwendungen darstellen. Daher sollen sie aus der Beispielliste gestrichen werden. Unstrittig ist jedoch, daß von ihnen Infrarot-Störungen ausgehen. Dies soll in einer geeigneten Formulierung in der Norm berücksichtigt werden. Eine in der Praxis akzeptable Lösung des Problems kann dies aber nicht sein, so daß eine Lösung noch gefunden werden muß. Zur Zeit gibt es Untersuchungen zur Infrarotverteilungen von Leuchten für die Allgemein- und Umfeldbeleuchtung, die jedoch noch nicht abgeschlossen sind. Endgültige Ergebnisse gibt es daher noch nicht. Es deutet sich jedoch an, daß bei Modulationsfrequenzen von Infrarotempfängern, die unter den Betriebsfrequenzen der „Elektronischen Vorschaltgeräte“ liegen, keine Probleme auftreten. Ansonsten verhalten sich nach Aussage der Lampenhersteller die Infrarotanteile der von den Lampen abgegebenen Strahlung proportional zur Beleuchtungsstärke, so daß es je nach Modulationsfrequenz des jeweiligen Infrarotempfängers unterschiedlichste „Störschwellen“ geben wird.

Für die Zukunft ist nach E DIN 5035-2:1996-06 (prEN 12464:1996) der schon bisher aus der DIN 5035-3 bekannte Wert für die mittlere Beleuchtungsstärke der Allgemeinbeleuchtung von 1000 lx, jedoch als Wertungswert, vorgesehen. Die bisher nach DIN 5035-3 für das Operationsumfeld anzustrebende mittlere Beleuchtungsstärke von 2000 lx ist nicht mehr aufgeführt. Werden die geplanten Forderungen nach einem Farbwiedergabeindex R_a von 90 beibehalten, wird es in Zukunft aufwendiger, mittlere Beleuchtungsstärken von 1000 lx für die Allgemeinbeleuchtung mit Leuchtstofflampen zu erreichen, da in diesem Fall nur Lampen mit der Farbwiedergabestufe 1A eingesetzt werden können, deren Lichtstrom erheblich geringer ausfällt, als der von Lampen mit der Farbwiedergabestufe

1B (Beispiel: Leuchtstofflampe L58W/840: 5200 lm; Leuchtstofflampe L58W/940: 3750 lm). Eine Lösung gegenüber heutigen Anlagen wäre danach nur durch die Erhöhung der Lampenstückzahl und damit oft auch der Leuchtenstückzahl möglich. Angesichts der angespannten Finanzsituation im Gesundheitswesen ist mit dem Einverständnis der Krankenhausträger nicht zu rechnen. Auch mit den neuen T5-Leuchtstofflampen mit 16 mm Rohrdurchmesser wird mit dem derzeitigen Stand der Technik keine Lösung möglich sein, da diese z.Z. nur eine Farbwiedergabestufe von 1B erreichen und somit $R_a = 90$ nicht einhalten. Da die Norm vermutlich nicht vor dem Jahre 2000 gültig wird, ist es durchaus möglich, daß die Lampenhersteller zu diesem Zeitpunkt auch dimmbare T5-Leuchtstofflampen mit der Farbwiedergabestufe 1A zur Verfügung stellen können.

Fraglich bleibt hier, ob es sinnvoll ist die Farbwiedergabe der Allgemeinbeleuchtung zu verbessern, während es im „IEC 601-2-41: Medical electrical equipment“ und im deutschen „AK 812.8.1 Operationsleuchten der Deutschen Elektrotechnischen Kommission“ für Operationsleuchten Bestrebungen gibt, die Strahlungsbelastung für den Patienten und das OP-Team durch Herausfiltern ab einer Wellenlänge von 650 nm zu verringern, was bei Plank'schen Strahlern zur Verringerung der Farbwiedergabestufe führt. Daher ist zu erwarten, daß es gegen den Normvorschlag E DIN 5035-2:1996-06 (prEN 12464:1996) auch von dieser Seite erhebliche Einsprüche geben wird. Entgegen dieser Bestrebung und den Meinungen aus Kreisen der Operationsleuchtenhersteller, daß es möglich sei, die spezielle Farbwiedergabe für Rot wesentlich geringer einzustufen, da gesättigtes Rot praktisch nur als Blut vorkommt und dies bei den heute relativ unblutigen Operationswunden kaum von Bedeutung sei, und damit die Möglichkeit bestehe, einen erheblichen Anteil (ca. 1/3) der Bestrahlungsstärke herauszufiltern, ist es nach Meinung vieler Operateure notwendig, während eines Operationsverlaufes Farbveränderungen des Blutes zu erkennen, um gegebenenfalls notwendige Schritte einleiten zu können. In einer Umfrage gaben alle

Operateure der besseren Farbwiedergabe aufgrund der notwendigen Diagnostik den Vorrang vor der Körpererwärmung durch den Rotanteil. Daher sollte dieser Punkt erneut diskutiert werden, um die spezielle Farbwiedergabe für Rot nur geringfügig, auf für die Mediziner noch akzeptable Werte, herabzusetzen. Auch der dann herauszufilternde Anteil der Wärmestrahlung ist noch beachtlich.

Nach E DIN 5035-2:1996-06 (prEN 12464:1996) sollen für die Operationsfeldbeleuchtung Wartungsbeleuchtungsstärken von 10000 lx bis 100000 lx erreicht werden. Diese Werte sind schon heute leicht erreichbar. Es gibt jedoch Tendenzen die Beleuchtungsstärke von Einzelleuchtenkörpern, z.B. großer Operationsleuchten, auf maximal 160000 lx zu beschränken, wobei z.Z. die Fokussierungseinstellung der Leuchten nicht berücksichtigt werden soll und der Operationsfelddurchmesser noch diskutiert wird. Da der Trend zu mehreren kleineren, flexibler handhabbaren „Satelitenleuchten“ geht, ist diese Beschränkung in einer neuen Norm überflüssig, da sie heute schon nicht mehr praxismäßig ist. Auch die Einstufungen der Operationsleuchten nach großen und kleinen Leuchten ist noch sehr umstritten. Daher ist auch bei diesem Normentwurf mit Einsprüchen zu rechnen.

Bei der großen Leistungsvielfalt medizinischer Leuchten von ca. 30000 lx bis weit über 100000 lx besteht häufig der Wunsch, auch Leuchten unterschiedlicher Leistungsstufen zu vergleichen. Da das bekannte Verfahren mit dem Schwarzfeld-Thermometer keine reproduzierbaren Messungen zuläßt, muß ein neues Verfahren erarbeitet werden. Auch in den aktuellen Normungsausschüssen (z.B. Europa IEC 601-2-41, Deutschland: AK 812.8.1) wird die Ansicht vertreten, nicht mehr nach der Temperaturerhöhung ΔT zu bewerten, sondern die, die Wärme verursachende, Bestrahlungsgröße E_e in W/m^2 zu messen und anzugeben. Aufgrund der guten Herausfilterung bzw. Sperrung des infraroten Strahlungsbereiches bei dem Stand der Technik entsprechenden Operationsleuchten, ist es entgegen einigen Forderungen,

sich auf die Bewertung des Infrarotanteils der Strahlung zu beschränken, sinnvoller, die Gesamtstrahlung zu berücksichtigen, da bei diesen Leuchten das sichtbare Licht den größten Strahlungsbereich darstellt und somit den größten Anteil an der Wärmebelastung verursacht. Um die Leistungsstufen unabhängig von ihrer Leistung zu beschreiben, ist es sinnvoll, das Verhältnis zwischen der jeweils am Operationsort auftretenden Beleuchtungsstärke E_v und Bestrahlungsstärke E_e zu bilden, um so einen Bezug zum photometrischen Strahlungsäquivalent zu erhalten. Das auch in DIN 5035-3 und DIN 5035-5 aufgeführte photometrische Strahlungsäquivalent $K = E_v / E_e$ kann maximal 683 lm/W betragen. Während beispielsweise ungefiltertes Halogenleuchtstofflampenlicht einen Wert von ca. 25 lm/W erreicht, können mit heutigen Operationsleuchten Werte weit über 200 lm/W erreicht werden. Aufgrund der Kalibrierbarkeit und Eindeutigkeit dieses Meßverfahrens, wird es sich in der Zukunft klar gegenüber der Angabe der Temperaturerhöhung durchsetzen, auch wenn die Angaben auf Basis der Gesamtstrahlung für den Anwender zunächst unverständlich und neu sind.

In der „IEC 601-2-41: Medical electrical equipment“ wurde aus Frankreich vorgeschlagen, für Operationsleuchten eine Schutzart von IP 54 festzusetzen. Aus hygienischen Gründen ist es jedoch notwendig, daß Leuchten in Operationsräumen staub- und bakteriendicht sein müssen. Bild 1 zeigt, daß der überwiegende Größenbereich von Bakterien über der kleinsten Korngröße von Talkumstaub liegt, der nach „EN 60598-1, Leuchten-Teil 1, Allgemeine Anforderungen“ für die Staubprüfung von Reinraumleuchten mit der Schutzart IP 65 verwendet werden muß, wobei Korngrößen von 1 bis 5 μm eingesetzt werden, bei mindestens 50% Gewichtsanteilen mit weniger als 5 μm . Hinzu kommt, daß Keime, Bakterien und Viren meist an Partikel (Materie) gebunden sind. Da die Größenbereiche dann deutlich über 5 μm liegen, sind Leuchten der Schutzart IP 65 praktisch bakteriendicht. Dagegen wird bei IP 54 - Leuchten ein Eindringen von Staub und damit von Bakterien nicht völlig ausgeschlossen. Zusätzlich sollte der Leuchtenkörper eine glatte,

desinfektionsmittelbeständige Oberfläche besitzen, damit er leicht zu reinigen und desinfizieren ist.

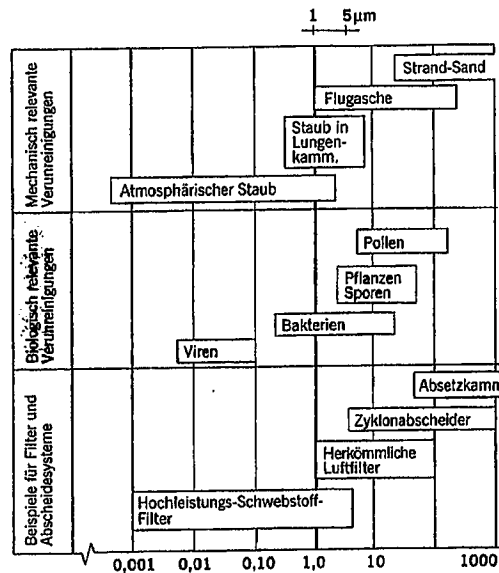


Bild 1: Vergleich der Größenbereiche lufttragender Verunreinigungen

Fazit dieser Betrachtungen ist, daß es in Deutschland trotz Absprachen teilweise noch erhebliche, auch strategische Abweichungen zwischen den einzelnen Normgruppen gibt, die schnellstmöglich beseitigt werden sollten. Da Deutschland zudem in der Forschung im Bereich der „minimal-invasiven Manipulationsinstrumente“ führend ist, sollten auch Kontakte mit den Herstellern von beleuchteten Manipulationsinstrumenten (Mikroskopie, Endoskopie usw.) und den betreffenden Normgremien gesucht werden, um einen für alle Seiten akzeptablen einheitlichen deutschen Standpunkt in der europäischen Normung zu vertreten.

DIMMING OF THE INTEGRAL LIGHTING IN PUBLIC BUILDINGS

Radeva, Lyuba, Mg. Eng., Technical University - Sofia

Summary

The paper presents the results from the assessment of the electrical power efficiency and the technical-economic expediency of implementing combined lighting in public buildings within the conditions of Bulgaria. There are used materials from the annual report for the natural illumination of the Sofia City region*, the results of which served as a basis for assessing the annual economy of electrical power with integral lighting per unit of installed lighting power. [2]**

Analysis of the Daily and the Annual Course-graph of Changing of the Natural Illumination for the Region of Sofia City and Assessment of the Expedience from the Implementation of Combined Lighting in Public Buildings:

The paper implements sample records of the daily course-graph of the seasonal natural illumination changing for mixed days within an annual plan (the minutes of coming with respect to midnight of $E_{crit}=2klx$ and $15 klx$ in the morning and in the evening) - Fig. 1.

From the diagrams where the coming of the critical external illumination $E_{crit}=2klx$ should be seen (switched of on 100% artificial illumination) and coming of the $E_{crit}=15klx$ (switched off artificial illumination), respectively for the mornings and the evenings, an assessment has been done of the potential economies of electrical power, in the course of dimming the lighting installation depending on the natural illumination. The economy of electrical power per 1 kW of installed power, assuming that the control of the natural illumination is done by level, is defined by the formula $e=\Delta/60 \cdot P_0 \cdot \Delta T \cdot k$, where:

$\Delta_t = t_{m15klx} - t_{m2klx}$ / - in the morning

$\Delta_e = t_{ev15klx} - t_{ev2klx}$ / - in the evening

$P_0=1kW$ - the calculations are done per 1kW of installed power

$\Delta T=10$ days - the calculations are done for a ten-days periods in the course of one year.

$k=0.5$ - a factor, indicating what part of the energy for illumination is saved in the case of combined lighting.

The calculations are done respectively for spring, summer, autumn and winter (Table 1).

On the basis of the calculations, done per ten-days periods (the first ten-days period starting on March 22) and seasons, has been defined the annual saved energy per 1 kW of installed power that could be achieved, in case of implementing artificial illumination (for the morning and for the evening - Table 1). The calculations are done for two tariffs (peak and daily), where the saved sum in USD per year, as a result of the

economy of electrical power, has been provided in Table 1. The price of the electrical power is in conformity with the peak tariff - 6.7 cents per kWh; and respectively with the daily tariff - 3.6 cents per kWh.

The saved electrical power has been shown by a diagram with annual transaction in the case of integral illumination per 1 kW of installed power (for the change of the natural illumination from 2 klx to 15 klx) - Fig.2. The diagram shows the financial expenses in USD (for the mornings and for the evenings), that would be saved from the economy of electrical power - Fig.3. The conclusions that could be drawn out are as follows:

1. For the regulation of the natural illumination level are interesting the mixed days in spring and in summer. At that time the amount of the electrical power that could be saved, is the great.

2. The economy from the price of the electrical power is greater in the morning, because of the coming of 2-15 klx within minutes, included into a time period, that is paid upon the peak tariff. From the diagrams of the coming of the external critical illumination of 2 klx and 15 klx could be seen, that for the morning the area between these is greater. This could be used as an explanation for the greater economy in the morning.

3. Per seasons, the greatest economy from the cost of the electrical power could be realized - in the morning for winter, and respectively in the evening for spring.

After knowing the quantity of the electrical power that could be saved in case of integral illumination (per 1 kW of installed power and for the change from 2klx to 15klx of the natural illumination), an assessment could be done about the expediency of implementing the combined lighting for a specific room with installed in an illumination control system.

In Bulgaria full capacity control systems for artificial illumination have not been installed yet, as it was with the capacity, developed by ZUMTOBEL [3]. There were installed only the following systems: LUXMATE Basic - control of the illumination with non-locking switch for the individual rooms; LUXMATE Daylight as a part of LUXMATE Professional as will. The last system has a freedom for development. The systems have been installed in banks. One bank saloon has been considered in particular (16m-8m-3.5m), wherein has been installed the LUXMATE Daylight system. The lighting technical calculations have been realized by a program for computer aided design COPHOS PC/LD of the ZUMTOBEL Company. The work with computers and the specificity of the room require standard illumination of 500 lx. The luminaries within the room are of the type "mellow light" of ZUMTOBEL RCA 2/32 T26. The luminaries have been arranged in three rows, nine luminaries per row. The requirements for the

illumination distribution ($E_{min}/E_m=1:1.4>0.7$), and for the optimal installment of the luminaries ($d_b/d_a=2.67/1.78<1.5$) have been taken into consideration. The lighting installation has 1,9 kW installed power.

Technical and Economic Assessment

Here was used the method for technical and economic assessment 'Present Value' - PV [4,5]. The capital investments today shall be depreciated as a result of the loss of the interest in case they have been deposited into a bank - it should be assessed whether it is reasonable to make the capital investment. By this method it has been defined whether the system shall repay for itself through the economy of the electrical power (the method has been implemented for 7 years).

$$PV = \sum_{t=1}^7 \frac{C_t}{(1+p)^t} = \frac{C_1}{1+p} + \frac{C_2}{(1+p)^2} + \dots + \frac{C_7}{(1+p)^7}$$

C_1, C_2, \dots, C_7 - price of the economy of electrical power for each year

$p=4.7\%$ - annual interest for state enterprises within the conditions of a Monetary Board

With the designed system for control of the artificial illumination per 1.9 kW of installed power the "Present Value" of the revenues for future period of time from the economy of the electrical power shall be USD 217.28 (DEM 391.12- saved from the 7 years of saved electrical power).

Having in mind this, the prices of the separate modules of the control system, system like LUXMATE Daylight for one room is assessed approximately to DEM 6705. This sum represents for NPV method:***

-cost=6705DEM; NPV=391,12-6705=-6313,88 DEM.

This means that one such control system for our climatic conditions, daily course-graph of the natural illumination and with local prices for electrical power in kWh is practically non-reimbursing.

The implementation of similar control systems for the illumination level in the general case is not profitable for the reconstruction of existing lighting installation, as the whole change of the control system and the existing illuminaires and is not payable within the recommended 3-7 years term of saved electrical power. In the case of new buildings however this type of system would be more and more used, for the leading edge is the more and more mass implementation of expensive electronic switching and regulation apparatuses (ESRA), mainly because of the requirements for quality of the illumination and the creation of a comfortable lighting micro-climate.

Bibliography

1. Bulgarian State Standard 1786-84. Interior Lighting - Artificial, Natural, Mixed.
2. Potchamanov A., N. Yaneva. Seasonal Change of the Natural Illumination for the Region of Sofia City and Opportunities for Control of the Artificial Lighting; X National Conference with International Participation "Lighting" '96, Oct. 7 - 10, 1996, Varna City.
3. "ZUMTOBEL-STAFF - The Light" - LUXMATE Lighting Management - 1997.
4. Vassilev, N. I., Ts.K. Peytcheva, Z. Tchakarova, Technical and Economic and Energetic Assessment of the Efficiency of the Electrical Lighting
5. Corporate Finance U.S.A., Princeton University, 1994.

*The research has been done at the Scientific and Research Laboratory - Lighting at the Technical University - Sofia, for the period from 1992 to 1994 under the supervision of prof. Vassilev.

**This material has been compiled on the basis of the results from the research of the Graduate paper at the Division of ECEO, Technical University - Sofia, with supervisor Assoc.Prof.Dr.Eng.A.Pathcamanov. The tendencies for the illumination standardization have been considered, along with the problem for the way, through which by implementing the lighting systems could be achieved the visual comfort, required for working in public buildings. Along with the general principles and variants of control of the lighting installation, have been considered the products of ZUMTOBEL: LUXMATE-Basic, light control via simple switch on and off; LUXMATE Basic-IR for remote control with individual approach; LUXMATE Daylight for control by sensors of the artificial lighting in conformity with the available daylight; LUXMATE Professional for combined control through various approaches and by connection with central computer have been considered as well.

***Where $NPV = PV + \text{cost}$; $-\text{cost} \rightarrow$ the investments price.

Table 1a

S E A S O N	IN THE MORNING									
	Day	Minute of coming of 2klx t_{m2klx}	Minute of coming of 15klx, t_{m15klx}	Δt	Δt		Energy for 1 kW of installed power e, kWh/1kW		Cost of the energy per 1kW of installed power C, USD	
					peak tariff	daily tariff	peak tariff	daily tariff	peak tariff	daily tariff
S P R I N G	5 (0-10)	433.6	542.0	108.4	62.0	46.4	5.17	3.87	0.35	0.14
	15 (10-20)	406.3	505.2	98.9	25.2	73.7	2.10	6.14	0.14	0.22
	25 (20-30)	394.1	486.7	92.6	6.7	85.9	0.56	7.16	0.04	0.26
	35 (30-40)	381.5	469.9	88.4	-	88.4	-	7.37	-	0.26
	45 (40-50)	368.9	452.1	83.2	-	83.2	-	6.93	-	0.25
	55 (50-60)	352.1	442.0	89.9	-	89.9	-	7.49	-	0.27
	65 (60-70)	345.2	432.5	87.3	-	87.3	-	7.27	-	0.26
	75 (70-80)	335.7	428.3	92.6	-	92.6	-	7.27	-	0.28
S U M M E R	85 (80-90)	331.5	421.0	89.5	-	89.5	-	7.46	-	0.27
	95 (90-100)	327.3	419.9	92.6	-	92.6	-	7.72	-	0.28
	105 (100-110)	330.4	419.9	89.5	-	89.5	-	7.46	-	0.27
	115 (110-120)	331.5	421.0	89.5	-	89.5	-	7.46	-	0.27
	125 (120-130)	338.8	427.3	89.5	-	88.5	-	7.37	-	0.26
	135 (130-140)	345.1	431.5	86.4	-	86.4	-	7.20	-	0.26
	145 (140-150)	350.0	438.8	88.8	-	88.8	-	7.40	-	0.27
	155 (150-160)	360.0	443.0	83.0	-	83.0	-	6.92	-	0.25
A U T U M N	165 (160-170)	373.1	450.0	76.9	-	76.9	-	6.41	-	0.23
	175 (170-180)	382.5	461.5	79.0	-	79.0	-	6.58	-	0.24
	185 (180-190)	399.2	473.1	73.9	-	73.9	-	6.16	-	0.22
	195 (190-200)	410.5	484.6	74.1	4.6	69.5	0.38	5.79	0.02	0.21
	205 (200-210)	425.2	497.2	72.0	17.2	54.8	1.43	4.57	0.10	0.16
	215 (210-220)	439.9	500.0	60.1	20.0	40.1	1.67	3.34	0.11	0.12
	225 (220-230)	450.0	513.6	63.6	33.6	30.0	2.80	2.50	0.19	0.09
	235 (230-240)	467.8	530.4	62.6	50.4	12.2	4.20	1.02	0.28	0.04
W I N T E R	245 (240-250)	474.1	538.4	64.3	58.4	6.3	4.87	0.57	0.33	0.02
	255 (250-260)	484.6	550.0	65.4	65.4	-	5.45	-	0.36	-
	265 (260-270)	487.4	554.8	67.4	67.4	-	5.62	-	0.38	-
	275 (270-280)	490.5	565.3	74.8	74.8	-	6.23	-	0.42	-
	285 (280-290)	500.0	573.7	73.7	73.7	-	6.14	-	0.41	-
	295 (290-300)	500.0	583.2	83.2	83.2	-	6.93	-	0.46	-
	305 (300-310)	495.8	589.5	93.7	93.7	-	7.81	-	0.52	-
	315 (310-320)	490.5	590.5	100.0	100	-	8.33	-	0.56	-
R	325 (320-330)	487.4	590.5	103.1	103.1	-	8.59	-	0.57	-
	335 (330-340)	476.9	588.4	111.5	108.4	3.1	9.03	0.26	0.60	0.01
	345 (340-350)	471.0	581.1	111.1	102.1	9.0	8051	0.75	0.57	0.03
	355 (350-360)	461.5	568.5	107.0	88.5	18.5	7.37	1.54	0.49	0.05
Annually Saved Electrical Power per 1 kW Installed Power:							103.19	152.38	6.9	5.46

Working Time - 7 h - 19 h

Peak Tariff - 8 h - 11 h

Daily Tariff - 6 h - 8 h; 11 h - 21 h

Table 1b

S E A S O N	IN THE EVENING									
	Day	Minute of coming of 2klx $t_{ev2\ klx}$	Minute of coming of 15klx, t_{c15klx}	Δt	Δt		Energy for 1 kW of installed power e, kWh/kW		Cost of the energy per 1kW of installed power C, USD	
					peak tariff	daily tariff	peak tariff	daily tariff	peak tariff	daily tariff
S P R I N G	5 (0-10)	1132.0	1060.5	71.5	-	71.5	-	5.96	-	0.21
	15 (10-20)	1140.5	1058.4	82.1	-	82.1	-	6.84	-	0.25
	25 (20-30)	1159.4	1062.6	96.8	-	96.8	-	8.07	-	0.29
	35 (30-40)	1169.9	1071.0	98.9	-	98.9	-	8.24	-	0.30
	45 (40-50)	1181.5	1083.5	97.9	-	97.9	-	8.16	-	0.29
	55 (50-60)	1181.1	1089.5	91.6	-	91.6	-	7.63	-	0.27
	65 (60-70)	1187.4	1096.8	90.6	-	90.6	-	7.55	-	0.27
	75 (70-80)	1190.5	1102.1	88.4	-	88.4	-	7.37	-	0.26
S U M M E R	85 (80-90)	1189.5	1109.4	80.1	-	80.1	-	6.67	-	0.24
	95 (90-100)	1181.1	1109.9	71.2	-	71.2	-	5.93	-	0.21
	105 (100-110)	1177.9	1107.3	70.6	-	70.6	-	5.88	-	0.21
	115 (110-120)	1169.9	1100.0	69.9	-	69.9	-	5.82	-	0.21
	125 (120-130)	1160.5	1092.6	67.9	-	67.9	-	5.66	-	0.20
	135 (130-140)	1148.9	1089.9	59.0	-	59.0	-	4.92	-	0.18
	145 (140-150)	1131.5	1072.0	59.5	-	59.5	-	4.96	-	0.18
	155 (150-160)	1121.0	1060.5	60.0	-	60.0	-	4.99	-	0.18
A U T U M N	165 (160-170)	1100.0	1039.5	60.5	-	60.5	-	5.04	-	0.18
	175 (170-180)	1088.4	1031.5	56.9	-	56.9	-	4.74	-	0.17
	185 (180-190)	1066.4	1010.5	55.9	-	55.9	-	4.66	-	0.17
	195 (190-200)	1057.3	992.6	64.6	-	64.6	-	5.38	-	0.19
	205 (200-210)	1039.5	973.1	66.4	-	66.4	-	5.53	-	0.20
	215 (210-220)	1031.5	965.7	65.8	-	65.8	-	5.48	-	0.20
	225 (220-230)	1018.9	950.0	68.9	-	68.9	-	5.74	-	0.21
	235 (230-240)	1011.5	944.7	66.8	-	66.8	-	5.57	-	0.20
W I N T E R	245 (240-250)	1005.2	942.0	63.2	-	63.2	-	5.27	-	0.19
	255 (250-260)	1000.0	938.8	61.2	-	61.2	-	5.10	-	0.18
	265 (260-270)	1000.0	939.9	60.1	-	60.1	-	5.01	-	0.18
	275 (270-280)	1000.0	940.9	59.1	-	59.1	-	4.92	-	0.18
	285 (280-290)	1007.6	949.3	58.3	-	58.3	-	4.86	-	0.17
	295 (290-300)	1007.3	950.0	57.3	-	57.3	-	4.77	-	0.17
	305 (300-310)	1021.0	971.0	50.0	-	50.0	-	4.17	-	0.15
	315 (310-320)	1031.5	979.0	52.5	-	52.5	-	4.37	-	0.16
R	325 (320-330)	1044.7	996.8	47.9	-	47.9	-	3.99	-	0.14
	335 (330-340)	1069.9	1022.0	47.9	-	47.9	-	3.99	-	0.14
	345 (340-350)	1086.7	1042.0	44.7	-	44.7	-	3.72	-	0.13
	355 (350-360)	1094.7	1050.0	44.7	-	44.7	-	3.72	-	0.13
Annually Saved Electrical Power per 1 kW Installed Power:								200.7	-	7.19

Fig. 1. The Minutes of the upcoming of 2, 5, 15 klx in combined days (day 1 is March 22)

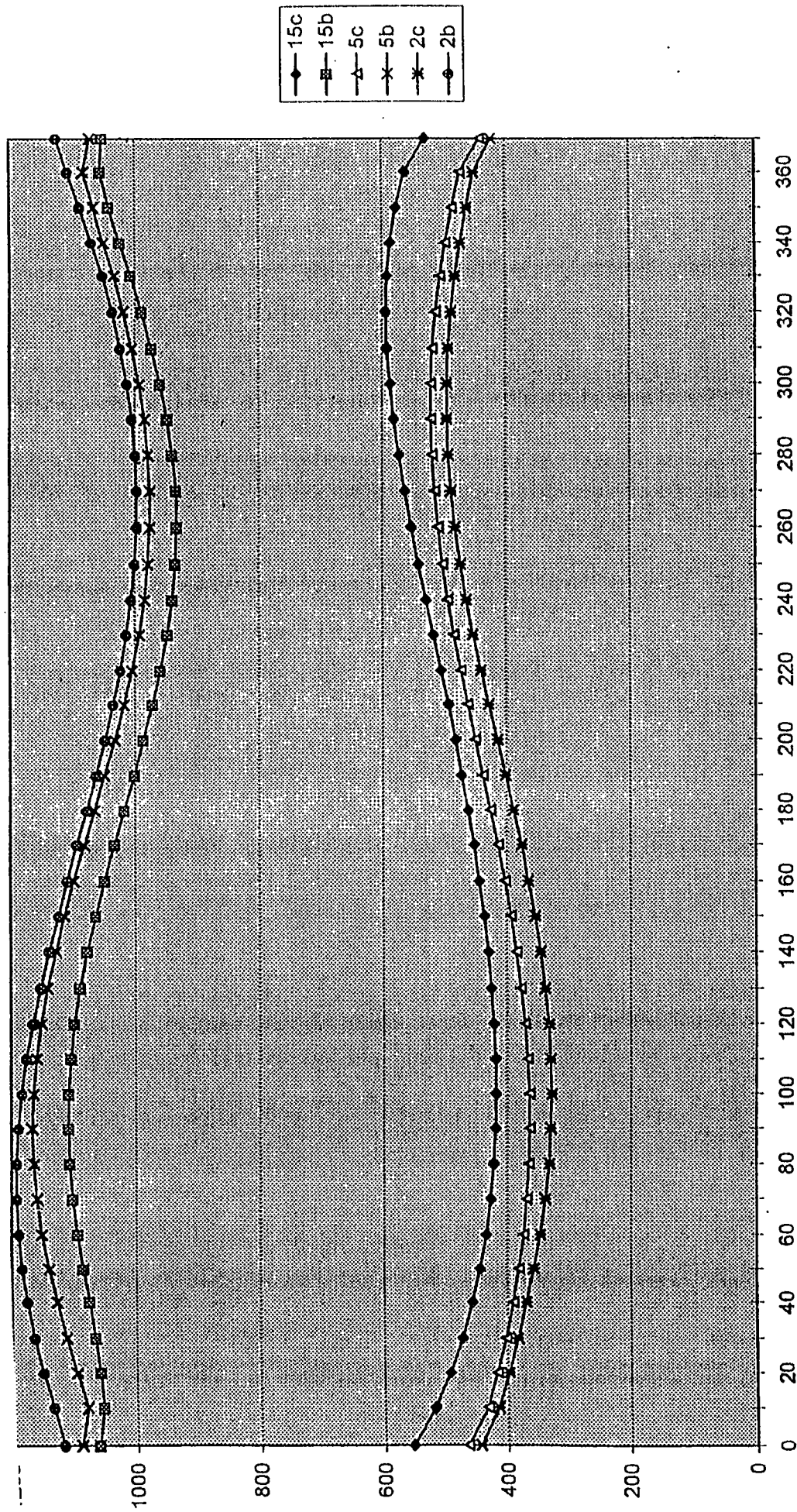
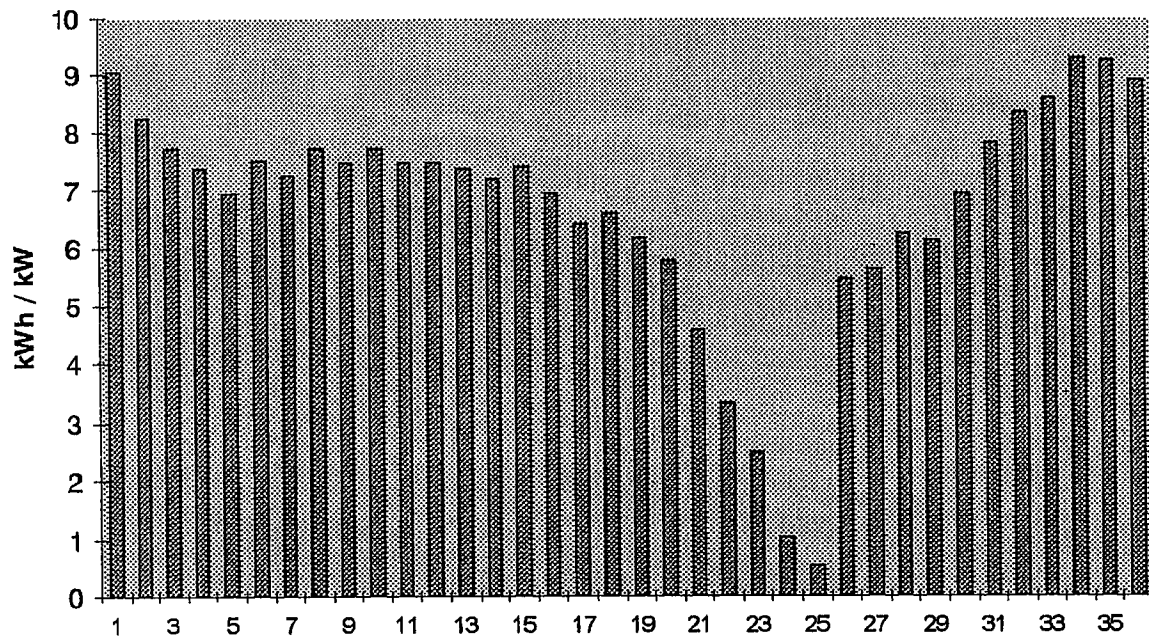
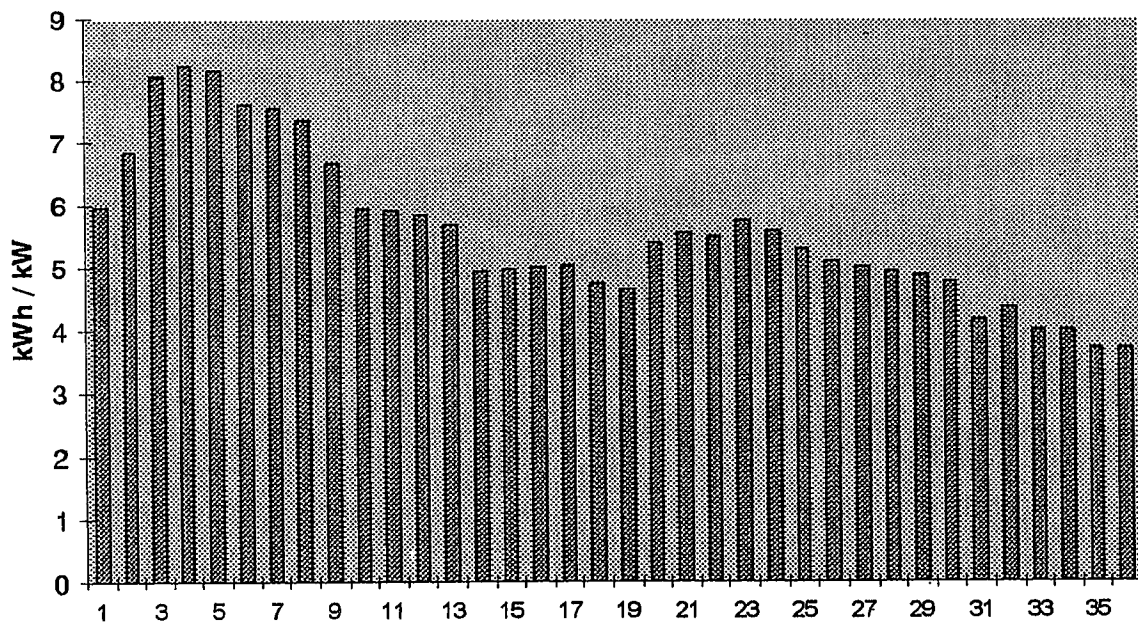


Fig.2. Saved Electrical Power with Integrated Lighting per 1 kW of Installed Power (for the course of the natural illumination from 2 to 15 klx)

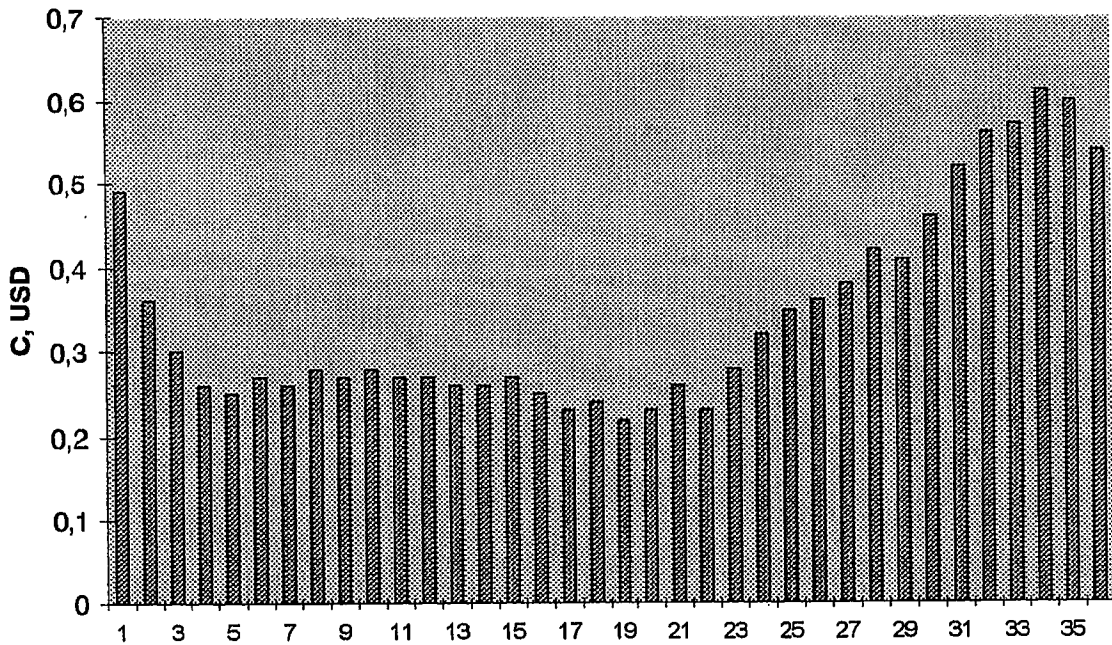


Morning - peak and daily tariff

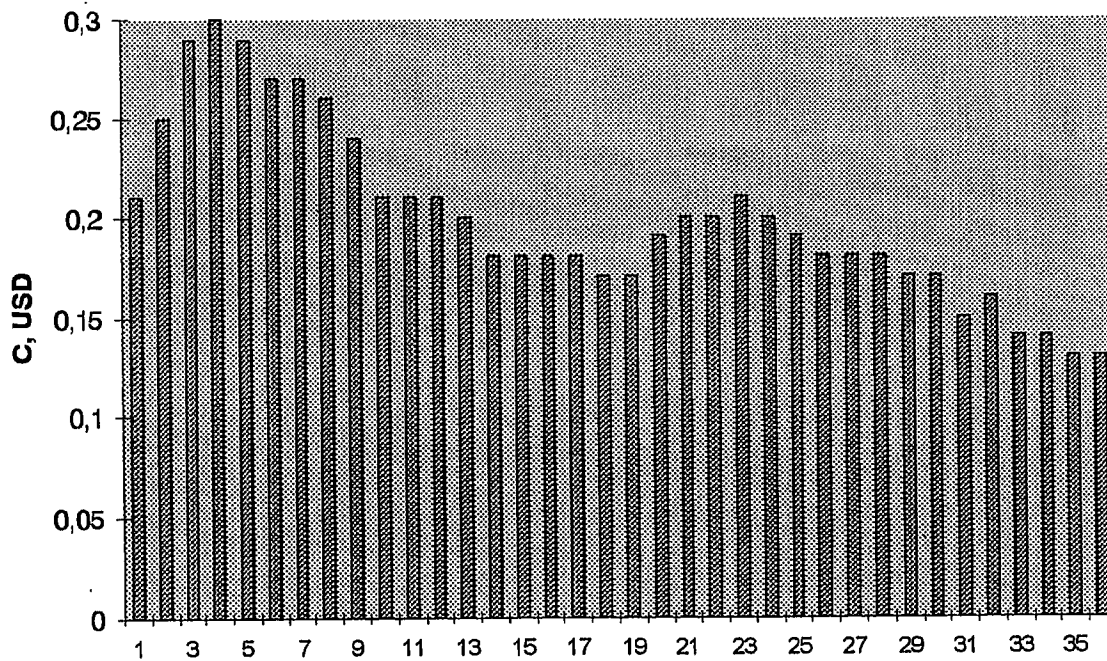


Evening - daily tariff

Fig.3. Cost of the Saved Electrical Power with Integrated Lighting per 1 kW of Installed Power (for the course of the natural illumination from 2 to 15 klx)



Morning - peak and daily tariff.



Evening - daily tariff

Aspekte der Nutzerakzeptanz bei der Tageslichtbewertung im Innenraum

Nevoigt, Jürgen (Dipl.-Ing.)
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Postfach 100565
D-98684 Ilmenau

1. Einleitung

Die unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten notwendige Maßgabe der Einsparung von Energieressourcen durch verstärkte Nutzung des Tageslichtes führte in den letzten Jahren zu verschiedenen Beleuchtungskonzepten hinsichtlich einer verbesserten Ausnutzung des Tageslichts sowie zur verstärkten Entwicklung von tageslichtabhängigen Beleuchtungssteuerungen. Die Effektivität solcher Steuersysteme wird jedoch nicht allein durch das Potential einer möglichen Energieeinsparung bestimmt, sondern erfordert neben der Erfüllung ausreichender Sehbedingungen auch in gewissen Grenzen die Akzeptanz der jeweiligen Beleuchtungsbedingungen durch den Nutzer. Eine Zufriedenstellung der Nutzerbedürfnisse bezüglich der Beleuchtungsbedingungen ist einerseits Voraussetzung einer ausgewogenen Arbeitsumgebung, was sich in einer höheren Motivation der Mitarbeiter niederschlägt, andererseits kann eine unzureichende Berücksichtigung dieses Aspektes ein manuelles Eingreifen des Nutzers in den Steuerablauf verursachen, was die energiesparende Wirkung der Steuerstrategie wieder neutralisieren dürfte.

Im Rahmen einer Felduntersuchung an 16 realen Arbeitsplätzen (vorwiegend Büroräume) mit hohem Tageslichtanteil wurden als Teil eines gemeinsamen Forschungsprojektes Befragungen zur Akzeptanz von Beleuchtungsbedingungen unter Tageslichteinfluß durchgeführt. Korrespondierend zu den subjektiven Aussagen der befragten Personen wurden vor Ort einige lichttechnische Daten zur gegenwärtigen Situation gemessen, z.T. mittels CCD-Technik zur orts aufgelösten Leuchtdichtedarstellung. Einige Meß- und Befragungsergebnisse sollen hier aufgezeigt werden, wobei besonderes Augenmerk auf die Bewertung der Blendung durch Tageslicht und die Möglichkeiten zur deren meßtechnischen Erfassung gelegt wird.

2. Problematik der psychologischen Blendungsbewertung des Tageslichts

Die gegenwärtig national und international verwendeten Blendungsbewertungsverfahren für die Innenbeleuchtung (einschl. UGR-Verfahren) basieren im wesentlichen auf der Annahme punktförmiger Blendquellen und sind nur bis zu einer begrenzten Raumwinkel- ausdehnung der blendenden Fläche erklärt. Sie sind daher per Definition nicht ohne weiteres auf die Bewertung ausgedehnter heller Flächen übertragbar, wie sie z.B. bei größeren Fenstern vorkommen können. Hauptsächlich HOPKINSON und BRADLEY haben in den 50er Jahren umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluß der

Blendquellengröße und der Umfeldleuchtdichte auf das subjektive Blendungsempfinden genauer zu spezifizieren. Als Ergebnis dieser Studien wurde die sogenannte 'Cornell-Formel' (benannt nach der Cornell University, USA) zur Berechnung des 'Daylight Glare Index' (DGI) für die Blendwirkung von Fenstern entwickelt, in der auch der Einfluß der Blendquelle selbst auf die Adaptation des Auges Berücksichtigung finden soll. Sie wird wie folgt angegeben:

$$DGI = 10 \log 0,478 \sum \frac{L_s^{1,6} \Omega^{0,8}}{L_b + (0,07 \omega^{0,5} L_w)}$$

darin bedeuten:

- L_s ... die Leuchtdichten der blendenden Flächen (z.B. Himmel) [cd/m²],
- L_b ... die Umfeldleuchtdichte (mittlere Innenraumleuchtdichte) [cd/m²],
- L_w ... die durchschnittliche Leuchtdichte der gesamten Fensterfläche [cd/m²],
- Ω ... den jeweiligen projizierten Raumwinkel der Blendquelle in bezug auf die Blickrichtung [sr] und
- ω ... den Gesamtraumwinkel des Fensters [sr] /2/, /10/.

Aus späteren Untersuchungen zur Überprüfung der 'Cornell-Formel' wurde gefolgert, daß die Blendung durch Tageslicht offenbar mehr toleriert wird als die durch künstliche Beleuchtung. Die Korrelationen zwischen den Blendurteilen und den berechneten Blendungsindizes waren etwas geringer im Vergleich zu denen der Blendungsbewertung hinsichtlich Kunstlicht. Weiterhin wurde angenommen, daß der subjektive Blendeindruck im Gegensatz zur Innenbeleuchtung durch andere visuelle und ästhetische Faktoren beeinflußt wird, wie etwa durch die Qualität des Fensterausblicks oder die Inneneinrichtung des Raumes /2/.

Japanische Laboruntersuchungen /10/ hatten zum Ziel, die Anwendbarkeit von DGI und UGR bezogen auf die Blendung durch reale Fenster zu überprüfen. Zur Berechnung der Indizes wurde die betrachtete Fensterfläche in maximal 9 Abschnitte untergliedert und jeweils die Leuchtdichte jeder Teilfläche gemessen. Trotz hoher Korrelationen zwischen den ermittelten Indizes und der subjektiven Blendurteile wurde darauf verwiesen, daß sowohl DGI als auch UGR noch nicht ausreichen, um unter allen Bedingungen die Blendungsempfindung hinreichend zu beschreiben. Als Ziel weiterer möglicher Studien wird die Berücksichtigung der Leuchtdichteverteilung innerhalb der Fensterfläche sowie der Blickrichtung relativ zum Fenster angeregt.

Neben der Blendungswirkung durch beispielsweise direktes Himmels- oder Sonnenlicht spielen jedoch noch andere Faktoren eine nicht untergeordnete Rolle, die das subjektive Wohlbefinden bzw. die Akzeptanz des Nutzers erheblich einschränken können. Dies sind z.B.:

- ▶ Schleierreflexionen auf Sehobjekten (insbesondere auf Bildschirmen durch helle Wandflächen oder Fenster)
- ▶ Blendwirkung durch äußere Fassadenflächen (z.B. benachbarter Gebäude) mit

- ▶ hohem Reflexionsgrad, die von direktem Sonnenlicht beleuchtet werden
- ▶ "Silhouetteneffekt" bei stark gerichteter Beleuchtung durch größere Fensterflächen (starke Verminderung der Erkennbarkeit von Gesichtern)
- ▶ empfundene Helligkeitsunterschiede zwischen verschiedenen Raumzonen
- ▶ empfundene Unterschiede der Lichtfarben zwischen Tageslicht und künstlichem Licht (Zwielicht)

Zudem kann bei Gebäuden mit hohem Oberlichtanteil je nach Jahreszeit und örtlichen Bedingungen eine erhebliche Wärmebelastung auftreten, was eine zusätzliche Bereitstellung von Energie für die Klimatisierung erforderlich macht.

3. Durchführung der Felduntersuchungen

Die Realisierung der Messungen sowie Nutzerbefragungen teilte sich in zwei Etappen. In der ersten Phase wurden 5 Vorabmessungen vorrangig in Räumen des Technologie- und Gründerzentrums Ilmenau mit hohem Tageslichtanteil unter Einbeziehung der Nutzerbewertungen durchgeführt. Neben verschiedenen Beleuchtungsstärkemessungen konnten auch Leuchtdichtebereiche im Raum mittels bildaufgelöster Einzelaufnahmen bewertet werden.

Die Leuchtdichteverteilung im gesamten Gesichtsfeld sowie eine exakte Blendungsmessung entsprechend der definierten Bewertungsverfahren konnte allerdings erst während der zweiten Phase basierend auf einem im Hause neuentwickeltem Blendungsmeßgerät erfaßt werden. Die diesbezüglichen Felduntersuchungen wurden an 11 weiteren Arbeitsplätzen eines Erfurter Verwaltungsgebäudes vorgenommen.

3.1 Messung der lichttechnischen Parameter an realen Arbeitsplätzen

Mit Hilfe des automatischen Blendungsmeßsystems basierend auf der bildauflösenden Leuchtdichtemessung wurde an den verschiedenen Testplätzen u.a. der Daylight Glare Index bestimmt. Von den mittels entsprechender Leuchtdichteschwelle klassifizierten Blendquellen wurden bei der Auswertung jedoch nur jene berücksichtigt, deren Raumwinkelausdehnung größer als 0,01 sr berechnet wurde. Damit konnte nach Überprüfung sichergestellt werden, daß nur ausgedehntere Fensterflächen zur DGI-Ermittlung erfaßt wurden. Jedoch war nicht immer zu gewährleisten, daß das gesamte Fenster (oder mehrere) als Blendquelle selektiert wurde. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn Leuchtdichten einer äußeren Verbauung im Bereich der Innenraumleuchtdichten liegen. Als Konsequenz der Anpassung an das Meßverfahren ist die mittlere Fensterleuchtdichte L_w als identisch mit der mittleren Leuchtdichte der Blendquelle L_s anzusehen. Ebenfalls wird hier für den Raumwinkel des Fensters ω der gemessene Raumwinkel der jeweiligen blendenden Fläche verwendet.

Weitere lichttechnische Parameter wurden mit Hilfe von Einzelempfängern gemessen. Dazu zählen die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene, die in Augenhöhe des Beobachters (ca. 120 cm) ermittelte zylindrische und horizontale Beleuchtungsstärke, sowie 3 an gleicher Position senkrecht zueinander gemessene vertikale Beleuchtungsstärken (links, geradeaus und rechts vom Beobachter).



Abb. 1 Bildaufgelöste Leuchtdichtedarstellung eines Büroraumes

3.2 Befragung der Nutzer

Parallel zur Aufnahme und Protokollierung der im wesentlichen tageslichtabhängigen lichttechnischen und Rahmenbedingungen wurden die Beschäftigten des jeweils untersuchten Arbeitsplatzes gebeten, auf einem entsprechenden Fragebogen ihre subjektiven Empfindungen und Urteile zu bestimmten Aspekten der gegenwärtigen Beleuchtungssituation auf bipolaren Wertungsskalen bzw. in kurzer verbaler Form zu beschreiben. Neben der Erfassung allgemeiner Informationen wie Altersgruppe, Geschlecht und der Nutzung optischer Korrekturhilfen (Brille, Kontaktlinsen) beziehen sich die Fragen hauptsächlich auf:

- ◆ allgemeine Faktoren des Wohlbefindens und arbeitswissenschaftlicher Anforderungen der Arbeitsumgebung
- ◆ die Bevorzugung von Tageslicht- oder künstlicher Beleuchtung im Arbeitsraum
- ◆ das Verständnis des Begriffs "Blendung" sowie deren Beurteilung
- ◆ die Bewertung der verfügbaren Helligkeit im Raum sowie deren Eignung zum Lesen auf der Arbeitsfläche
- ◆ die Bewertung der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung im Raum und auf der Arbeitsfläche
- ◆ die Einschätzung der Helligkeitsverteilung zwischen der Arbeitsfläche und der Umgebung (Raumflächen)
- ◆ die Beurteilung eventuell empfundener Lichtfarbenunterschiede zwischen Tageslicht und Kunstlicht

4. Ausgewählte Ergebnisse

4.1 Allgemeine Nutzerbeurteilungen

Auf die Frage, ob entweder Tageslicht oder künstliches Licht im Arbeitsraum bevorzugt wird, gab eine deutliche Mehrheit der Personen (69%) dem Tageslicht den Vorrang. Als Begründung wurde häufig angeführt, daß Tageslicht subjektiv angenehmer bzw. natürlicher sei als künstliches Licht. Die gegebenen verbalen Antworten der Probanden deuten an, daß das natürliche Tageslicht einen hohen psychologischen Stellenwert besitzt und daher, falls verfügbar, für die Beleuchtung des Innenraumes genutzt werden sollte.

<i>“Bevorzugen Sie lieber Tageslicht oder künstliches Licht im Arbeitsraum?”</i>	Häufigkeit der Angaben
Tageslicht	69 %
künstliches Licht	6 %
Kombination aus Tageslicht und künstlicher Beleuchtung	6 %
keine Angabe	19 %

Tabelle 1: Verteilung der verbal formulierten Antworten zur Tageslichtakzeptanz

Es zeigte sich weiterhin, daß die befragten Beschäftigten erwartungsgemäß der Gewährleistung angenehmer äußerer Arbeitsbedingungen eine hohe Priorität einräumen. Dabei werden Faktoren wie bequeme Körperhaltung, die individuelle Eingriffsmöglichkeit in die Umgebungsbedingungen des Arbeitsplatzes oder die Sichtverbindung nach außen als wesentlich erachtet.

Bezüglich der Lichtfarben von Tageslicht und Kunstlicht werden von der Mehrheit der Probanden (56 %) wahrnehmbare Unterschiede empfunden. Ein Viertel der Befragten stuft die Differenzen als störend ein während in keinem der Fälle das Urteil “unzumutbare Unterschiede” angegeben wird.

4.2 Blendungsbewertung

Den Begriff “Blendung” verstanden die Testpersonen hauptsächlich als “starker Lichteinfall” oder “störende Helligkeit”. Für 56 % der Befragten zählen “störende Lichtreflexionen” ebenfalls dazu. Auf jeweils einer bipolaren Bewertungsskala von 1 (keine Blendung vorhanden) bis 5 (Blendung unerträglich) war die Blendungsempfindung entsprechend verschiedener Ursachen (Leuchten, diffuses Tageslicht, direktes Sonnenlicht, Reflexblendung) abzuschätzen. Das negativste Urteil wurde hierbei der Reflexblendung mit einem Median-Wert von 2,5 zugeschrieben. Auf die Frage, wo die meisten Reflexblendungen erscheinen, wurde zu 50 % die Widerspiegelung heller Fenster bzw. Wände auf dem Bildschirm genannt. In 31 % der Fälle wurde auf die Blendung durch zu helle Außenfassaden verwiesen, wenn diese direktem Sonnenlicht ausgesetzt sind. In den entsprechenden Situationen konnten dabei Leuchtdichten der Außenfassaden bis zu 13.000 cd/m² gemessen werden, was etwa dem zwei- bis dreifachen Wert der Leuchtdichte des klaren Himmels entsprach.

Für 9 Befragungssituationen konnte der meßtechnisch ermittelte Daylight Glare Index mit der jeweiligen subjektiven Einschätzung zur Blendung durch diffuses Tageslicht verglichen werden (in keinem der untersuchten Tageslichtsituationen erschien direktes Sonnenlicht im Gesichtsfeld der Probanden). Allein 7 Bewertungen fielen auf die ersten zwei Urteilkategorien der 5-Punkte-Skala. Die grafische Gegenüberstellung zeigt die Boxplotdarstellung in **Abb. 2**.

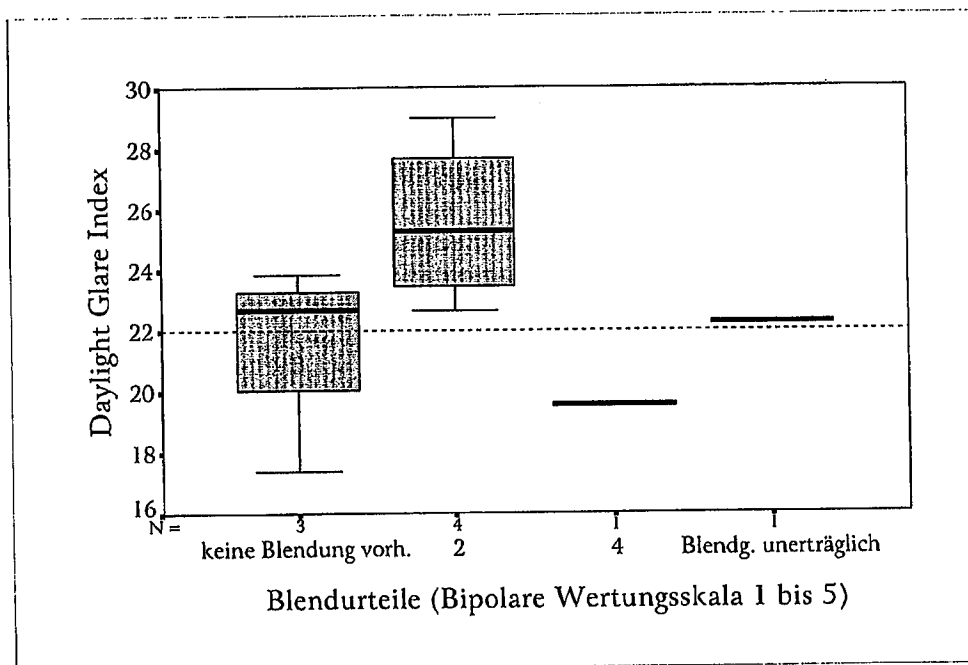


Abb. 2 Vergleich der DGI-Messungen mit subjektiven Einschätzungen in Boxplot-Darstellung

Ersetzt man für die DGI-Berechnung die Umfeldleuchtdichte L_b durch die raumwinkelprojektions-gewichtete mittlere Leuchtdichte des gesamten Gesichtsfeldes unter Einbeziehung der Blendquellen selbst, so ergeben sich um etwa 2 Indexpunkte niedrigere DGI-Werte. Das bedeutet, durch die stärkere Berücksichtigung des Adaptationsniveaus im Berechnungsverfahren wird die durch die Fensterflächen hervorgerufene Blendung weniger kritisch bewertet als bei alleiniger Verwendung der Umfeldleuchtdichte für L_b (orig.: Background Luminance). Die Resultate der letztgenannten Methode entsprechen auch eher dem im CIE-Entwurf /4/ angegebenen Wertebereich mit der Gegenüberstellung zu den Komfortkriterien "gerade unmerklich" (DGI=16) bis "gerade unerträglich" (DGI=28). Dementsprechend wäre die BCD-Grenze (Borderline between Comfort and Discomfort) dem DGI-Wert von 22 zuzuordnen. Vergleiche der Blendurteile mit gemessenen UGR-Werten sowie den alleinigen Blendleuchtdichten der Fenster zeigen zwar einen ähnliche Tendenz, die Abgrenzung der jeweiligen Urteilsgruppen ist jedoch nicht so deutlich erkennbar, wie im Fall der DGI-Ermittlung.

4.3 Beleuchtungsniveau und -verteilung

Die von den Nutzern bevorzugten Beleuchtungsstärken sind erfahrungsgemäß stark von individuellen Faktoren und dem vorhandenen Adaptationsniveau abhängig. Eine hohe Korrelation zeigte sich dennoch beim Vergleich des bewerteten Helligkeitsniveaus im Raum und der gemessenen zylindrischen Beleuchtungsstärke. Eine bivariate Korrelationsanalyse zwischen den beiden Variablen ergab einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,81$ bei hoher statistischer Signifikanz ($p = 0,00$).

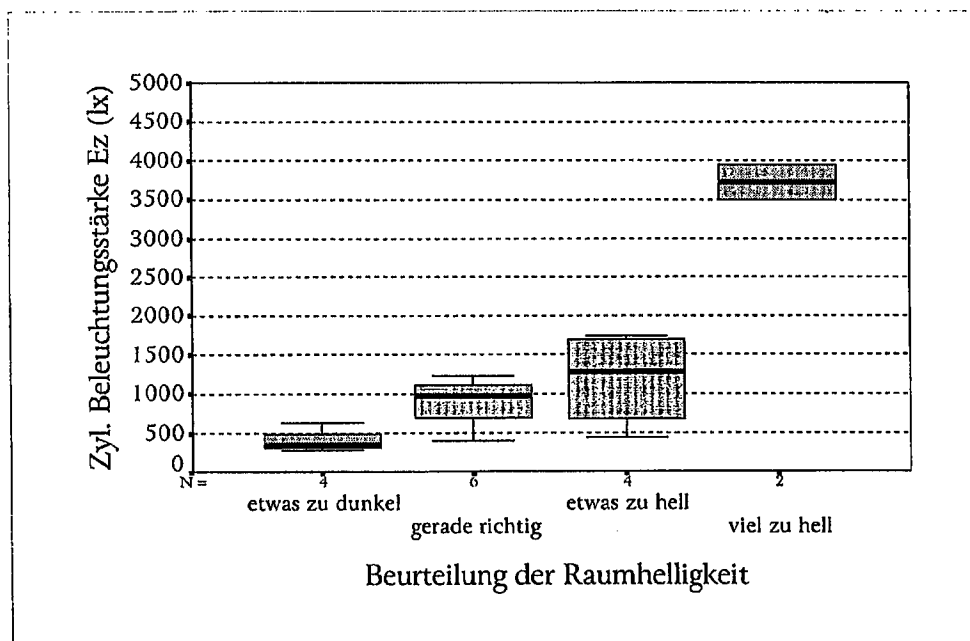


Abb. 3 Vergleich der zylindrischen Beleuchtungsstärke mit der Nutzer-einschätzung zur empfundenen Helligkeit im Raum

Die Grafik in **Abb. 3** zeigt, daß Beleuchtungsstärkewerte um 1000 lx als angemessen beurteilt werden.

Als angemessenes Kriterium zur Beschreibung der Helligkeitsverteilung zwischen der Arbeitsfläche und dem Raum kann das Verhältnis zwischen vertikaler (in Richtung Fensteröffnung) und horizontaler Beleuchtungsstärke in Augenhöhe angesehen werden (siehe /7/), was durch entsprechende Nutzerbewertungen auch nachvollzogen werden konnte. In Räumen mit hohem seitlichen Tageslichteinfall ohne zugeschaltete Allgemeinbeleuchtung betrug das Verhältnis etwa 2 bis 3, bei zusätzlicher künstlicher Beleuchtung ca. 1 bis 1,5.

Die bildaufgelösten Messungen der Leuchtdichtevertellung in den untersuchten Arbeitsräumen verdeutlichten oftmals eine nicht unerhebliche Abnahme der Leuchtdichte auf den Raumwänden senkrecht zur Fensterfront. Abhängig von der Raum- und Fenstergeometrie wurden Unterschiede im Verhältnis von etwa 3:1 bis 5:1 zwischen Fensterseite und Rauminnern festgestellt, wobei je nach Bedarf der Beschäftigten die Allgemeinbeleuchtung in ca. einem Drittel der Fälle zugeschaltet war. Zu Vergleichs-

zwecken wurde die Leuchtdichtevertellung eines Büroraumes nach der Befragung ein zweites mal ohne künstliche Beleuchtung gemessen, wobei hier Leuchtdichteverhältnisse von etwa 10:1 auf der Wandoberfläche verzeichnet wurden.

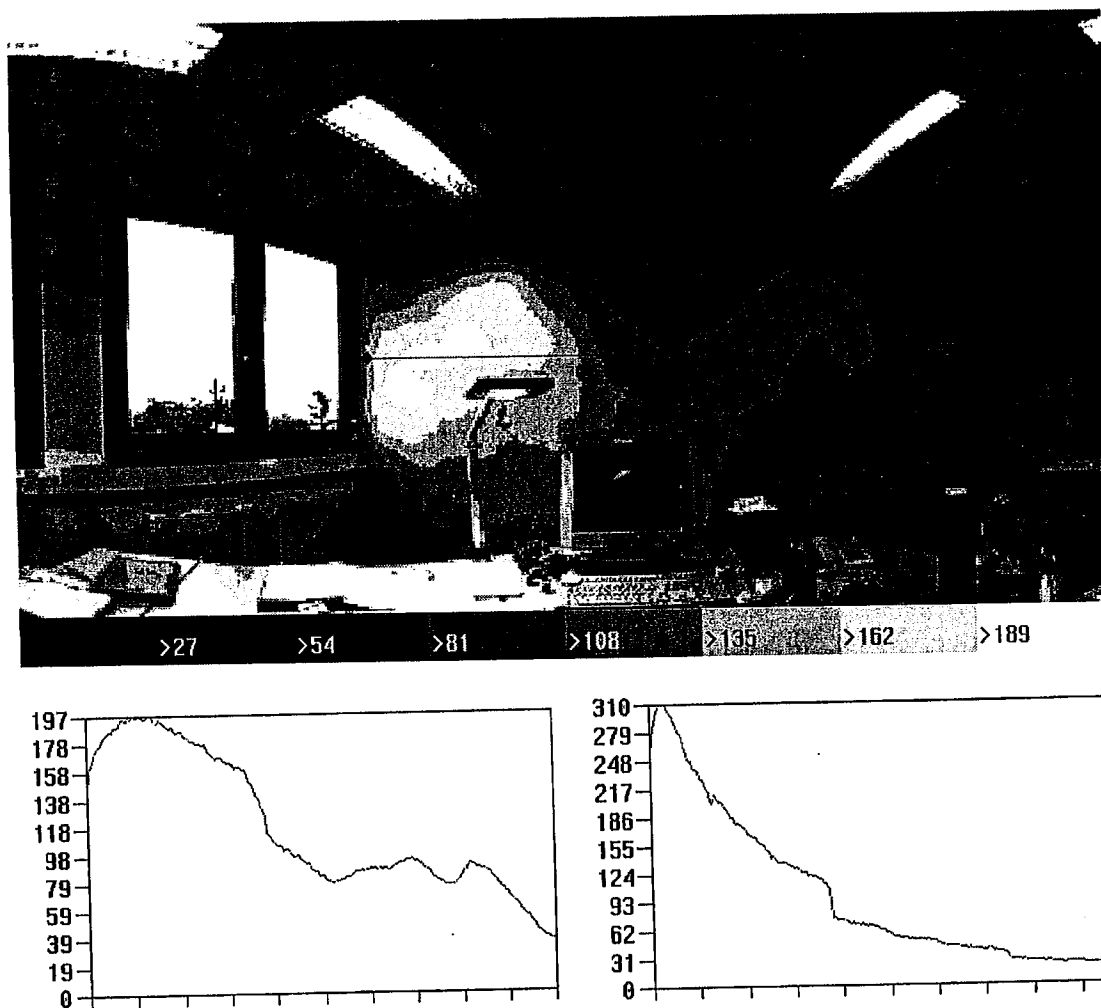


Abb. 4 Verlauf der Wandleuchtdichte a) links: mit zusätzlicher Allgemeinbeleuchtung (s. Graustufendarstellung); b) rechts: Leuchtdichteprofil derselben Raumwand durch ausschließlich Tageslicht

5. Zusammenfassung

Die Akzeptanzbefragungen und Messungen an realen Arbeitsplätzen zeigen einige Probleme auf, die bei der Nutzung des Tageslichts trotz dessen unbestritten positiver psycho-physischen Wirkung für die Beleuchtung im Innenraum stärkere Berücksichtigung finden sollten. Vor allem der Bereich der psychologischen Blendung einschließlich direkte und Schleierreflexionen ist vom lichttechnischen Standpunkt aus bezüglich des Tageslichtes in der Realität vielfach kritischer zu bewerten als vergleichbare Güteermere der künstlichen Beleuchtung. Ein neues Meßverfahren zur objektiven Beurteilung von Blend-

situationen auf Basis der orts aufgelösten Leuchtdichtemessung konnte dabei erstmals eingesetzt werden und bietet aufgrund konsistenter Ergebnisse die Möglichkeit tiefergehender und spezifizierter Untersuchungen zu o.g. Schwerpunkt.

6. Literatur

- /1/ Berutto, V.: Importance of wall luminance on users satisfaction: pilot study on 73 office workers. Proceedings of the 8th LUX-EUROPA conference, Amsterdam, 1997, p. 82-101
- /2/ Boubekri, M., Boyer, L. L.: Effect of window size and sunlight presence on glare. Lighting Research & Technology 24(2), 1992, 69-74
- /3/ Chauvel, P., Dogniaux, R., Collins, J. B., Longmore, J.: Glare from windows: Current views of the problem. Proceedings of the Symposium on Daylight, Berlin (West), 1980, p. 294-302
- /4/ CIE: Guide on Daylighting of Building Interiors. Draft 1990
- /5/ Einhorn, H. D.: Discomfort Glare from Small and Large Sources. Proceedings of the 1st International Symposium on Glare, Orlando/Florida, 1991, p. 101-114
- /6/ Griffith, J. W.: Daylight Glare and Productivity. Proceedings of the 1st International Symposium on Glare, Orlando/Florida, 1991, p. 211-217
- /7/ Halonen, L., Lehtovaara, J.: Need Of Individual Control To Improve Daylight Utilization And Users Satisfaction In Integrated Lighting Systems. Proceedings of CIE 119-23rd Session, New Delhi, 1995, p. 200-203
- /8/ Hentschel, H.-J.: Bevorzugte Leuchtdichtebereiche in der Innenbeleuchtung. LICHT 5/1990, S. 404-411
- /9/ Hopkinson, R. G., Bradley R. C.: A Study Of Glare From Very Large Sources. Illuminating Engineering, May 1960, page 288
- /10/ Iwata, T., Tokura, M., Shukuya, K., Kimura, K.: Experimental study on discomfort glare caused by windows, Part 2 - Subjective response to glare from actual windows, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering, No. 439, 1982
- /11/ Nakamura, Y.: A Study How To Express Luminance Distribution. Proceedings of the 7th LUX-EUROPA conference, Edingburgh/UK, 1993, p. 917-920
- /12/ Nakamura, Y.: The Effect Of Luminance Distribution On Subjective Assessments In An Office. Proceedings of the 8th LUX-EUROPA conference, Amsterdam, 1997, p. 102-115
- /13/ Petherbridge, P., Hopkinson, R. G.: Discomfort Glare and the Lighting of Buildings. Trans. Illum. Eng. Soc. 15 (2) 39-79 (1950)
- /14/ Roessler, G.: Fenster als visuelle Verbindung zwischen Räumen mit ständiger Tageslicht-Ergänzungsbeleuchtung und der Außenwelt. Lichttechnik, 28. Jahrgang, Nr. 11/1976, S. 451-55 und Nr. 12/1976, S. 490-492
- /15/ Tiller, D. K., Veitch, J. A.: Perceived room brightness: Pilot study on the effect of luminance distribution. Lighting Research & Technology 27(2), 1995, 93-101
- /16/ Velds, M.: An Experimental Approach To Assess Discomfort Glare From Windows. Proceedings of the 8th LUX-EUROPA conference, Amsterdam, 1997, p. 116-129
- /17/ Walkling, A.: Messung der UGR-Werte zur Beurteilung des Blendungsverhaltens einer Beleuchtungsanlage mittels bildauflösender Leuchtdichtemessung. Diplomarbeit TU Ilmenau, 1995
- /18/ Wolf, S., Stefanov, E., Riemann, M.: Image Resolved Measurement of Luminance using a CCD Camera. Light & Engineering Vol. 3/ No. 3, 1995, p. 34-44

Illumination of office rooms by the utilisation of daylight

Wandachowicz Krzysztof, M. Sc.

Poznań University of Technology
Lighting Division
ul. Piotrowo 3a
60-965 Poznań
wandach@sol.put.poznan.pl

1. General

In the present times the utilisation of daylight acquires new meaning. We are looking for the possibilities of limiting the consumption of electric energy in all places. One can say that we get daylight for free. Having paid all the investment expenses related to the erection of the building we do not have to pay any more for the use of daylight. From the one hand the utilisation of daylight provides a good chance of economising. On the other hand its effective utilisation not always produces the expected results. High values of the daylight factor can be reached only near the windows. This is due to the sky characteristic and the position of the sun. The sky luminance is not equal in every part of the sky and reaches the highest value at zenith. However, most often the direct sunlight enters the interior through the windows at large angles with regard to the horizontal plane.

The methods enabling the increase of the luminance uniformity ratio in such a way that even in deep rooms the daylight factor has an acceptable value have been known for a long time now. In the recent years, the number of studies on the development and implementation of the so-called systems of daylights has increased significantly. New types of venetian blinds, prismatic panels and holograms are being developed. In certain buildings the studies on the feasibility of the adopted solutions (case studies) are carried out.

Other factors should be taken into account in the analysis of quality parameters, e.g. visual comfort or in the assessment of subjective sensations. The implementation of some daylight systems results in the loss of eye-contact with the surroundings, which can have an adverse effect upon the subjective feelings of people working in such rooms.

2. Visual comfort and daylighting

One of the key parameters taken into account in the assessment of vision conditions is the distribution of luminance in the field of vision and the degree of limiting of glare. The Polish Standard for the artificial lighting of interiors specifies the requirements with regard to both of these parameters. However, no such requirements are stated in the Polish Standard for daylighting. However, the lack of such requirements does not solve the problem, which is particularly acute in the case of offices with vertical windows. In such rooms, the main directions of eye labour are constrained by the horizontal and vertical planes. Due to high window luminance in the case of horizontal direction of eye labour, which is quite frequent in the office rooms in which computers are used (VDT) the illumination distribution in the field of vision may be very unfavourable. Besides a high window luminance may be a source of glare. These adverse effects can be dealt with for example by:

- using appropriate lay-out of work places in which fields of vision are free from the elements of a too high luminance
- decreasing the window luminance by installing venetian blinds, roller blinds and window shades

However, in some cases these two methods do not bring the expected results. Not always work places can be laid-out in a way allowing to avoid high luminance in the field of vision. Apart from that, one should take into consideration the possibility of the occurrence of the reflection glare when a large, light window is reflected in a monitor screen. The use of venetian blinds and window shades aims mainly at the elimination of the direct component. However, we encounter high luminance of the window opening also when only the diffuse component is present. The image of both cloudless sky and overcast sky can also be a source of glare. Obviously, the window luminance can be limited to the level at which it meets the requirements of limiting the glare. This can be achieved by shading the window with materials with Lambertian characteristic and adequately low values of transmittance factors. However, in such a situation we have to provide additional artificial lighting, since limiting the amount of light entering the interior decreases the level of luminance of the working surface. That is why it is inadvisable to limit the amount of light entering the interior. Instead, the characteristic of the window material should be changed so that luminance of the shielding angles from 0° up to around 90° - 110° (measured from the vertical axis directed downwards) was limited to the value accepted with regard to the condition of the luminance distribution in the field of vision and limiting of glare. Then we will obtain the effect of change of the direction of light where the major proportion of the light will be directed in the upper half space. How can we estimate the value of the window luminance for the specified shielding angles? The answer to this question can be provided by a number of subjective tests taking into account several, variable parameters which can influence the measurement results. For the initial analysis of usefulness and feasibility of this solution I suggest to assume the window luminance for the shielding angles at the level of $200 \text{ [cd/m}^2\text{]}$. This is the threshold value for luminaire luminance with regard to the shielding angles adequate for the work places where computers are used. If computer-equipped work places are artificially lighted a reflective glare or decrease of the contrast of detail in eye labour may occur as a result of a reflection of high luminance in the monitor screen. That is why the standards used in many countries require the limiting of luminance to such a value. As it has been already mentioned also in daylight a reflective glare or the decrease of the contrast of detail in eye labour may occur as a result of reflection of the window in the monitor screen. For this reason it seems advisable to decrease the window luminance to such a level. Besides, the luminance value of $200 \text{ [cd/m}^2\text{]}$ may be accepted, provided that the condition of proper luminance distribution in the field of vision has been met.

3. Tests

In order to check the usefulness of the proposed solution a simulation of luminance distribution was carried out in a model room. In this simulation the RADIANCE software package (package of programs for DOS with ADELIN 2.0) was used. The model room was $5 \times 6 \text{ m}$ large and 2.8 high. In the longer wall there were 4 windows 1.1 m wide and 1.7 m high each. It was assumed that the enclosing surfaces produce diffuse reflection and have the following reflectance factors: ceiling - 0.7 , walls - 0.5 , floor - 0.3 . The room is located at 52° North and 16° East which corresponds to the location of Poznań in the Middle West of Poland. The simulation tests were carried out

for CIE standard, clear sky with the sun and CIE standard, overcast sky using three different materials placed in the window opening. These were:

- double-glazed window, with transparent window panes and total transmittance factor of 0.8
- window with a diffuse glass pane with transmittance factor selected so as to meet the requirement of the luminance value of 200 [cd/m²]
- window with an element changing the direction of light passing through the window opening.

4. Summing up

The simulation tests have shown that during the seasons of the year in which the accessibility of the daylight is high or at least moderate the suggested solution gives positive results. The method used for changing the direction of light at the window opening in the simulation test has no relation to any existing system of daylight illumination. The verification of the usefulness of the existing systems was not the aim of the tests, which however, were carried out on the basis of the analysis of the properties of these systems including in particular the lighting characteristics. A problem likely to appear in the implementation of this concept is the construction of such a unit model which would meet the condition of constant luminance for the shielding angles at changing external illumination. Such a system could result in a limited eye-contact with the surrounding area, which in turn, could lead to negative subjective sensations. In this situation, it would be advisable to construct a system model changing the direction of a light beam and then to carry out subjective tests with the use of this model.

5. References

Aizlewood M.E., Porter H.W., Littlefair P.J.: *An experimental assessment of innovative glazing systems*. Lux Europa 1993

Catalogues of systems of daylight: Hüppe, Okalux, Siemens, Schenker Storen

Bartenbach Ch.: *Neue Tageslichtkonzepte*. München 1970

DIANE Projekt Tageslichtnutzung: *Systeme der Tageslichtnutzung. Beispiele, Messungen, Tendenzen*.

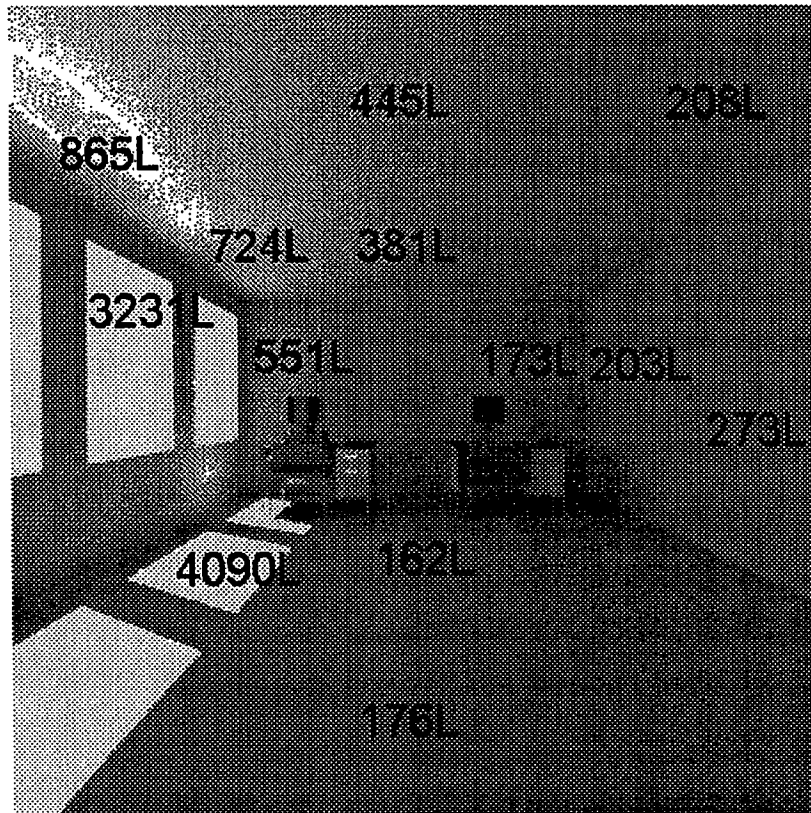
RAVEL Bundesamt für Konjunkturfragen: *Neuer Komfort mit Tageslicht*.

Köster H.: *Intelligent Building durch verbesserte Tageslichtnutzung*. Licht 7-8/96

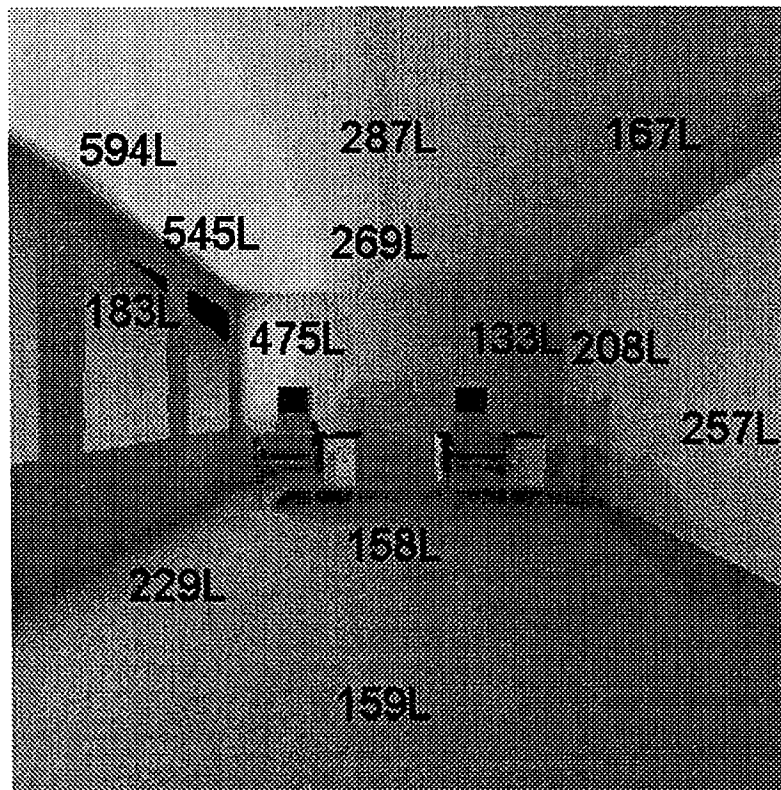
Ward G.: *The RADIANCE 2.5 Synthetic Imaging System*. LBL 1994.

Ward G.: *RADIANCE Tutorial*. LBL 1993.

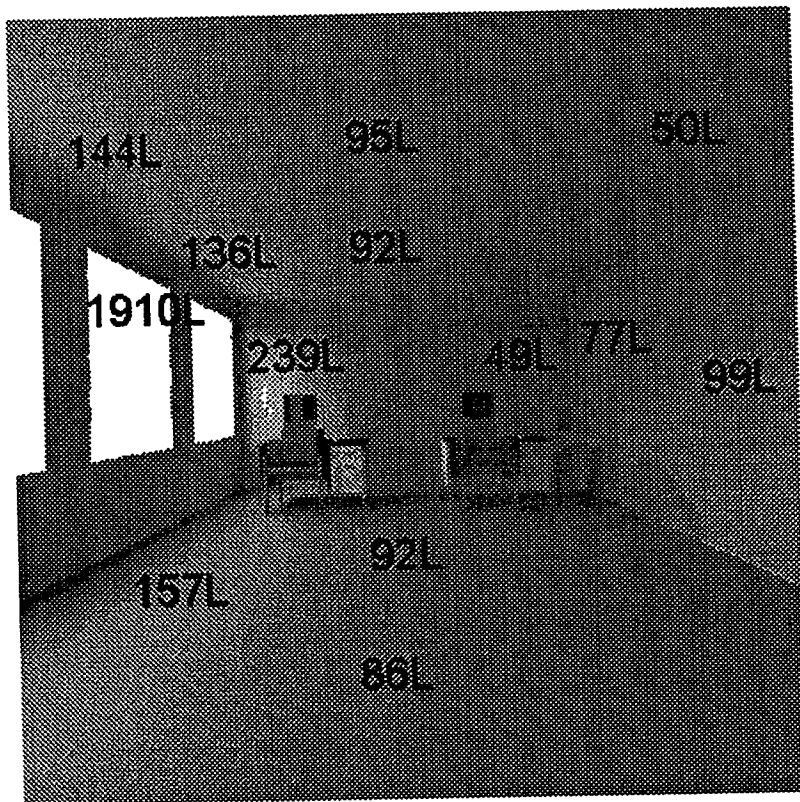
Larson C.: *RADIANCE User's Manual*. Lighting Systems Research Group LBL.



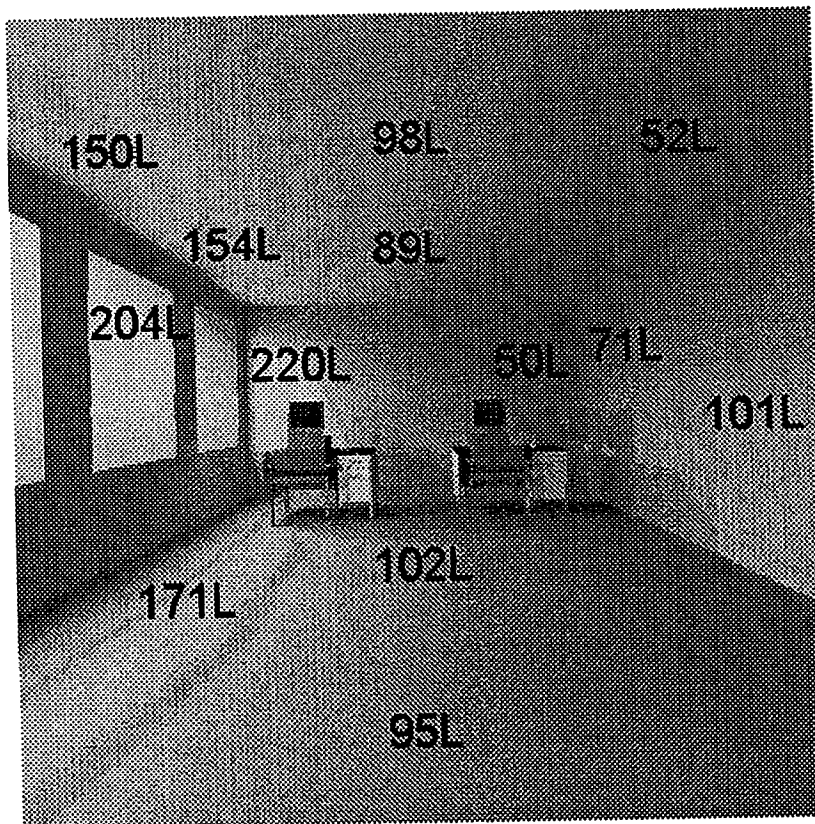
Pic 1. 15-th July 13 p.m., south side, windows with clear glass. Clear sky with sun. Medium quality rendering. Luminance in cd/m^2 .



Pic 2. 15-th July 13 p.m., south side, windows with prismatic panels. Clear sky with sun. Low quality rendering. Luminance in cd/m^2 .



Pic 3. 15-th July 13 p.m., south side, windows with clear glass. CIE standard overcast sky. Low quality rendering. Luminance in cd/m^2 .



Pic 4. 15-th July 13 p.m., south side, windows with prismatic panels. CIE standard overcast sky. Low quality rendering. Luminance in cd/m^2 .

Anwendungen angepaßter CCD-Sensortechnik in der ortsaufgelösten Lichtmeßtechnik

Fischbach Ingo, DI ^{*1)}; Schmidt Franz, PD Dr.-Ing. habil. ^{*1)};
Riemann Manfred, Prof. Dr.-Ing. habil. ^{*2)}

^{*1)} TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ehrenbergstraße 11, 98693 Ilmenau

^{*2)} Corona-Schröter-Straße 8, 98693 Ilmenau

1 Einleitung

Die ortsaufgelöste Messung der Leuchtdichte ist das angemessene meßtechnische Adäquat zum menschlichen Sehen, da das menschliche Auge ein ortsaufgelöstes Sehfeld beurteilt. Dem gegenüber ist die bisherige Praxis der Messung von einzelnen definierten Flächen meist eine Anpassung an die Technik mit Einzelempfängern und vor allem ein Entgegenkommen an die einfachen Informationen, die sich auf die Angabe einer mittleren Leuchtdichte einer bestimmten Fläche beschränkt und dementsprechend einfach verständlich ist.

Die sehr viel komplexere Arbeitsweise des Sehannes des Menschen erfordert zur Beurteilung vieler Schaufgaben die Kenntnis der Leuchtdichteverteilung im gesamten Sehfeld oder zumindest in vielen ausgewählten Teilen des Sehfeldes. Entsprechende Meßaufgaben sind mit einer punktwise arbeitenden Technik nur sehr zeitaufwendig oder nur in einem großen Raster oder gar nicht zu bewältigen.

Hier ist durch die Entwicklung von ortsaufauflösenden Empfängern, insbesondere von CCD-Matrixkameras die Möglichkeit geschaffen worden, solche Meßprobleme wie Messungen zur Blendungsbewertung nach dem UGR-Verfahren, die Erfassung von Sichtbarkeitsverhältnissen im nächtlichen Straßenverkehr (auch nach Unfällen) und die generelle Erkennbarkeit von Strukturen nach ihrem Kontrast zu lösen.

Aber auch gänzlich neue Lösungen für die Lichtmeßtechnik sind durch den Einsatz ortsaufauflösender Leuchtdichtemeßkameras möglich, wie z.B. die Bestimmung der Lichtstärkeverteilungskurven von Leuchten durch Messung in deren Nahfeld.

So kann man von der Entwicklung einer generell neuen Lichtmeßtechnik sprechen, die der fortschreitenden physiologisch-psychologischen Beurteilung von Schaufgaben angepaßt ist und sich selbst weiter vervollkommnet.

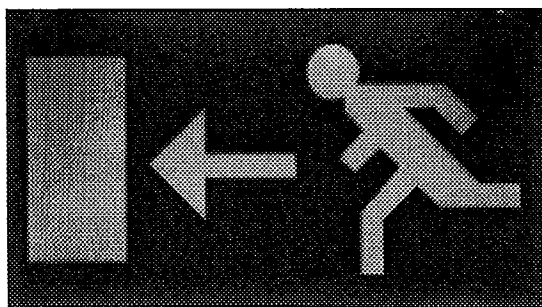


Abbildung 1 - zu vermessende Szene

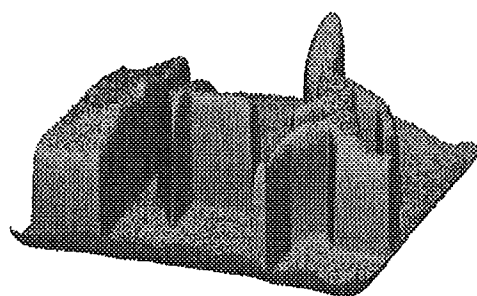


Abbildung 2 - Leuchtdichteverteilung

Die CCD-Sensorbauelemente haben seit ihrer erstmaligen Vorstellung zu Beginn der 70er Jahre eine ständige Weiterentwicklung erfahren. Von den ersten Bauelementen mit 64 * 64 Pixeln bis heute 5000 * 5000 Pixeln wurde eine gewaltige Entwicklungsarbeit geleistet, die natürlich auch auf die Verbesserung fotometrischer Parameter (Empfindlichkeit, Übersteuerungsfestigkeit, Pixelgröße, ...) zielt. Für wissenschaftliche und Sonderanwendungen (Mikroskopie, Astronomie, Raumfahrttechnik u.a.) wurden eine Vielzahl neuer Bauelemente mit hervorragenden Parametern entwickelt. Spitzenwerte sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1

hohe Auflösung	5000 * 5000 Pixel
hohe Sättigungsladung	500.000 e ⁻
geringes Ausleserauschen	5 e ⁻ (50 kHz)
Dunkelsignalgeneration	< 0,006 e ⁻ / Pixel · h (bei - 50° C)
Dynamikumfang	17 bit
Quanteneffektivität	80 % (Maximum) 40 % (250 nm) 20 % (1000 nm)
Szenenbeleuchtung	10 ⁻⁵ lux min

Damit stehen Strahlungsempfänger zur Verfügung, die gestatten, daraus entwickelte Systeme als Meßsysteme zu bezeichnen. Für abbildende Meßsysteme ist die Leuchtdichte in cd/m² die lichttechnische Größe, die dem Meßsignal direkt proportional ist und als Basisgröße erfaßt wird. Somit sind natürlich auch für von der Leuchtdichte abgeleitete lichttechnische Größen Meßsysteme realisiert worden.

Im folgenden werden einige Anforderungen an leuchtdichtemessende Systeme aufgeführt und realisierte CCD-Leuchtdichtemeßkameras eingeordnet.

2 Anforderungen an Leuchtdichtemeßgeräte / erreichbare Parameter

Der Normenausschuß Lichttechnik hat Parameter für Leuchtdichtemeßgeräte zur Klassifizierung festgelegt /DIN85/. Dabei sind die folgenden Punkte wesentlich, wenn man ein CCD-Kamerasystem zur Messung von Leuchtdichten klassifizieren will:

1. V(λ)-Anpassung an die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges
2. Räumliche Bewertung der Leuchtdichte
3. Linearitätsfehler
4. Temperaturkoeffizient
5. Fehler durch moduliertes Licht
6. Gesamtfehler

Im folgenden sollen die genannten Parameter bzw. Abweichungen genauer betrachtet und quantifiziert werden.

Zur bildauflösenden Leuchtdichtemessung werden hochwertige CCD-Digital-Kameras eingesetzt, die sorgfältig qualifiziert und kalibriert worden sind. Diese Qualifizierung, ein Problem, das elektronisch schaltungstechnische und lichttechnische Spezialisten gleicher

erfordert, konnte durch die Erfahrungen und die Zusammenarbeit der Bereiche Bildverarbeitung und Lichttechnik an der TU Ilmenau hervorragend gelöst werden. Darüber ist mehrfach berichtet worden (/LIC93/, /LIC95/, /TWK95/, /LUX95/, /OPT96/). Die Umsetzung in marktfähige Produkte erfolgt in der Firma TechnoTeam in Ilmenau.

Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über in diesem Zusammenhang gemachte Erfahrungen und erreichbare Werte.

2.1 Systematische Einflüsse

Abweichungen der Meßwerte vom idealen Verhalten, die von weniger oder mehr Parametern abhängen und immer in der gleichen Art auftreten, werden als systematische Fehler bezeichnet. Sie können erfaßt und in Abhängigkeit von anderen Parametern korrigiert werden. Damit bleiben nur noch Restfehler erhalten.

Die systematischen Restabweichungen nach der Korrektur werden in ihrer Größe durch die technologischen Voraussetzungen, die vorhandenen Kalibriermittel und die Kalibriersorgfalt bedingt. Typische Werte systematischer Einflüsse für die Leuchtdichtekamera LMK96 sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2

Fehlertyp	Fehler
V(λ)-Anpassung	f_1 < 3.5 %
räumliche Bewertung (Shading)	$f_{2(g)}$ < 1%
Einfluß der Umfeldleuchtdichte (Streulicht)	$f_{2(u)}$ < 0.2 %
Linearitätsfehler	f_3 < 0.2 %
moduliertes Licht	f_7 < 0.1%
Polarisationsfehler	f_8 < 0.7%
Abgleichfehler	f_{11} < 0.3%
Kalibrierunsicherheit	< 2 %
Dunkelstromdrift	f < 0.2 LSB
Ermüdung	f_5 < 0.06%
Gesamtfehler	f_{ges} < 10%

2.1.1 V(λ)-Anpassung

In den CCD-Kameras zur Leuchtdichtemessung wird ein speziell für den eingesetzten Matrixsensor berechnetes Vollfilter verwendet. Im Vergleich zu Einzelsensoren kann keine Partialfilterung angewandt werden, da eine Vielzahl von Pixeln gleichzeitig angepaßt werden muß. Die Anpassung erfordert die exakte Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit der eingesetzten CCD-Matrizen, einen Optimierungsprozeß zur

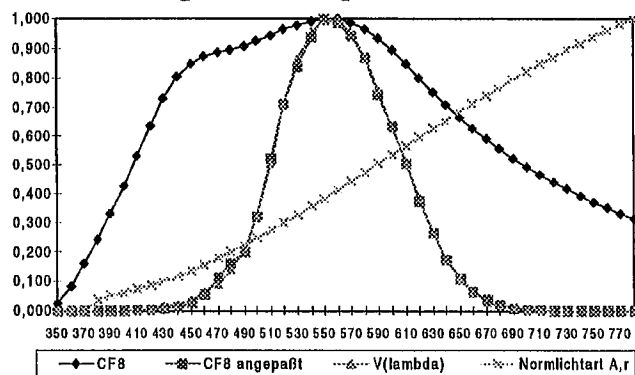


Abbildung 3 - spektrale Anpassung der CCD-Kamera CF8

Kombination von Filtergläsern und deren Dicken (der Erfahrung voraussetzt /STE95/), und die Fertigung der Filter in einer guten feinoptischen Werkstatt. Weitere Probleme für die $V(\lambda)$ -Anpassung (z.B. Änderung der Transmission und damit der Filterkurve für schräg durchgehende Lichtstrahlen) wurden untersucht und Lösungen gefunden. Die erreichten Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

2.1.2 Räumliche Bewertung / Shading

Die ungleichmäßige Empfindlichkeit (Shading) der einzelnen Sensorpixel wird hauptsächlich durch den \cos^4 -Randabfall des Objektivs bestimmt. Bei Teleobjektiven ist der Randabfall vergleichsweise klein, erreicht jedoch für Weitwinkelobjektive beim Vergleich zwischen zentralen und Randpixeln nicht zu vernachlässigende Werte.

Weitere Shading verursachende Größen sind die unterschiedlichen fotometrischen Empfindlichkeiten der einzelnen Pixel. Der Verlauf des Shadings wird in der Kalibrierphase gemessen. Diese Meßwerte dienen zur Korrektur. Die Erfassung muß natürlich mit entsprechender Sorgfalt und dem notwendigen Equipment erfolgen. Der erreichte Restfehler $f_{2(g)}$ ist kleiner als 1%.

2.1.3 Dunkelstrom

Auch wenn kein Licht in die Kamera fällt, werden thermisch Ladungen generiert. Dieser sogenannte Dunkelstrom ist abhängig von der Temperatur der Kamera und vom Ort des Bildpunkts. Die Abhängigkeiten werden in der Kalibrierphase meßtechnisch erfaßt und bei der Messung korrigiert.

2.1.4 Umfeldleuchtdichte / Streulicht

Die Umfeldleuchtdichte wirkt sich durch Streulicht fehlerhaft auf die zu vermessenden Leuchtdichten aus.

An Trennflächen von unterschiedlichen optischen Materialien (Glas/ Luft) kommt es zur teilweisen Reflexion des einfallenden Lichtes. Auch an hochvergüteten Oberflächen in Objektiven ist dieser Anteil nicht vernachlässigbar (bis 1%). Beim Lichtdurchgang durch viele Grenzflächen verstärkt sich dieser Effekt zu merklicher Größe. Nicht zu vernachlässigen ist auch die Reflexion an der Oberfläche der CCD-Matrix. Der Reflexionsfaktor von Silizium liegt etwa bei 65 %. Bei vielen Objektiven für CCD-Kameras, die aus bis zu 7 Einzellinsen und 13 bis 15 Linsen bei Zoom-Objektiven bestehen, d.h. viele streuende Flächen besitzen, erreicht der gestreute Lichtanteil zu beachtende Größenordnungen. Die Firma TechnoTeam verwenden speziell für Leuchtdichtemeßkameras gerechnete streulichtarme Objektive.

Für Einzelsensoren als Meßaufnehmer gibt die DIN 5032/6 eine Meßvorschrift für den Einfluß der Umfeldleuchtdichte. Die flächenhafte Struktur eines Matrixsensors erlaubt zusätzlich die Erfassung der örtlichen Verteilung dieses Einflusses auf den Empfänger. Ein wie in Abbildung 4 gezeigter Meßaufbau wurde realisiert. Zur Bestimmung wurde ein Teil der Bildfläche wurde mit Licht

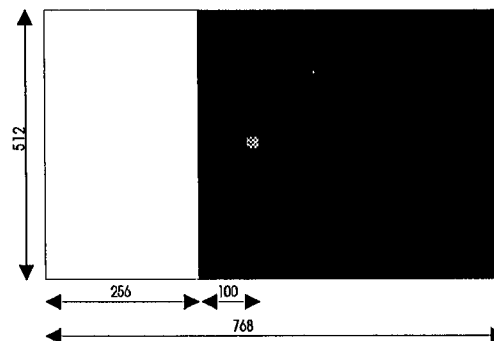


Abbildung 4 - Aufbau zur Streulichtuntersuchung

näherungsweise konstanter Leuchtdichte beleuchtet. Entlang der horizontalen Linie wurden die Leuchtdichten gemessen. In 100 Bildpunkten Entfernung (graues Viereck) wurde z.B. 0.2% der Leuchtdichte des hellen Gebiets erfasst. Durch Korrekturalgorithmen verringert sich dieser Fehler noch um eine Größenordnung.

2.1.5 Linearität

Die Kennlinie zwischen der auf das Pixel treffenden Beleuchtungsstärke und den generierten Meßwerten ist nichtlinear. Ursachen sind:

- Nichtlinearitäten der Kameraelektronik
- Sättigungseffekte bei der Ladungserzeugung auf dem CCD-Chip

Die Nichtlinearität wird in der Kalibrierphase gemessen und durch Anpassung der A/D-Wandlerschwellen reduziert. Dies führt zu einem verbleibenden Fehler von 1%, der durch softwaretechnische Korrekturen auf 0.2% reduziert wird.

2.1.6 Abgleichfehler

Abgleichfehler entstehen dann, wenn die Kalibrierung in einem Meßbereich erfolgt und die anderen an diesen angebunden werden. Die erreichbaren Abgleichfehler bewegen sich in der Größe von 0.5%.

2.1.7 Moduliertes Licht

Die Einstellung der Meßbereiche erfolgt durch die Wahl der Kameraintegrationszeit und/oder Neutralglasfilter. Für mit Wechselfrequenz betriebene Leuchten müssen deshalb die Integrationszeiten größer als die Perioden der Versorgungsspannung gewählt werden.

2.1.8 Polarisationsfehler

Die Abhängigkeit der CCD-Kamera von polarisiertem Licht wurde geprüft. Es wurden keine signifikanten Fehlerwerte gefunden.

2.1.9 Kalibrierunsicherheit

Die absolute Kalibrierung der Meßkamera erfolgt mit Hilfe eines zertifizierten Leuchtdichtenormals. Damit ist die Rückführung des Meßgerätes auf nationale und internationale Standards gegeben.

2.1.10 Ermüdung

Laut DIN 5032/6 wird die reversible Änderung der Meßwerte im fortlaufenden Betrieb des Meßgerätes durch den Parameter Ermüdung gekennzeichnet. Bei Einhaltung einer ausreichenden Einlaufzeit und thermischer Stabilisierung ist der Fehler bei CCD-Matrixkameras vernachlässigbar klein.

2.2 Stochastische Fehlerquellen

Ursache stochastischer Fehler sind Rauschprozesse. Als Rauschursachen wirken:

- signalabhängiges Rauschen (Photonenrauschen)
- signalunabhängiges Rauschen (Kameraelektronik, Zeilenklemmrauschen)
- Digitalisierungsrauschen bei der Analog-Digitalwandlung

Bei den von uns eingesetzten Kameras ergibt sich durch diese Rauschprozesse eine Streuung von etwa 0.7 LSB (least significant bit) bei 8 bit Auflösung für einen einzelnen Pixelgrauwert.

Die örtliche Auflösung von CCD-Matrizen (752 * 576) geht für viele fotometrische Meßaufgaben weit über das geforderte hinaus. Die darin enthaltene redundante Information läßt sich günstig in fotometrische Auflösung umsetzen.

Das Rauschen kann durch die Mittelung über Makropixel (Zusammenfassung von n benachbarten Bildpunkten) im Verhältnis \sqrt{n} verringert werden. Da fotometrisch und bildauflösend messende Systeme vielfach mit wesentlich weniger als 752 * 576 Meßwerten im Bildfeld auskommen, können ausreichende Rauschunterdrückungen erreicht werden. Mit dem eingesetzten Systemen sind 11 bit Auflösung erreichbar.

Die Bestimmung von Korrekturdaten für Shading, Dunkelstrom, Linearität etc. setzt auf gemessenen Pixelgrauwerten auf. Deshalb sind auch die Korrekturdaten prinzipiell mit einer Meßunsicherheit behaftet, die sich durch Mittelung über mehrere Messungen verringern, aber nicht vollständig beseitigen läßt. Bei der Angabe der Größe der Fehler im vorigen Abschnitt wurde dies bereits berücksichtigt.

2.3 Berechnung der Leuchtdichte aus dem Pixelgrauwert

Aus der Gleichung zur Berechnung eines Leuchtdichtewertes aus dem Pixelgrauwert gehen die einzelnen Einflußgrößen hervor.

$$L = [GW(i, j, t) - DS(t) - DS(i, j)] * LN(GW) * SH(i, j)$$

Die vorkommenden Größen sind:

- GW(i,j,t) Grauwert des Pixels am Ort (i,j) zum Zeitpunkt t
- DS(t) zeitabhängiges Dunkelsignal (Temperatur kann sich mit der Zeit ändern)
- DS(i,j) ortsabhängiges Dunkelsignal, Bestimmung in der Kalibrierphase
- LN(GW) Linearitätskorrektur, Bestimmung der Werte in der Kalibrierphase
- SH(i,j) Shadingkorrektur im weiteren Sinne, beinhaltet sowohl die Korrektur des eigentlichen Shadings als auch die Absolutwertkalibrierung

Die Genauigkeit der berechneten Leuchtdichte ergibt sich durch die Fehlerfortpflanzung der oben erläuterten Restfehler der einzelnen Einflußgrößen.

2.4 Auflösung und Dynamikumfang

Wie schon im Abschnitt „Stochastische Fehlerquellen“ erwähnt kann die fotometrische Auflösung durch Mittelung über Makropixel bis auf 11 bit erhöht werden. Dies bedeutet jedoch den Verlust der örtlichen Auflösung.

Um die örtliche Auflösung trotzdem zu erhalten, erfolgt in den realisierten Systemen die Mittelung über mehrere Bilder (zeitliche Mittelung) nach dem in Abbildung 5 gezeigtem Algorithmus.

Die Dynamik einer einzelnen Aufnahme ist durch die 8 bit Auflösung auf 1 : 256 beschränkt. Zu einer beträchtlichen Erhöhung des Dynamikumfangs im Leuchtdichtebild gelangt man, wenn Kameraaufnahmen mit unterschiedlichen Integrationszeiten zur Berechnung eines Leuchtdichtebildes herangezogen werden. Als Verbesserung des Dynamikumfangs wird dabei verstanden, daß auch im Vergleich zu den im Bild auftretenden Maximalwerten sehr kleine Leuchtdichten mit einer guten Genauigkeit bestimmt werden.

Die Grundidee besteht darin, die Leuchtdichte sehr heller Bildteile aus Bildern mit einer kurzen Integrationszeit, die Leuchtdichte dunkler Bildteile aus Bildern mit langer Integrationszeit zu bestimmen. Dabei sind in den Bildern mit langer Integrationszeit die hellen Bildteile bereits übersteuert. Deshalb muß im Algorithmus zur Berechnung der Leuchtdichte dieses Verhalten berücksichtigt werden.

In Abbildung 6 ist dieser implementierte Algorithmus dargestellt.

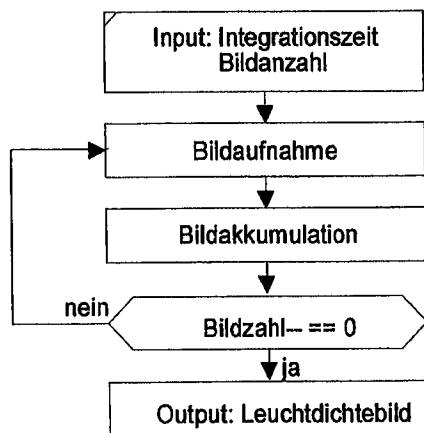


Abbildung 5 - Mehrfachmessung

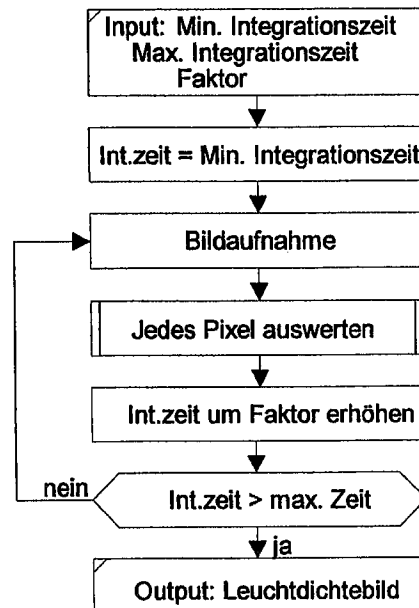


Abbildung 6 - Messung hoher Dynamik

2.5 Einordnung in Güteklassen

In der Unterteilung der Leuchtdichtemesser in Klassen nach DIN /DIN85/ ordnen sich die CCD-Meßsysteme entsprechend Tabelle 3 in die Genauigkeitsklasse B ein, wobei gilt:

- L höchste Genauigkeiten
- A hohe Genauigkeiten
- B mittlere Genauigkeiten
- C geringe Genauigkeiten

Tabelle 3

Merkmal	Klasse L	Klasse A	Klasse B	Klasse C
V(λ)-Anpassung	1.5 %	3 %	6 %	9 %
Cosinus-Treue	1.5 %	1.5 %	3 %	6 %
Linearitätsfehler	0.2 %	1 %	2 %	5 %
Temp.Koeffizient	0.1 %/K	0.2 %/K	1 %/K	2 %/K
moduliertes Licht	0.1 %	0.2 %	0.5 %	1 %
Gesamtfehler	3 %	5 %	10 %	20 %

Weitere Anforderungen /DIN90/ stellen folgende Parameter dar, die nicht in die Klassifizierung von Leuchtdichtemeßgeräten eingehen.

1. 10 cd/m² kleinster Meßbereich mit einer Auflösung von 100 Digit
2. Meßfeldgröße kleiner als 1°
3. minimaler Meßabstand kleiner als 1m

Mit CCD-Leuchtdichtemeßkameras sind sowohl die fotometrischen (1.) als auch die geometrischen (2.) Forderungen problemlos erreichbar. Punkt (3.) ist durch angepaßte optische Abbildungssysteme ermöglicht, wobei realisierte Systeme Wechselobjektive mit Bajonett-Verschluß verwenden.

Die obigen Forderungen sind sinnvoll, wenn man die real auftretenden Leuchtdichten betrachtet. Sie bewegen sich von ca. 0,7 cd/m² für die mittlere Leuchtdichte bei Straßenbeleuchtungen bis ca. 20 Mcd/m² für Leuchtdichten von Lampen. Die Messung von Leuchtdichten ist in vielen Fällen die Voraussetzung zur Bestimmung weiterer lichttechnischer Größen wie z.B. Kontraste, Blendungen und Schleierleuchtdichten. Zusätzlich kann die örtliche Beleuchtungsstärkeverteilung aus der Leuchtdichte über geeignete Reflexionsnormale berechnet werden. Für solche Anwendungen stehen spezielle Lösungen zur Verfügung.

2.6 Erfassung der Geometrie

Für eine Reihe von Aufgabenstellungen reicht die visuelle Beurteilung der Ortszuordnung (Festlegung von Meßpunkten, Meßfeldern, Meßlinien) nicht aus, sondern ist die hochgenaue Ortsanbindung der Leuchtdichtedaten L(x,y) notwendig. Dies ist durch die Geometrie des Sensors (Matrix) im Bild gegeben oder durch Korrektur der durch die Optik verursachten Verzeichnung erreichbar. Für die Zusammensetzung von mehreren Bildern (Scannen) sind zudem die exakten Daten über die Kameraposition und -ausrichtung notwendig. Dies betrifft z.B. Nahfeldgoniometer zur Lichtstärkeverteilungsmessung und Goniometer zur Blendungsbewertung nach UGR. Hierzu sind weitere Überlegungen und Maßnahmen notwendig (Verzeichnung des Objektivs, Pixelapertur, die MTF des Objektivs, u.a.). Diese werden im Bereich der geometrischen Meßtechnik mit bildauflösenden Systemen ausreichend behandelt und können dort nachgesehen werden.

3 Realisierungen von bildauflösenden Leuchtdichtemeßsystemen

Unter Berücksichtigung der oben genannten Probleme hat die Firma TechnoTeam Systeme entwickelt, die die Messung lichttechnischer Größen erlauben.

Der prinzipielle Aufbau einer CCD-Leuchtdichtemeßkamera ist in Abbildung 7 dargestellt.

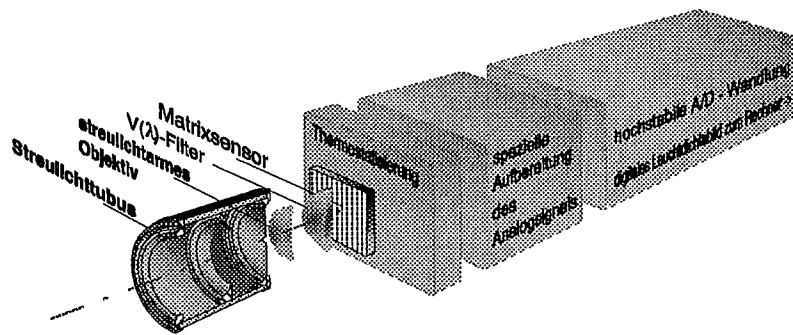
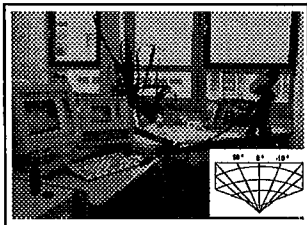


Abbildung 7 - LMK 96

Die portablen Leuchtdichtemeßkameras (LMK) mit umfangreicher Basissoftware werden zur Bewertung von Leuchtdichteverteilungen angewandt. Mit dieser Leuchtdichtemeßkamera wurde nach einer Idee von Prof. Riemann eine Goniofotometer zur Bestimmung von Lichtstärkeverteilungen von Leuchten und Lampen im Nahfeld (RIGO) entwickelt. Leuchtdichtemeßkameras werden weiterhin zu Forschungszwecken eingesetzt, z. B. im Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau für die Entwicklung eines Meßgerätes zur Blendungsbewertung nach UGR.

Beispielhaft sind einige Anwendungen der Leuchtdichtemeßkamera aufgeführt:

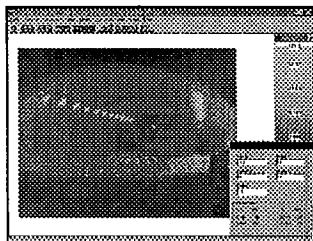
3.1 Innenraummessung



Wichtige lichttechnische Kenngrößen im Innenraum hängen unmittelbar mit der Leuchtdichte von Objekten und Umgebung zusammen:

- Kontraste (z.B. CRF-Messung)
- Blendung (UGR ist nur bildauflösend meßbar)

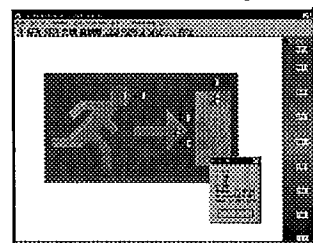
3.2 Vermessung von Straßen und Tunnel



Die DIN5044 und DIN67524 schreiben die notwendigen Leuchtdichten für Straßen und Tunnel vor. Die Erfassung einer Vielzahl von Meßpunkten ermöglicht die schnelle Vermessung unterschiedlicher Beleuchtungssituationen:

- minimale, maximale und mittlere Leuchtdichten
- Gleichförmigkeiten g_1 und g_2
- prozentuale Schwellenerhöhung TI

3.3 Vermessung von Leuchten und Anzeigeelementen



Die Leuchtdichteverteilung ist ein wesentliches Kriterium zur Kennzeichnung von Leuchten. Neben der Qualitätssicherung zur Realisierung entsprechender Vorschriften wird sie auch marktwirksam in Katalogen verwendet.

- zeitlicher Verlauf z.B. bei Notstromversorgung
- Blendung und Kontraste

3.4 Bildauflösende Messung von Lichtstärkeverteilungen

Zur Berechnung von Beleuchtungsstärken bei der Beleuchtungsplanung geht man von der Lichtstärkeverteilung der Leuchten aus, wobei man das fotometrische Entfernungsgesetz zugrunde legt.

Auf der Basis einer Idee von Prof. Riemann /LIC93/ wurde in der Firma TechnoTeam unter Einsatz einer Leuchtdichtemeßkamera LMK ein Lichtstärkeverteilungsmeßplatz entwickelt, der Abmessungen erfordert, die nur unwesentlich über denen der Leuchte liegen und die Leuchte bei der Messung nicht bewegt. Die in dem Meßplatz verwirklichte Grundidee besteht darin, die Leuchte in virtuelle kleine Elemente zu zerlegen, deren Lichtstärken in entsprechende Richtungen zu ermitteln und diese für alle Richtungen über alle Elemente zu summieren sind.

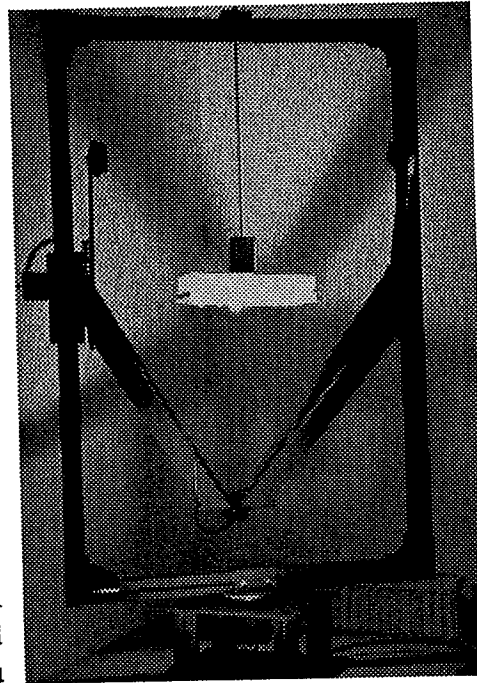


Abbildung 8 - Goniometer RiGO

Neben den Goniometern mit Einzelsensoren (Drehspiegelgoniometer, Goniometer, Leuchtenwender u.a.) hat sich das Goniometer nach Prof. Riemann mehrfach in Industrie und Forschung bewährt.

Die realisierten Meßanlagen zeigten bei Vergleichsmessungen Ergebnisse mit 2 % bis 5 % Abweichungen. Dabei wurden Vergleichsmessungen an einem Drehspiegelgoniometer, an einem Goniometer mit einem bewegten Empfänger an einem langen Ausleger sowie an Leuchtenwendern durchgeführt/LIC95/.

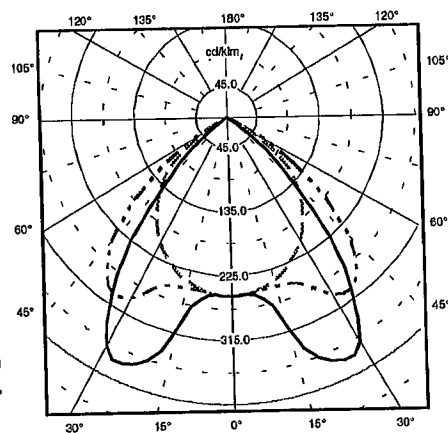


Abbildung 9 - LVK im Polardiagramm

Literaturquellen:

- /DIN85/ DIN 5032 Lichtmessung-Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemeßgeräten; Teil 7 Dez. 1985
- /DIN90/ DIN 5035 Beleuchtung mit künstlichem Licht - Begriffe und allgemeine Anforderungen; Teil 1 Jun. 1990
- /LIC93/ M. Riemann, F. Schmidt, R. Poschmann: LICHT 7-8 / 1993, Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung mittels eines bildauflösenden Goniometers; S. 592-597
- /VIS94/ F. Schmidt: Vision Jahrbuch 1994, Photometrische bildauflösende Meßtechnik; S. 46-48
- /LIC95/ M. Riemann, F. Schmidt, I. Fischbach: LICHT 7-8 / 1995; Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilungen von Leuchten aus bildauflösenden Messungen in ihrem Nahfeld
- /TWK95/ Fischbach, I.; Schmidt, F.: Anwendungen angepaßter CCD-Sensortechnik in der fotometrischen Lichtmeßtechnik, 40. Intern. Wiss. Kolloq. d. TU Ilmenau, 18.-21.9.95, Tgb. S. 714 - 719
- /LUX95/ Schmidt, F.: Einsatz der CCD-Technik für bildauflösende Lichtmeßtechnik, Lux-Junior, 2. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, Dörfeld 1995
- /STE95/ Stefanow, E: V(λ)-Anpassung eines bildauflösenden Lichtempfängers, Dissertation TU Ilmenau 1995
- /OPT96/ Schmidt, F.: Bilddatenauswertung zur Erfassung geometrischer und fotometrischer Relationen, Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 1997 (44. Jhrg.), Herausgeber: Prenzel, W.-D.; S. 82 - 116

Individualität par excellence - oder Eine flexible Technologie zur Erstellung von anpassungsfähigen Softwarelösungen für die Lichtbranche

Einführung:

Jeder, der schon einmal mit der Aufgabe einer Lichtplanung in Berührung gekommen ist, hat mit Sicherheit eine gewisse Vorstellung von dem, was Lichtplanungssoftware ist und sein sollte. Diejenigen, für die die Lichtplanung den Alltag bedeutet, haben sogar weit konkretere Vorstellungen, über das Was und Wie einer guten Lichtplanungssoftware. Leider ist es immer eine schwere Aufgabe, letzterer Gruppe entgegen zu kommen; denn was ist wirklich "gut"? Ein Programm kann, verständlicherweise, "nur" so gut sein, wie die Hardware und das Betriebssystem, die es tragen. Diese setzen die theoretische Obergrenze des Machbaren. Unterschiede ergeben sich beispielsweise, wie nahtlos eine Software mit ihrer eigenen Logik im gesamten Hardware-Betriebssystem-Umfeld eingebettet ist, und wie weit sie in der Lage ist, diese Leistungsfähigkeit bis zu der angesprochenen Grenze auszuloten.

Analyse:

Die Entwicklung der lichttechnischen Software hat viele Jahre verschenkt, um gegen die DOS-Windows 3.x-Mauer anzurennen, und gegen die Schranken anzukämpfen, die gar nicht ihre eigenen waren. Alle Versuche, existentielle Probleme, die unakzeptablen Rechenzeiten, permanenter Speichermangel etc., mit Hilfe von dynamischen Strukturen, objektorientierten Konzepten und zweckoptimierten Algorithmen zu erschlagen, waren grundsätzlich zu einem nur mäßigen Erfolg verurteilt. Leider hat dies all zu lange Zeit die Denkweise bei der technischen Algorithmenerstellung und sogar bei der entsprechenden Normgebung (zu minimalistischem Denken) geprägt. Dies ist ein schweres Erbe, das es erst abzubauen gilt.

Die rasante Entwicklung in der Hardwaretechnologie und der Betriebssystemsoftware für den Massenmarkt, eröffnet den Softwareentwicklern jetzt neue, uneingeschränkt erscheinende Horizonte. Neue globale Chip-Technologien, wie z.B. der Power PC-Chip, sowie die darauf basierenden plattformübergreifenden Systemkonzepte und Systemtechnologien, werden mit zunehmendem Tempo und Qualitätszuwachs neben dem dominierenden Wintel-Tandem die zukünftigen Entwicklungen bestimmen. Diese neue Freiheit wahrzunehmen, möchten wir Ihnen darlegen. Wir zeigen Ihnen heute den Versuch, auf der Basis der IBM PC-Windows (32-Bit)-Plattformen praktisch umgesetzte Firmen-Softwarelösungen für die Innen- und Außenbeleuchtung.

Ausgangsbasis

Zwei der folgenschwersten Ereignisse der jungen Entwicklung des PC-Marktes sind die erfolgreiche Etablierung der oberen Pentium-Leistungsklasse, als quasi Standard-PC, und die endgültige Einführung des 32-Bit-Betriebssystems mit Windows 95 und Windows NT. Sie verursachten eine spürbare Bewegung auch auf dem lichttechnischen Softwaremarkt. Die vereinten Bemühungen einiger der bedeutendsten lichttechnischen Firmen, ein deutsches Standard-Lichtberechnungsprogramm "DIALUX" zu etablieren, sowie die Versuche einiger anderer Hersteller im Alleingang, diese spezielle Art von Software zu entwickeln, sind ein guter Beweis für die Aktualität der Stunde.



In hinreichender Kenntnis und vollem Respekt vor den jeweiligen Ideen und Konzepten haben wir nach langjähriger Vorbereitung versucht, alternative Wege zu gehen. Gleich an dieser Stelle haben wir die Chance genutzt, Ballast abzuwerfen, indem wir konsequent 32-bitig wie bei der neuen Systemsoftware gedacht haben, ohne der bremsenden rückwärtskompatiblen Lauffähigkeit nachzutruern. Nur so gelang es, die notwendigen Programmstrukturen nach einer "optimalen bis maximalistischen" Denkweise zu gestalten. Alle Programmteile sind ausnahmslos neu und Windows gerecht geschrieben worden. Alle Kompromisse, existierende oder unter anderen Voraussetzungen erstellte Code-Segmente zu berücksichtigen und diese anzupassen, wollten und konnten wir uns nicht erlauben. Nur so haben wir bei der heutigen Schnelligkeit der Software eine faire Zeit vor uns, um nach Beseitigung der Kinderkrankheiten, noch aktuell und vielleicht auch zukunftsicher zu sein. Obwohl dieses Ziel erreicht ist, wie der eineinhalbjährige Praxiseinsatz beweist, haben wir die dadurch gewonnenen Qualitäten mehr als eine Grundvoraussetzung betrachtet. Sie bewirken eine erhöhte Programmstabilität und Programmrobustheit. Da diese Merkmale erst bei einer Nutzung in Erscheinung treten, gewinnt das Programm dadurch noch lange nicht an Marktattraktivität. Wir haben uns bemüht, dies auf andere Art zu erreichen. Wir haben uns immer relativ zu den Interessen der anvisierten Interessenten zu orientieren versucht.

In absehbarer Zeit ist noch zu erwarten, daß es auch weitere ungebundene Leuchtenfirmen geben wird, die selbst nach verbesserten Marktchancen und ausdruckskräftigeren Verkaufsargumenten suchen. Sie wollen und werden auf eine lichttechnisch gute und im Rahmen eines firmeneigenen Gesamterscheinungsbildes eingebettete Softwarelösung setzen. Die deutliche Tendenz der Verlagerung der Interessen von einer vorkonfektionierten, starren Berechnungssoftware zu einer immer mehr individuell angepaßten und flexiblen Individuallösung, setzt die eigenen Entwicklungsleute, sowie die klassischen, branchenbekannten (brancheneigenen) Softwareanbieter vor deutliche Schwierigkeiten. Eigene Entwicklungen sind unter den herrschenden Voraussetzungen nahezu unbezahlbar geworden. Gleichzeitig sind die Softwareanbieter gezwungen, im immer härter umkämpften Markt mit geringeren Spannen in immer kürzer werdenden Zeiten, neue kundenangepaßte Lösungen zu schaffen. Da dieses selten mit dem Einzelergebnis zu rechtfertigen ist, werden häufig oft schon existierende Anwendungen schnell angepaßt, und damit werden ungewollt Probleme eingebaut. Dies hat der ahnungslose Nutzer in "erzwungener Mitarbeit" zu erdulden und auszuloten. Die latente Unzufriedenheit bei den Nutzern sichert denjenigen Anbietern eine nicht zu unterschätzende Marktnische, die die scheinbar schnellste und überzeugendste Lösung sofort anbieten. Dies liefert aber à la longue für beide Seiten, für Nutzer und für Hersteller, keine befriedigende Ergebnisse.

Lösungsschritte:

Langjährige unmittelbare Beobachtungen und Analysen haben die immer wachsende softwaretechnische Entwicklererfahrung unterstützt, um eine globale Softwarephilosophie zu schaffen. Nur sie ermöglicht es, mit zeitlich und finanziell minimal gehaltenem Einsatz, optimale, individuelle und damit kundenangepaßte Softwarelösungen lichttechnischer Probleme zu kreieren, die in eine globale Struktur eingebettet, für den Softwarehersteller keine Sonderlösung darstellen. Die Inspiration zu dieser Entwicklung steckt außer im Enthusiasmus der Beteiligten, auch in den durch die globalen industriellen Entwicklungen in letzter Zeit geprägten Begriffen wie: "lean production", "just in time", "delivery on demand". Diese Begriffe beinhalten die Bemühungen, die globalen Kosten und den Zeitaufwand eines Gesamtprozesses überall dort zu reduzieren, oder zu eliminieren, wo sie nicht unvermeidbar sind. Durch diese gewonnenen Freiräume sichert man sich Preisvorteile, oder man kann weitere Bemühungen in die relevanten und vorteilhaften Schlüsselemente des Produktes investieren, um diese auszubauen.

Die Verwirklichung dieser Grundidee setzt eine sehr tiefe und möglichst objektive Kenntnis aller Teilelemente des Gesamtherstellungsprozesses voraus. Dies erreicht man häufig in der kreativen Inhomogenität eines interdisziplinären, kooperierenden Entwicklungsteams (deterministisches Chaos!). Die wesentlichen Gesichtspunkte wurden gemeinsam auf einer sehr hohen Abstraktionsebene getroffen und erst nach der Fertigstellung des Gesamtkonzeptes in die konkrete Form umgesetzt. Das Konzept ist universell, es ist nicht von der Art und der spezifischen Lösung der konkreten Ausführung abhängig. Die Entwurfs- und Herstellungsmethoden sind reproduzierbar und gewährleisten jedem Fachmann, in der ihm gewohnten Entwicklungsumgebung zu arbeiten. So entstehen qualitativ hochwertige Einzelkomponenten, die füreinander bestimmt sind und miteinander wirken. Die resultierende Software vereint aus der abgehobenen Komplexitätsstufe alle Elemente und fügt sie zu einer nahtlosen Einheit zusammen. Ständige Plausibilitätstest und fallselektive Elemente einer quasi "künstlichen Intelligenz" steuern und kontrollieren den Datenfluß des Arbeitsprozesses selbst. Die Softwareergonomie bildet dabei die allen übergeordnete Schale. Das Programm ist in der Lage, stufenlose Einstellungsmöglichkeit zu schaffen, etwa zwischen "idiotensicher" bis völlig "frei". Die Herstellungstechnologie ist so gewählt, daß jedes wesentliche Merkmal des Endproduktes in breiten Toleranzgrenzen editiert werden kann, um das individuelle "Optimum" zu erreichen. Dies ist der Lohn einer einzigartigen Flexibilität. Damit kann die mögliche Zielgruppe von Nutzern wesentlich erweitert werden.

Features and highlights

Im Folgenden führen wir einige bei der Erstellung der Software zu berücksichtigende Gesichtspunkte auf, die wir für wesentlich, ja entscheidend, halten.

- Profil der möglichen Softwarenutzer nach individuellen Wünschen umsetzen
- Das Bedarfsprofil des Auftraggebers, seine Ziele und Möglichkeiten, in der Vertriebskette gestalten.

1. Kundenspezifische Parameter

Die Kernfrage, die sich dahinter verbirgt, ist eindeutig.

Welches Ziel wird mit dem Einsatz dieses Produktes aus Leuchtenherstellersicht verfolgt, und welchen Anspruch hat der jeweilige Nutzer?

Dazu ein Beispiel:

Verfolgt der Leuchtenhersteller mit dieser "seiner" Software das Ziel, einer offensiven Beratung (offenes Berechnungssystem ohne Verschlüsselung der LVK-Daten) oder will er lieber ein Stand-alone-Produkt (nur die eigenen Herstellerdaten werden implementiert)? Ist das Herstellerprogramm als Vertriebs Hilfsmittel, mit anderen speziellen Leuchten und sonstigen technischen Daten auszustatten?

2. Plattformspezifische Parameter

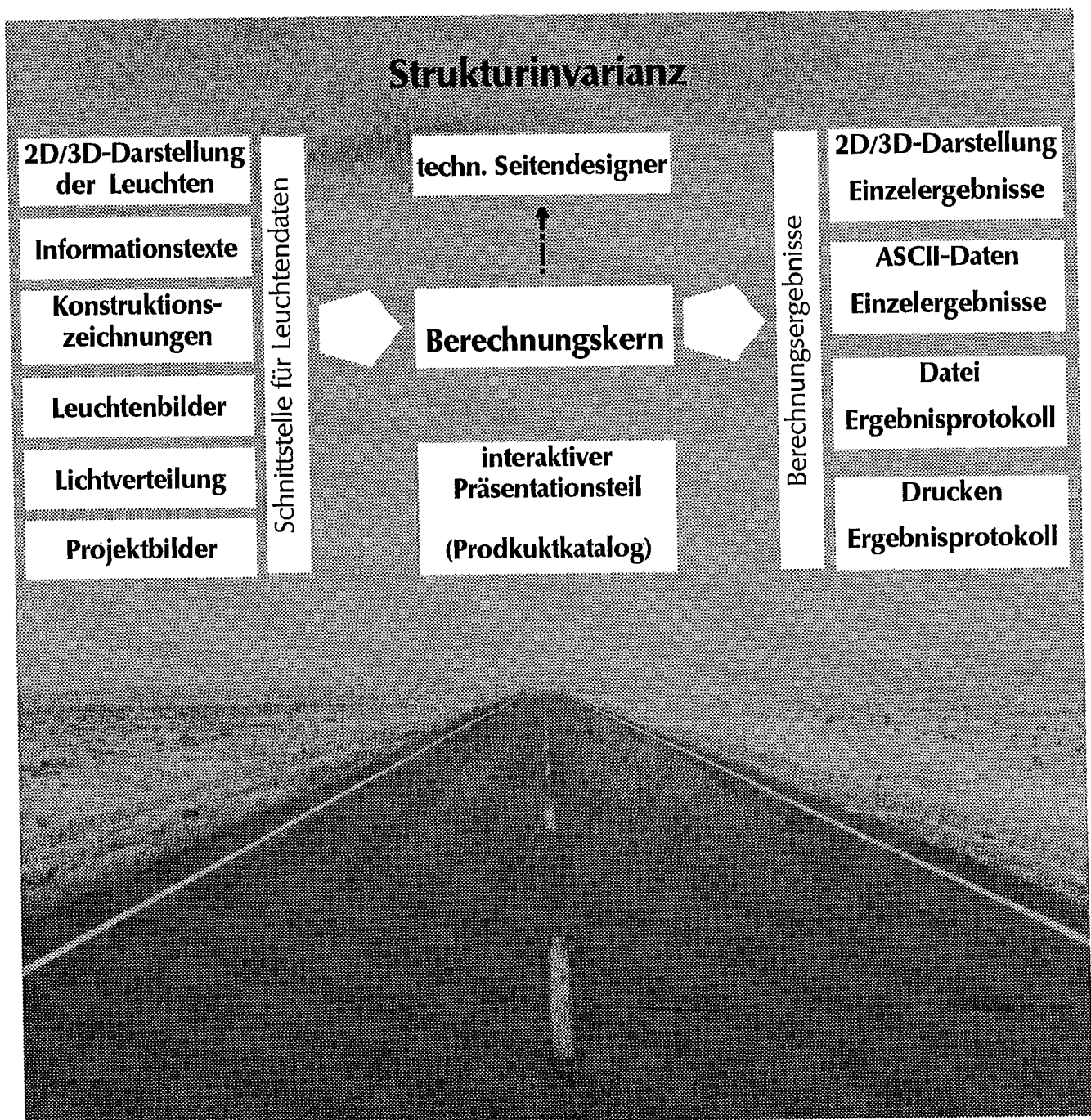
Auf wieviel verschiedenen Hardwareplattformen und Konfigurationen ist der Einsatz der Software vorgesehen?

3. Beabsichtigte lichttechnische Hauptanwendungsgebiete

Welche Berechnungsmodelle sind notwendig, um die beabsichtigten lichttechnischen Hauptanwendungsgebiete abzudecken?

4. Erforderliche und verfügbare Softwaretechnologien

5. Erforderliche Hilfssoftware, Softwareschutz und sonstige Anforderungen



Ergebnis:

Die hier gezeigte Software demonstriert die Relevanz der aufgeführten Punkte, wie schon erwähnt. Die Zielgruppe der vorgestellten Entwicklung sind lichttechnische Firmen oder unabhängige Planungsbüros, die auf der Suche nach einem geeigneten "eigenen" Lichtplanungsprogramm für die Unterstützung der täglichen Akquisition sind und neben der klassischen lichttechnischen Aufgabe gleichzeitig andere artverwandte Marketingaufgaben lösen möchten oder müssen.

Solche Interessengruppen besitzen allzuoft eine eigene Vorstellung zu der gewünschten Anwendung. So lange man noch nicht in der Lage ist, eine eierlegende Wollmilchsau zu klonen, versucht man alle nicht-utopischen und sinnvollen Wünsche in einem logischen (?), realisierbaren (?) und ergonomisch sinnvollen Programm unterzubringen. Es ist im Sinne einer flexiblen und kostengünstigen Erstellungstechnologie notwendig, wenn man im Laufe der Zeit nicht ständig an neuen Modellen arbeitet, sondern stets ein globales Konzept (Strukturinvarianz) verfolgt, das immer weiter vervollständigt wird, was man auch immer praktiziert. Dieses soll im Sinne eines kleinsten gemeinsamen Vielfachen aller eingebrachten Anforderungen verstanden werden.

Natürlich sind damit auch Risiken verbunden. Die logische Befürchtung, daß die beherrschbare Größe bald überschritten wird, kann man abwenden, da dazu andere Regularien existieren (Modularität). Jede Ergänzung sollte man erst nach einer Abwägung des Wechselwirkungsspiels zwischen den einzelnen Komponenten beschließen. Die konsequente Vermeidung von redundanten Informationen und Aktionen ist **nur in dieser Stufe** des Softwaredesign beherrschbar. Kollegen die wiederverwendbare Codes schreiben, wissen, daß dies nie hundertprozentig gelingt, aber achtzig Prozent sind besser als null Prozent. Anstatt der formellen Veränderung einer toten Kopie, praktiziert man die Ergänzung an den lebenden Codes, so daß mit der Zeit ausgeklügelte fallsensitive Steuermechanismen die klassische Wiederverwendung von Programmcodes erübrigen (learning by doing). Durch diese polymorphe Anwendung von vielen Codeteilen werden leichtere Programmstrukturen, verringerter Speicherbedarf und hoher Geschwindigkeitszuwachs erreicht. Bild 1 zeigt eine realisierte Programmstruktur, schematisch dargestellt. Sie ist modular "bis in die Zehenspitzen" ausgebaut und völlig erweiterungsfähig. Der Umfang der integrierten, mitgelieferten Funktionalität, ist frei nach dem Wunsch des jeweiligen Nutzers zusammenstellbar.

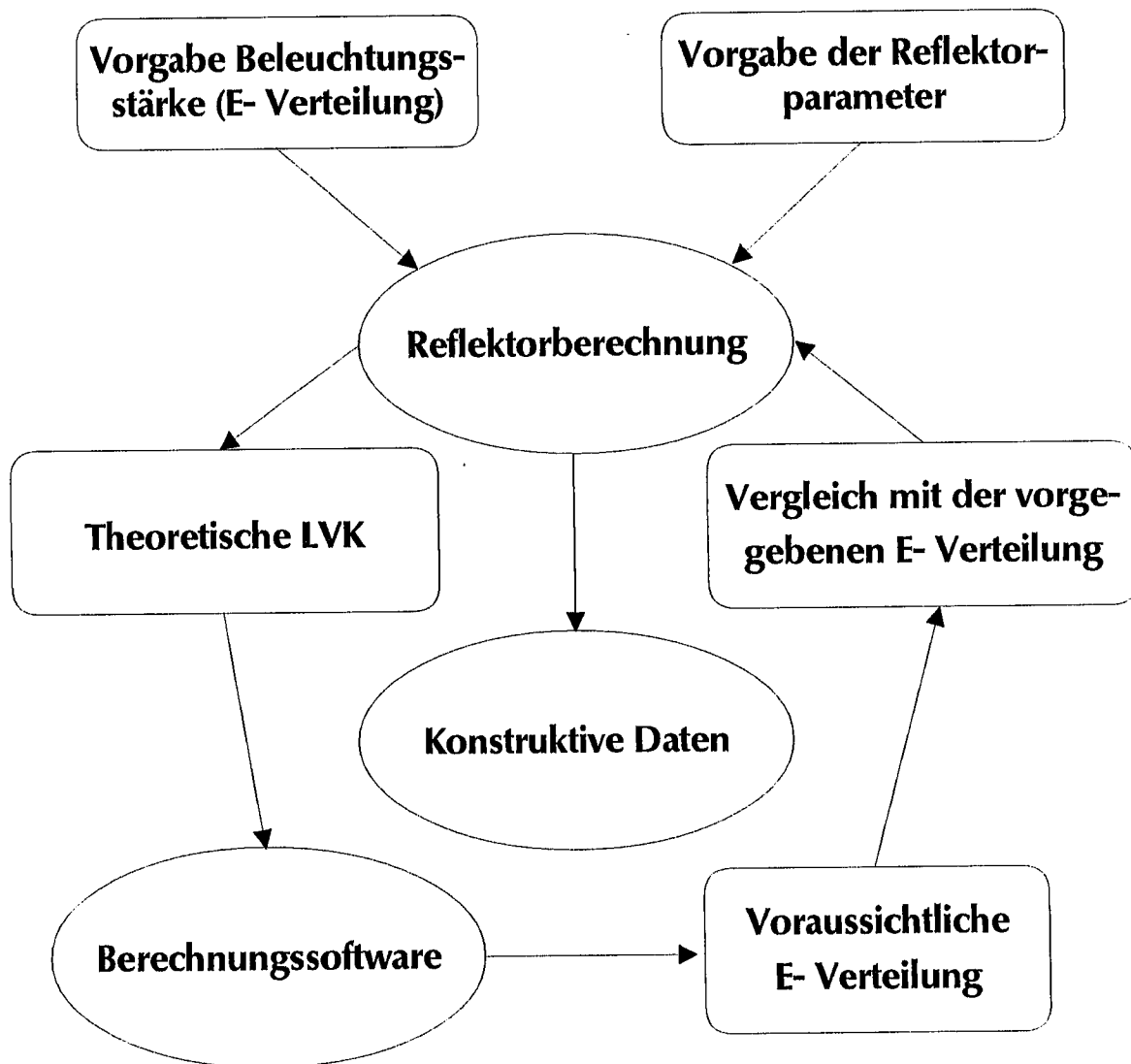
Die geschichtliche Entwicklung der integrierten Pakete (beispielsweise der Office-Pakete) hat dazu geführt, daß der Kunde für eine Leistungsvielfalt bezahlen muß, die er nie oder nur zu einem ganz geringen Bruchteil nutzt. Der gewachsene Kosten- und Konkurrenzdruck erzwingt, daß viele dieser Monsterpakete zwar bezahlbar aber so hoffnungslos überladen sind, daß auch simple Aufgaben schwer fallen. Wenn man diesem Sachverhalt ohne Verstand entgegen wirkt, unter dem Motto: "Weniger ist manchmal mehr", so führt dies häufig zum blinden Streichen von Elementen oder Merkmalen. Damit erreicht man sicherlich nicht die optimale Lösung.

Wir setzen Kommunikation dagegen. Da die Benutzergruppe lichttechnischer Software noch relativ überschaubar ist, bringt eine umfassende Abwägung der oben genannten Gesichtspunkte (im Dialog mit dem Auftraggeber) immer die am besten geeignete Lösung hervor. Dieser umfassende Dialog ist ein wesentlicher Bestandteil der vertretenen Philosophie. Sagte doch schon Seneca: "Wer den Hafen nicht kennt, in den er segeln will, für den ist keine Wind günstig". Dieser Dialog ist zugleich die wich-

tigste Informationsquelle für die angesprochene Analyse und die Strukturierung der individuellen Anforderungen. Schon an dieser Stelle werden die meisten oben genannten Gesichtspunkte vorab geklärt und dann die Arbeit nur an denjenigen Teilen konzentriert, die auch nur gewünscht sind. Der Umfang dieser Kurzfassung erlaubt es nicht, den konkreten Inhalt im Detail zu erläutern. Dazu gibt es aber mit Sicherheit in einem ungezwungenen Gespräch bei der "Lux Junior 97" hinreichend Möglichkeiten. Nutzen Sie Ihre Chance, sprechen Sie uns an.

Zielgruppe ausgemacht - Elemente der Individualität

Grundsätzlich betrachtet man Firmen, die eine Individuallösung wünschen, um diese zu besonderen Konditionen an ihre "eigene" Kunden weiterzugeben, als spezielle Nutzer. Diese unterscheiden sich deutlich von allen anderen in ihrem Bedarfsprofil, sowie durch ihre multiplikative Wirkung, also durch ihre gesonderte Stellung in der Gesamtkette. Sie sind auch die einzige Interessentengruppe, die als Leuchtenhersteller mit dem Einsatz der Software ein viel breiteres Zielspektrum verfolgen kann. Ein solcher Sonderzweck könnte der Einsatz einer Berechnung noch in der Entwicklungsphase zur Überprüfung des Pflichtenhefts oder zur Verbesserung bzw. Kontrolle der Produktion sowie zum Entwurf neuer Produkte sein. Auch für diesen Sonderfall ist man gut gerüstet, da das vorgeschlagene Konzept gerade solche Verwendung mit höchster Sorgfalt berücksichtigt (Bild 2).



Wir vertreten die Meinung, daß eine Firmensoftware nicht ein starres monolithisches und ewig gleiches Produkt sein darf. Die realisierten Lösungen berücksichtigen den Wunsch eines Herstellers, mit einer einzigen Software, die von ihm abgesteckten Bedarfserfelder abzudecken - die firmeninternen oder die der eigenen Kunden. Gleichzeitig respektiert man die Notwendigkeit, einige der Informationen und Leistungsmerkmale bei einer Weitergabe der Software nach außen abzusichern und einzuschränken. Es ist letztendlich das Hauptziel eines Herstellers, seine Produkte zu verkaufen. Dies gelingt zweifellos besser, je besser sie präsentiert werden.

Individualismus soviel wie möglich - Zentralismus so viel wie nötig

In dieser Gedankenwelt kann man auch eine Leistungsabstufung vornehmen. So bietet es sich an, eine Home-Version für den Hersteller und eine Außen-Version für die Beratungsfirmen (Planungssoftware) weiterzugeben. Einerseits kann die Firma immer mit der eigenen Software werben und gleichzeitig gewisse Vorteile und Sonderleistungen für sich behalten. Da aber beide Softwareelemente, die Home-Version und die Außen-Version, visuell identisch sind, besitzt man eine gute Diskussionsbasis und motiviert die Kunden immer an die Hersteller heranzutreten, um diese besonderen Leistungen zu erbitten. Die Modifizierung der Außen-Version ist nicht nur im Sinne einer Leistungsreduktion angedacht, vorgesehen sind beispielsweise im Unterschied zur Home-Version, erweiterte präsentative und interaktive Informationsteile im Sinne eines elektronischen Kataloges. Diese Elemente erhöhen die Attraktivität nach außen und werden firmenintern nicht, oder nur zur Überprüfung, benötigt. Teile, die wiederum von allseitigem Interesse sind, sind in den verschiedenen Versionen identisch. Solche Elemente sind zum Beispiel gewisse Steuermechanismen ("künstliche Intelligenz"). Man ist in der Lage, die üblichen Plausibilitätstests auszuweiten, daß sogar mechanische Prozesse kontrolliert werden können. Physische Kollision zwischen einzelnen Leuchten oder zwischen Leuchten und Umgebungselementen werden bei der Leuchtaufteilung "online" detektiert und vermieden, weil der Nutzer einen entsprechenden Hinweis erhält und sofort reagieren kann. Man kann zum Beispiel bei der Innenraumbeleuchtung keine Leuchte durch die Wand aus dem Raum tragen oder in der Außenbeleuchtung zwei Aufmastleuchten auf gleicher Höhe und am selben Mast befestigen. Dies sind nur einige Beispiele der aufgezeigten Mechanismen.

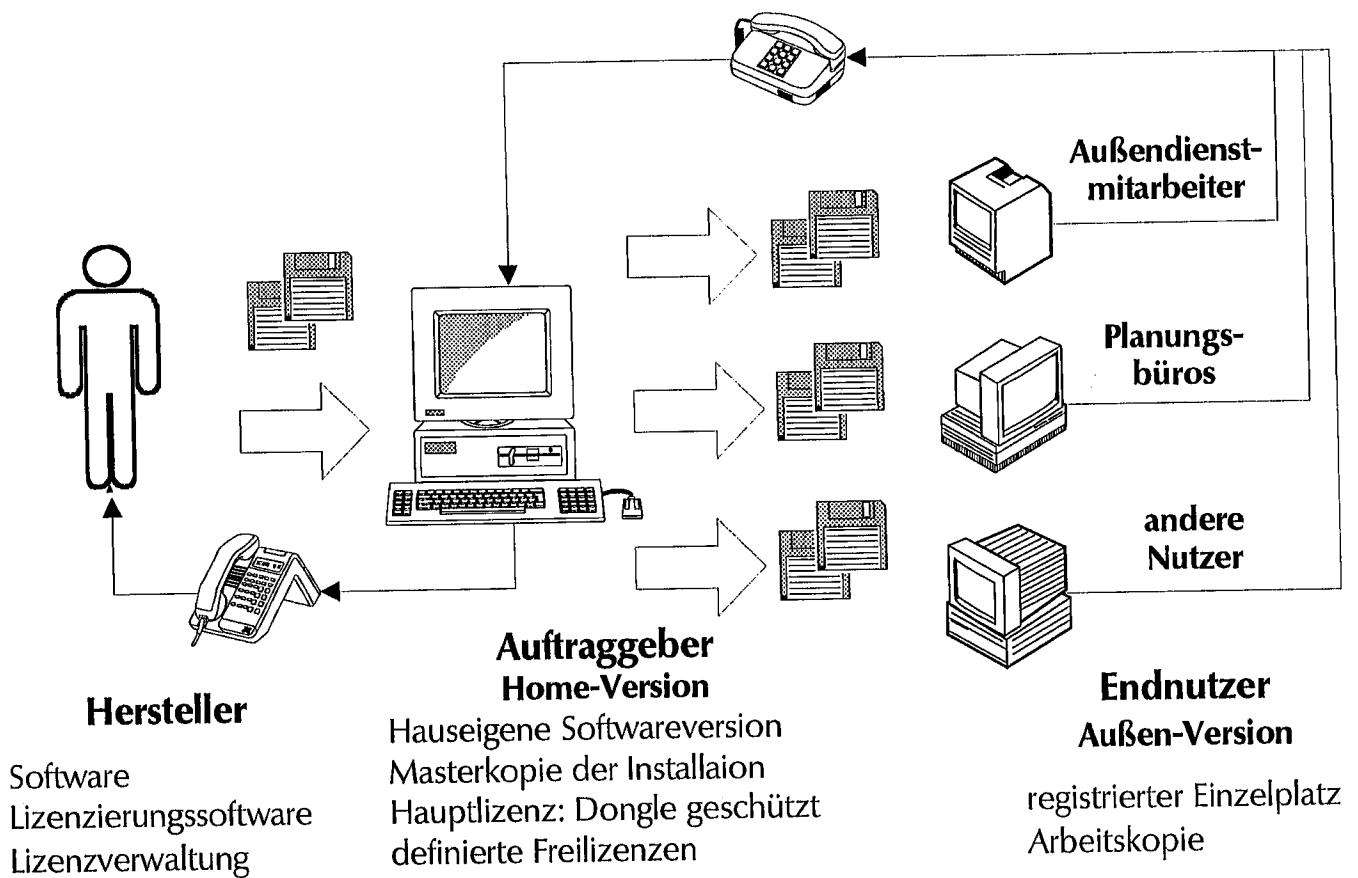
Je mehr ich kann, je mehr ich will

Auf der beschriebenen Art einer nutzerselektierten Leistungsregelung der Anwendung wird eine Überladung der jeweiligen Programmversion vermieden. Natürlich kann man auf Wunsch und bei entsprechend vorhandener Hardware die volle Leistungskraft entfalten. In der Mehrzahl der Fälle wird dies mit der Home-Version auf dem hauseigenen Rechner des Auftraggebers realisiert werden. Das Programm verhält sich je nach Installationsumgebung unterschiedlich. Durch einfache Veränderungen der Umgebungsstruktur kann man Funktionen abrufen, die sonst verborgen bleiben. Die globale Leistungsabstimmung passiert, im Unterschied zur klassischen Lösung, wo Dutzende nicht eindeutige und meistens irritierende Voreinstellungen möglich sind, vorab und extern. Der Nutzer bekommt die von ihm gewünschte optimale Version. Spätere Änderungswünsche können und werden unkompliziert per Telefon oder anderer Kommunikation erledigt. Nach Absprache kann die "Freischaltung" vom Hersteller sofort vorgenommen werden, wenn man die eingebauten Schutzmechanismen deaktiviert. Diese einfach formulierten Aussagen bewirken aber einen fein abgestimmten Mechanismus, der Sicherheit gewährleistet. Assoziationen, die Hackerambitionen

suggestieren, kommen hier nicht zum Tragen, da die Software auf mehreren unterschiedlichen Ebenen kontrolliert und geschützt wird. Der Schutz ist so dimensioniert, daß jegliche nicht legitime Versuche erkannt werden, weil ein überproportional höherer Aufwand als durch die Einhaltung der Lizenzierungsbedingungen verursacht, erkannt wird.

Ordnung ist das halbe Leben

Unabhängig von der Version und der Detailspezifikation benötigt jede Arbeitsgruppe eine Registrierung, die die Arbeit an nur einem einzigen Rechner gestattet. Kopierversuche der Installationsmedien sind ohne zusätzliche Lizenzfreigabe sinnlos. Diese Maßnahmen sind für den Leuchtenhersteller im Sinne einer verbesserten Transparenz der Informationsflußwege des Vertriebs nützlich und für den Softwareentwickler überlebensnotwendig. Je nach abgesprochener Modalität können die Vervielfältigungen der Installationsmedien und die Lizenzvergabe in der Hand des Leuchtenherstellers liegen. Zusätzlich zu der Hauptsoftware auf dem Home-Rechner wird auf einem (möglicherweise anderen) Rechner dieses Unternehmens eine Lizenzvergabesoftware installiert, die die Freischaltung der vereinbarten Anzahl von Arbeitskopien ermöglicht. Diese (Hilfs-)Software wird von dem Softwarehersteller initialisiert und mit einem Hardware-Dongle geschützt bzw. überwacht. Der spätere Nachkauf von Lizenzen wird per Kommunikation erledigt und eine beliebige zusätzliche Anzahl von "Freikopien" ist praktisch sofort wieder verfügbar. Dieser Vorgang ist mehrmals möglich. Das vorgesehene Vertriebsschema ist im Bild 3 aufgezeigt. Es ist aus Erfahrung flexibel, kostengünstig und vorteilhaft, kann aber nach Belieben und Kundenwunsch verändert werden.



Auf zu neuem Sprung

Zusammenfassend möchten wir an alle Interessierten und Fachkollegen appellieren, und sie ermutigen, bzw. herzlich zu einem Gespräch bei der Tagung in Ilmenau einladen. Die Postersession, sowie das bereitstehende, zusätzliche Material wird sicherlich auch die noch vorhandenen Informationslücken schließen. Eine Live-Vorführung der Software ist nach Wunsch unkompliziert möglich. Auch nach der Tagung sind die Autoren immer gern und stets zu weiterführenden Gesprächen bereit, um Antworten auf noch offene Fragen zu geben, und natürlich auch die Produkte an den Mann oder die Frau zu bringen.



p.s.: Die Angabe der verwendeten Literaturstellen hat in der genauen Form einen deutlichen Platzbedarf, diese haben wir deshalb hier nicht mit aufgeführt. Sie wird bei der Tagung als Anlageblatt zu bekommen sein.

Photometrische Untersuchungen im extremen Nahfeldbereich

Babak Pourat¹, Jürgen Laur²

1. Aufgabenstellung

Bei der Berechnung von Beleuchtungsstärken in Innenräumen mit dem photometrischen Entfernungsgesetz treten unter Umständen erhebliche Abweichungen auf, wenn diese Werte mit gemessenen Beleuchtungsstärken verglichen werden. Um diese Abweichung quantitativ zu erfassen, wurde das am Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe vorhandene Drehspiegel-Goniophotometer erweitert /1/. Mit der erweiterten Anlage ist es nun möglich horizontale Beleuchtungsstärken im extremen Leuchten-Nahfeld zu messen.

An 6 realen Leuchten wurden Nahfeldmessungen bei typischen Entfernungen durchgeführt. Anhand dieser Werte erfolgte u.a. auch eine Bewertung der oft angewendeten Methode der Leuchtenunterteilung.

2. Die Meßeinrichtung

In Bild 1 ist das vorhandene Drehspiegel-Goniophotometer mit den Ergänzungen zur Messung von horizontalen Beleuchtungsstärken auf waagerechten Ebenen dargestellt. Ein schrittmotorgesteuerter Wagen positioniert den Meßkopf auf einer 6 m langen Meßschiene. Die Abbildung zeigt die Messung einer Indirekt Leuchte. In diesem Fall ist aus konstruktiven Gründen der

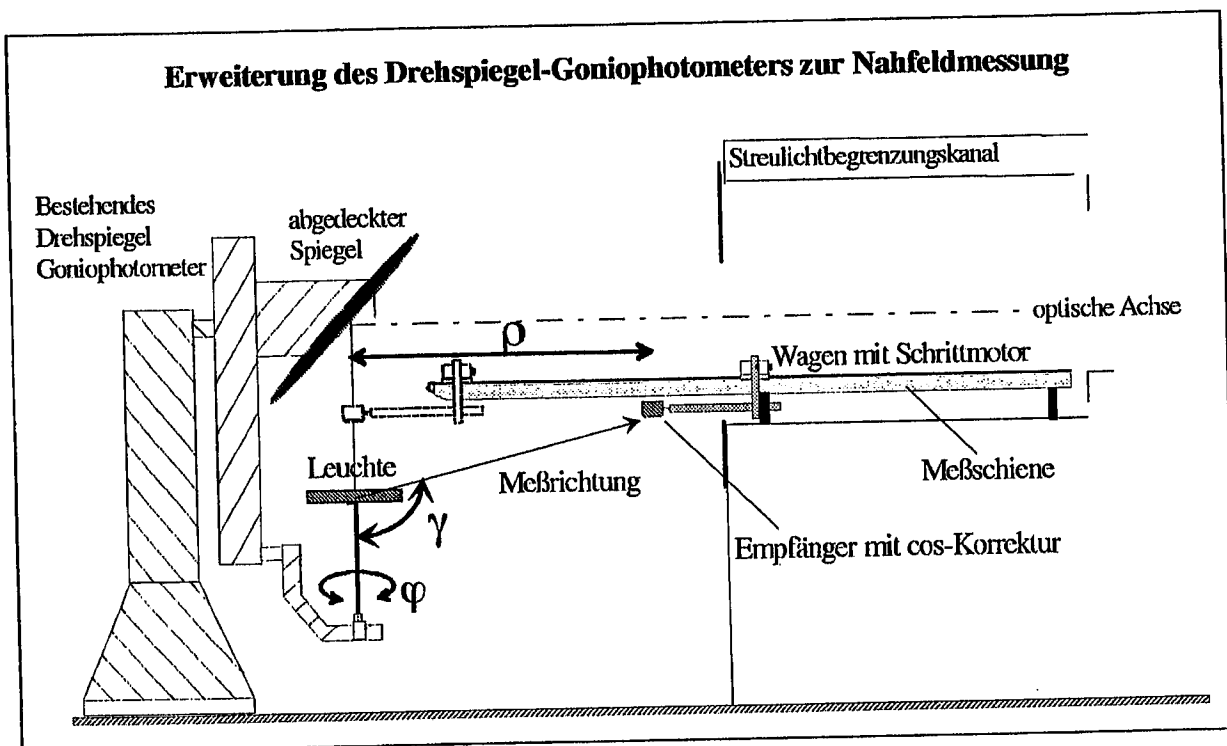


Bild 1:

Anlage zur Messung von horizontalen Beleuchtungsstärken im extremen Nahfeldbereich. Das vorhandene Drehspiegel-Goniophotometer wurde mechanisch durch eine Meßschiene mit Wagen und daran befestigtem Empfänger erweitert.

¹ Dipl.-Phys Babak Pourat
Lichttechnisches Institut Universität Karlsruhe
76128 Karlsruhe

² Dipl.-Ing. Jürgen Laur
Valeo Borg Instruments
75196 Remchingen

Durchmesser der Meßebeine auf 5 m beschränkt, was aber für die meisten Anwendungsfälle völlig ausreichend ist. Der lotrechte Abstand zwischen Leuchten-Lichtschwerpunkt und dem Empfänger, der Meßebenenabstand, beträgt maximal 1,7 m.

Die automatische Steuerung des Schrittmotors und des Drehspiegels erfolgt über ein in C++ implementiertes Programm. Somit ist es möglich, Meßpunkte entsprechend auf eine Ebene projizierter Kugelkoordinaten anzusteuern. Dadurch können Nahfeld-Daten mit den nach dem photometrischen Entfernungsgesetz berechneten Beleuchtungsstärken leicht verglichen werden.

In Tabelle 1 ist ein Überblick über die untersuchten Leuchten wiedergegeben. Es wurde nur der Indirekt - Anteil untersucht.

Nr	Typ		Bestückung	Meßebenenabstand
1	Langfeld	Indirekt	2 x 58W T16	0,5 m
2	Langfeld	Direkt / Indirekt	2 x 58W T16	0,5 m & 1 m
3	Langfeld	Wandleuchte	1 x 36W T16	0,4 m
4	Kurzfeld	Direkt / Indirekt	1 x 55W TC-L	0,5 m
5	Kurzfeld	Direkt / Indirekt	1 x 55W TC-L	1,0 m & 1,3 m
6	Stehleuchte	Indirekt	2 x 55W TC-L	1,0 m & 1,3 m

Tabelle 1:

Eine Übersicht der untersuchten Leuchten.

Vergleich Nahfeld - Fernfeld

Aus den durchgeführten Messungen zeigt sich, daß im Nahfeld die über die Lichtstärke berechneten Beleuchtungsstärken nicht mit hinreichender Genauigkeit mit den direkt gemessenen Beleuchtungsstärken übereinstimmen.

Wie die Untersuchungen ergaben, ist der Verlauf der Differenz aus Fern- und Nahfeldwert über dem Ausstrahlungswinkel Gamma bei einem konkreten Ebenenabstand für eine bestimmte Leuchtenkategorie (Langfeld oder Kurzfeld) weitgehend unabhängig von der Leuchte.

In den meisten Fällen sind die im Nahfeld gemessenen Beleuchtungsstärken geringer als die mit dem photometrischen Entfernungsgesetz berechneten Fernfeld-Beleuchtungsstärken.

Bei den ausgewählten Kurzfeld-Leuchten beträgt die maximale Beleuchtungsstärkedifferenz 10% bei einem Meßebenenabstand von 1,3 m. Im extremen Nahfeldbereich (ca. 0,5 m) verdoppelt sich dieser Wert auf über 20%.

Noch stärker ist der Effekt jedoch bei Langfeld-Leuchten. Bei dieser Leuchtenkategorie treten im extremen Nahfeldbereich Abweichungen von über 100% auf, die auch bei der Verdopplung des Ebenenabstandes auf 1 m noch bis zu 40% betragen.

Bild 2 zeigt als typisches Beispiel die Differenz aus mit dem photometrischen Entfernungsgesetz berechneter und im Nahfeld gemessener Beleuchtungsstärke. Senkrecht über dem Lichtschwerpunkt ist die tatsächlich gemessene Beleuchtungsstärke um 5000 lx geringer als die berechnete. Dies entspricht einer relativen Abweichung von ungefähr 115%.

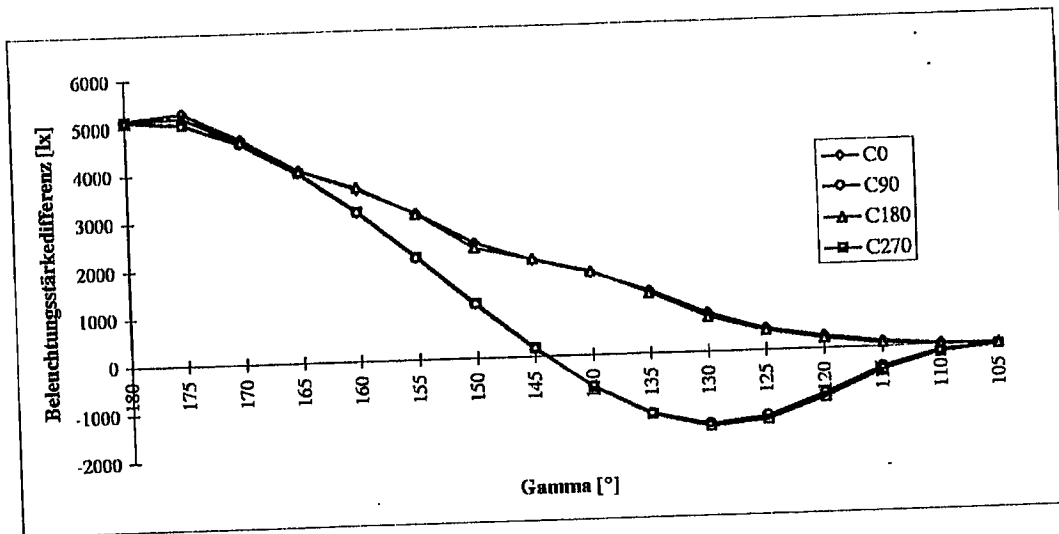


Bild 2: Über dem Ausstrahlungswinkel Gamma ist die horizontale Beleuchtungsstärkedifferenz aus berechneter (Fernfeld) und bei einem Meßebenenabstand von 0,5m gemessener (Nahfeld) Beleuchtungsstärke in diversen C-Ebenen aufgetragen. Leuchte Nr 1.

Vergleich Nahfeld - Leuchtenunterteilung

Um eine höhere Planungssicherheit zu erhalten, verwenden die meisten Berechnungsprogramme die Methode der Leuchtenunterteilung. Mit Hilfe eines in C++ implementierten Programms wurde für verschiedene Unterteilungen der Lichtaustrittsfläche die Beleuchtungsstärke berechnet. Dabei konnte für alle untersuchten Leuchten festgestellt werden, daß ab einer vierfachen Längsunterteilung (keine Querunterteilung) der leuchtenden Fläche keine wesentliche Verringerung der Abweichung erfolgt. Es genügt also die Lichtaustrittsfläche in der Längsrichtung vierfach zu unterteilen. Bild 3 zeigt diesen Sachverhalt für eine Langfeldleuchte.

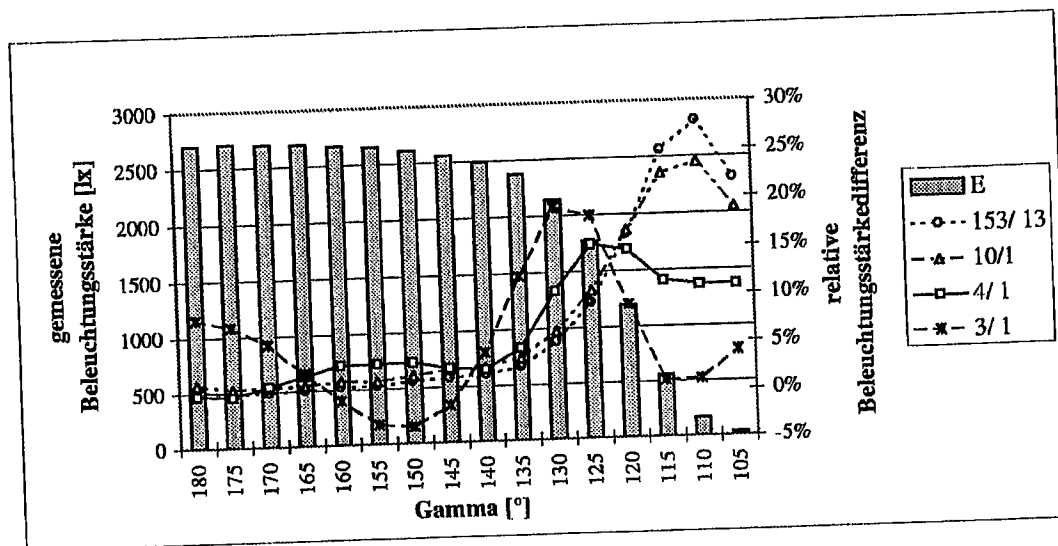


Bild 3: Gemessene Beleuchtungsstärke E und relative Beleuchtungsstärkedifferenz bei verschiedenen Unterteilungen der Lichtaustrittsfläche einer Langfeldleuchte in der C90-Ebene. Zur Nomenklatur: x / y bedeutet x...Längsunterteilung, y...Querunterteilung.

Literatur:

- /1/ Jürgen Laur, Photometrische Untersuchungen im extremen Nahfeldbereich, Diplomarbeit am Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe, 1997