

Prof. Dr. D. Gall; DI U. Krüger; PD Dr. F. Schmidt; DI St. Wolf

Moderne Möglichkeiten zur Messung und Bewertung von Beleuchtungsparametern

BEWERTUNG VON LEUCHTDICHTEVERTEILUNGEN

Die Komplexität der Informationen, die vom Menschen erfasst werden müssen, steigt ständig an. Im gleichen Masse erhöhen sich die Anforderungen an lichttechnische Baugruppen.

Die lichttechnische Bewertung von diesen Systemen stellt sehr komplexe Anforderungen an einzusetzende Messsysteme. Oft ist die Kenntnis der Leuchtdichteverteilung im gesamten Sehfeld oder zumindest in vielen ausgewählten Teilen des Sehfeldes notwendig. Mit einer punktwise arbeitenden Messtechnik sind solche Bewertungen nur sehr zeitaufwendig, in einem groben Raster oder gar nicht zu bewältigen.

Durch die Entwicklung von hochwertigen digitalen CCD-Matrixkameras ist die Möglichkeit geschaffen worden, bildauflösende Messsysteme zu realisieren, die solche komplexen Messprobleme lösen. Dies erfordert die genaue Untersuchung der Parameter dieser Systeme und die Einordnung in Kategorien vorhandener Lichtmesstechnik [1].

Die bildauflösende Leuchtdichtemesstechnik vereint die Erfassung photometrischer Größen mit den Algorithmen der Bildverarbeitung zur Gewinnung geometrischer Daten. Sie realisiert eine neue Leuchtdichteanalytik, die die komplexe Erfassung und Bewertung z.B. von Leuchtdichteverteilungen an Displays in eleganter Weise lösen kann. Für Reflektorberechnungen werden komplexe Strahlenmodelle der Leuchtmittel, für Planungen im Nahfeld an die Geometrie des Raumes angepasste Planungsdaten (Nahfeld-LVK) zur Verfügung gestellt. Die Messung von Blendsituationen und die Berechnung von UGR-Werten wird damit überhaupt erst ermöglicht [2].



Bild 1: zu vermessende Szene

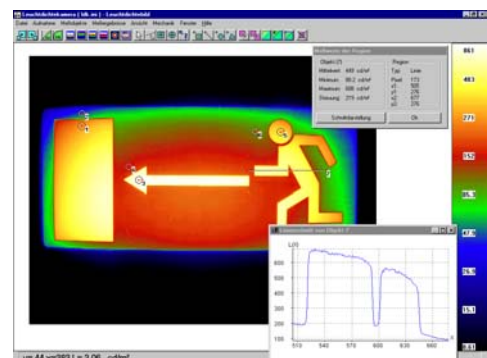


Bild 2: Bewertung der Leuchtdichteverteilung

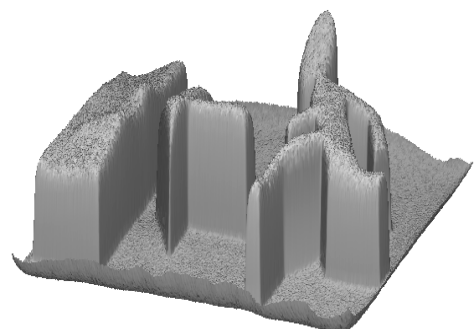


Bild 3: Leuchtdichteverteilung

AUFBAU, EIGENSCHAFTEN

Leuchtdichtemesskameras setzen auf hochwertigen CCD-Digitalkameras auf, einzeln analysiert, kalibriert und an die Lichtmessung angepasst werden. Die Signalwerte im Bild lassen sich dann direkt in Leuchtdichtewerte umrechnen.

Wesentliche Voraussetzung zur Realisierung solcher Messsysteme ist die genaue Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge der Ladungsgenerierung, des -transportes und der -wandlung, sowie weiterer Eigenschaften der eingesetzten CCD-Matrix (Temperatur-, Dunkelverhalten). Wesentliche Zusammenhänge, Abhängigkeiten und ihre Parameter müssen erfasst und korrigiert werden.

Die CCD-Matrix als strahlungsempfindlicher Sensor wandelt den einfallenden Strahlstrom in Signalladungen entsprechend ihrer spektralen Empfindlichkeit $S(\lambda)$. Soll das System photometrisch, d.h. Leuchtdichten messen, muss die spektrale Empfindlichkeit des Gesamtsystems $V(\lambda)$ sein. Dazu wird für jede Kamera ein Filter $F(\lambda)$ eingesetzt, das mit der spektralen Empfindlichkeit der jeweiligen CCD-Matrix und der

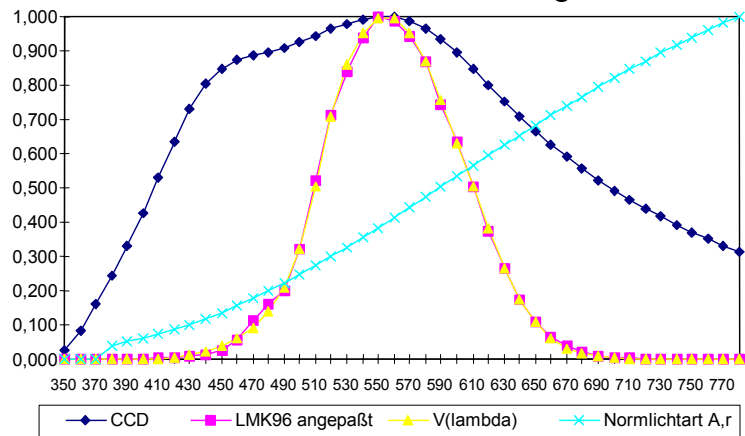


Bild 4: $V(\lambda)$ -Anpassung

spektralen Durchlässigkeit des Objektivs insgesamt die normgerechte Empfindlichkeit des menschlichen Auges $V(\lambda)$ ergibt [3]. Die Leuchtdichte $L(x, y, \delta, \varphi)$ ist eine ortsabhängige (differentielle) Messgröße und erfordert demzufolge ihre Abbildung auf den Sensor, bei punktförmig messenden Sensoren die Abbildung des vorgegebenen Messflecks, bei bildauflösenden Leuchtdichtemessern (Videoanalysatoren) die Abbildung der entsprechenden Szene auf den Bildsensor (CCD-Matrix).

AUFLÖSUNG UND DYNAMIK

Wesentlich für ein Messgerät sind die Datenauflösung und der erreichbare Dynamikumfang. Bei Einzelaufnahmen wird die Auflösung durch die Datenbreite des AD-Wandlers und das Rauschen der Signale bestimmt. Die Messwertauflösung kann durch Mittelwertbildung über benachbarte Pixel auf der Matrix (Binning) oder per Software (Makropixel) oder über mehrere, nacheinander erfasste und gemittelte Bilder (Mehrfachmessung) auf etwa

$$n = n_0 + \frac{\lg N}{2} \quad \begin{array}{l} N = \text{Anzahl der Mittelungen (Pixel, Bilder)} \\ n = \text{erreichbare Auflösung in bit} \\ n_0 = \text{Grundauflösung} \end{array} \quad (1)$$

gesteigert werden.

Leuchtdichteszenen sind vielfach durch sehr hohen Dynamikumfang (z.B. Leuchten und beleuchtete Szene gemeinsam im Bild) gekennzeichnet. Der mit einer Leuchtdichtemesskamera erfassbare Dynamikumfang kann durch eine HighDynMessung, bei der die Szene mehrfach und mit unterschiedlichen Integrationszeiten aufgenommen wird, erhöht werden. Die Messwerte für niedrige Leuchtdichten werden dann jeweils aus den Bildern mit langen Integrationszeiten, Messwerte für hohe Leuchtdichten aus den Bildern mit kurzen Integrationszeiten gewonnen und zu einem gemeinsamen Leuchtdichtebild verrechnet. Mit derartigen Leuchtdichtemesskameras sind Dynamikumfänge von 10^6 und Genauigkeiten bis 10^{-2} erreichbar.

KENNZEICHNUNG NACH DIN

Realisierte Systeme auf der Basis ausgewählter und entsprechend qualifizierter CCD-Digitalkameras ordnen sich in die Güteklassen A und B nach DIN5035 ein.

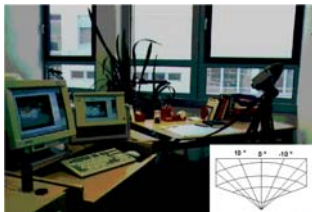
ANWENDUNG

Die bildauflösende Lichtmesstechnik besitzt gegenüber der konventionellen Technik der Messung mit Einzelsensoren wesentliche Vorteile:

- **Örtliche Verteilung:** Die Ursprungsdaten sind Bilder, haben also einen strengen Ortsbezug, der als $L(x, y)$ oder auch als $L(\delta, \varphi)$ zur Verfügung stehen kann. Diese Ortsanbindung bleibt auch erhalten, wenn mehrere Bilder entsprechend der Kameraposition und -ausrichtung wieder zugeordnet werden. Aus den Positionsdaten können somit
 - Flächen (Raumwinkel und Raumwinkelprojektionen)
 - Lageparameter (Positionsfaktoren) und
 - Flächenschwerpunkteermittelt werden. Zum Beispiel können ohne größeren Aufwand lichttechnische Parameter bestimmt werden, in die Raumwinkel oder Winkelpositionen zwischen Objekten eingehen.
- **Zeiteinsparung bei der Messung:** Die Messung einer Vielzahl von Objekten im Blickfeld benötigt nur einen Bruchteil der Messzeit mit herkömmlicher Technik, da alle Messorte auf einmal erfasst werden.
- **Konstanz der Lichtverhältnisse:** Alle Messdaten werden zum gleichen Zeitpunkt gewonnen.

Im folgenden sind beispielhaft einige Anwendungen der bildauflösenden Leuchtdichtemessung aufgeführt:

Innenraummessung

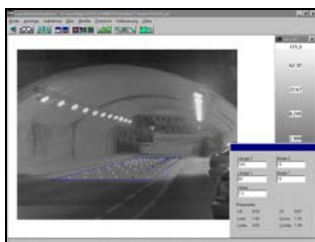


Wichtige lichttechnische Kenngrößen im Innenraum hängen unmittelbar mit der Leuchtdichte von Objekten und Umgebung zusammen:

- Kontraste (z.B. CRF-Messung) [4,5]
- Blendung (UGR nur durch bildauflösende Messung realisierbar) [6,7].

Zur Definition der Sehobjekte muss eine Klassifikation der Bildpunkte erfolgen. Die Schwierigkeit besteht dabei in der Auswahl von geeigneten Klassifikationsmerkmale, mit denen eine Unterscheidung von Sehobjekt und Umfeld, Leuchten und Leuchtenumgebung, Tageslicht und Kunstlicht möglich ist. Hierbei muss jede Aufgabe gesondert gelöst werden, indem hinreichende Merkmale angewendet werden. Im Falle der Unterscheidung zwischen Leuchte und Leuchtenumgebung kann eine feste oder durch die Verteilung selbst definierte Leuchtdichteschwelle Verwendung finden.

Straßen und Tunnel



Die DIN5044 und DIN67524 schreiben die notwendigen Leuchtdichten für Straßen und Tunnel vor. Die rechen-technische Erfassung einer Vielzahl von Messpunkten ermöglicht die schnelle Vermessung unterschiedlicher Beleuchtungssituationen. Wesentliche Parameter sind:

- minimale, maximale und mittlere Leuchtdichten
- Gleichförmigkeiten g_1 und g_2
- prozentuale Schwellenerhöhung TI

Leuchtenvermessung



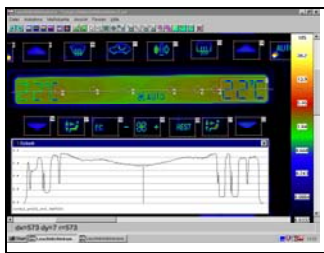
Die Leuchtdichteverteilung ist ein wesentliches Kriterium zur Kennzeichnung von Leuchten. Neben der Qualitätssicherung bei der Produktion zur Realisierung entsprechender Vorschriften wird sie auch marktwirksam in Katalogen verwendet.

- zeitlicher Verlauf z.B. bei Notstromversorgung
- Blendung
- Kontraste

Zusammen mit den geometrisch ermittelten Daten können folgende Größen abgeleitet werden:

- Lichtstärken
- mittlere Leuchtdichten, gewichtet nach verschiedenen Kriterien
- Beleuchtungsstärken aus definierten Bereichen
- direkte und indirekte Beleuchtungsstärken
- Leuchtdichtekoeffizienten
- Leuchtdichtefaktoren
- Streuparameter (Reflexion und Transmission) u.a.m.

Displaymessung



Leuchtdichteverteilungen, Kontraste auf Displays insgesamt aber auch für einzelne Symbole zu messen, ist für die Entwicklung, wie für die Fertigungsüberwachung im Automobilbereich, für Avionik und für allgemeine Displays unverzichtbar.

Für die Erfassung winkelabhängiger Kontraste kann mit Sonderabbildungssystemen (konoskopische Objektive) eine komplette Verteilung mit zwei Aufnahmen erfasst werden.

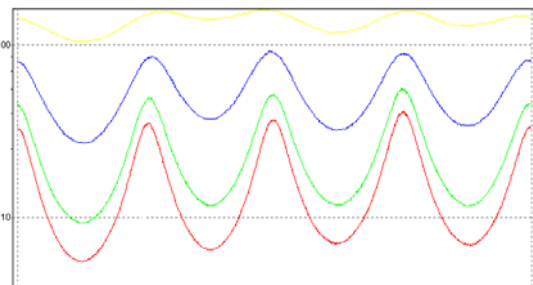
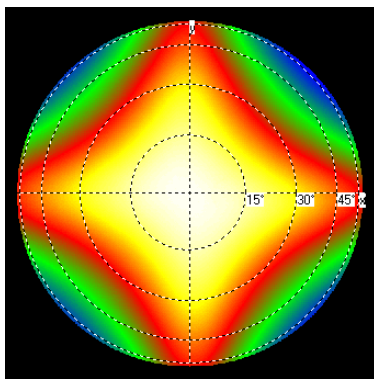


Bild 5: Kontrast $k = L_{\text{hell}} / L_{\text{dunkel}}$ an einem Bildschirm als Funktion $f(\delta, \varphi)$ in Pseudocolorierung und als Schnitte $k(\varphi)_{\delta=\text{const}}$

Im Zusammenspiel von Photometrie und Geometriedaten können alle lichttechnischen und geometrisch relevanten Parameter ermittelt werden, die zur Bewertung von Licht- und Beleuchtungsanlagen notwendig sind. Einige Möglichkeiten sollen hier aufgelistet werden:

- psychologische Blendzahlen (UGR-Wert, GI-Wert, VCP-Daten)
- physiologische Blendzahlen (Schleierleuchtdichte, D-Wert, TI-Wert)
- Reflexblendung und Schleierreflexion (CRF-Wert)
- Komfortzahlen (aus Leuchtdichteverteilung)
- Sichtbarkeiten (Schwellenkontraste, Kontrastreserven) und
- Gleichmäßigkeitszahlen.

Über die Messung der Leuchtdichten an ausgewählten Punkten im Raum kann außerdem über Reflexionsproben die Beleuchtungsstärke und deren Verteilung gemessen werden. Man erhält so mit einer Messung gleichzeitig die Beleuchtungsstärke an vielen Punkten im Raum und kann große Räume (Straßen, Tunnel, Fluchtwege) mit einem vertretbaren Aufwand und geringen Tageslichtschwankungen vermessen.

SOFTWAREUNTERSTÜTZUNG

Durch geeignete Softwareunterstützung können die Leuchtdichtemessdaten schnell und einfach analysiert werden. Im folgenden Beispiel wird dies an der Vermessung und Auswertung hinterleuchteter Symbole gezeigt.

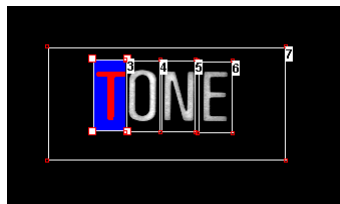
Die Gleichförmigkeit in Falschfarbdarstellung



in ISO-cd/m² Bereichen



Die mittlere Leuchtdichte eines Symbols



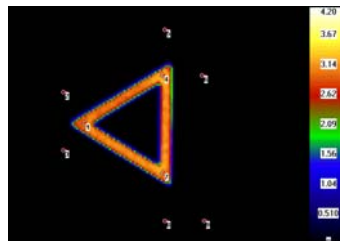
Die Farbpaletten lassen sich auf beliebig wählbare Leuchtdichtebereiche anpassen.

Ungleichförmigkeiten sind dadurch besonders gut erkennbar.

Toleranzbereiche sind einfach durch Farbgrenzen in der ISO-cd/m² Darstellung festzulegen.

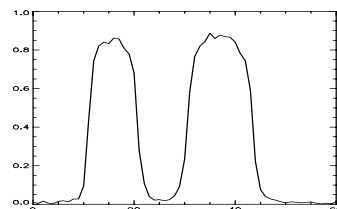
| Nr | Typ | Mean |
|----|----------|------|
| 3 | L-Objekt | 3.06 |
| 4 | L-Objekt | 3.39 |
| 5 | L-Objekt | 3.26 |
| 6 | L-Objekt | 3.11 |
| 7 | L-Objekt | 3.25 |

Mit korrespondierenden Messpunkten



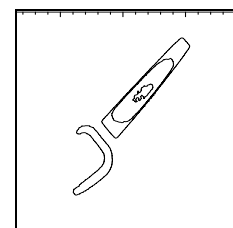
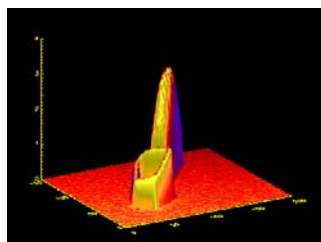
| Nr | Typ | Min | Max | Mean |
|----|-------|------|------|------|
| 1 | Kreis | 2.98 | 3.09 | 3.04 |
| 2 | Kreis | 0.01 | 0.03 | 0.02 |
| 3 | Kreis | 0.01 | 0.04 | 0.02 |
| 4 | Kreis | 3.21 | 3.31 | 3.25 |
| 5 | Kreis | 0.01 | 0.05 | 0.02 |
| 6 | Kreis | 0.01 | 0.03 | 0.02 |
| 7 | Kreis | 3.01 | 3.27 | 3.12 |
| 8 | Kreis | 0.01 | 0.07 | 0.02 |
| 9 | Kreis | 0.00 | 0.03 | 0.02 |

Leuchtdichteverläufe entlang einer Linie



Die Leuchtdichteschritte können entlang beliebig platzierbarer Linien dargestellt werden.

Auswertung mit anderen Werkzeugen – Bsp. IDL



MOBILE LEUCHTDICHTEMESSKAMERA

Neben dem Einsatz hochwertiger CCD-Digitalkameras liegt die Überlegung nahe, auch digitale Fotoapparate zur Leuchtdichtemessung einzusetzen. Die Grundfunktionalität eines modernen Fotoapparates ist ähnlich der von digitalen CCD-Kameras, die Aufgabenstellung ist aber der Leuchtdichtemessung diametral entgegengesetzt. Ein Fotoapparat soll bei unterschiedlichsten Beleuchtungsverhältnissen immer „schöne Bilder“ liefern. Wenn man diese Technik zur Leuchtdichtemessung einsetzen will, müssen die Aufnahmeparameter (Belichtungszeit, Blenden-, Zoom- und Fokuseinstellungen) bekannt sein und den digitalen Bilddaten „mitgegeben“ werden.

Die Spiegelreflexkameras **Rollei d7metric** (7mm FixFocus-Objektiv) und **Rollei d30flex** (Zommobjektiv 10-30mm, Focusmöglichkeit) stellen alle Aufnahme­daten zur Verfügung. Die Einstellung der Öffnung erfolgt nicht durch eine Irisblende, sondern es werden Lochblenden in einem Blendenrevolver ausgewählt. Um diese Kameras als Leuchtdichtemesskameras einsetzen zu können, müssen in der Fertigung weitere spezifische Maßnahmen durchgeführt:

In die Kameras werden ausgesuchte und spektral vermessene CCD-Farbmatri­zen eingesetzt. Die damit exakt bekannten Empfindlichkeiten jeder Kamera werden in der Auswertesoftware zur Berechnung der Leuchtdichtedaten genutzt. Die Firmware zur Steuerung der Aufnahme­funktionalität wird durch einen Aufnahmemodus HighDyn ergänzt, bei dem neben der Aufnahme mit der eingestellten oder automatisch ermittelten Integrationszeit T_i weitere Aufnahmen mit höherer Integrationszeiten ($3 * T_i$; $9 * T_i$) und niedrigeren Integrationszeiten ($1/3 * T_i$; $1/9 * T_i$) erfolgen. Damit sind auch mit diesen Kameras Leuchtdichte­verteilungen mit hohem Dynamikum­fang erfassbar. Zur $V(\lambda)$ -Anpassung wird der Grünkanal der Farbmatrix verwendet und es werden zusätzliche Anteile von Rot und Blau eingerechnet. Diese Berechnung wird für jede einzelne Kamera anhand der bekannten spektralen Empfindlichkeiten der eingesetzten CCD-Matrix optimiert. Bei breitbandigen Strahlungsquellen sind hohe Messgenauigkeiten erreichbar. Für schmalbandige oder "bunte" Strahlungen kann (bei bekannter spektraler Charakteristik des Messobjektes) die vorhandene Abweichung von der $V(\lambda)$ -Funktion über den sogenannten Color Correction Factor (CCF) korrigiert werden.

Die Eigenschaften der Kamera (Shading, Dunkelsignale, Nichtlinearität) werden erfasst und in Kalibrierfiles abgelegt. Damit und mit den gespeicherten Daten zur Bildentstehung stehen alle Parameter zur Verfügung, um photometrische Messdaten aus den Bildern oder Bildsequenzen zu extrahieren. Zur Auswertung von Leuchtdichtebildern steht das Softwarepaket LMK2000 zur Verfügung, d.h. die Arbeitsweise ist mit der für die Leuchtdichtemesskameras LMK identisch.



Bild 6: Leuchtdichtemesskamera LMK mobil

RiGO NAHFELDGONIOPHOTOMETER

Wird eine Leuchtdichtemesskamera auf einem Goniometer installiert, können damit Leuchtdichtebilder aus verschiedenen Richtungen um das Messobjekt (Leuchte, Lampe) herum erfasst werden. Diese Leuchtdichtebilder können nach dem Verfahren von Prof. Riemann zu einer Leuchtdichteverteilung $L(x, y, z, \delta, \varphi)$ verrechnet werden, die das Messobjekt vollständig beschreiben [8]. Damit können dann Lichtstärkeverteilungskörper und Lichtströme von Lampen und Leuchten bestimmt werden. Das zum Einsatz kommende Messverfahren erlaubt die Bestimmung der Leuchtenparameter in Gebrauchslage und weit innerhalb der photometrischen Grenzentfernung. Die Vermessung erfolgt rechnergestützt und nach DIN 5032 Teil 4. Das Goniophotometer RiGO 801 löst sich somit von der Annahme über Leuchten/Lampen als Punktlichtquellen. Es stehen Messdaten zur Verfügung, die vor allem im Nahfeld von Leuchten/Lampen für die Simulation und exakte Bewertung von lichttechnischen Baugruppen und für die Beleuchtungsplanung notwendig sind.



Bild 7: Goniophotometer RiGO

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Fischbach, I.; Schmidt, F.; Riemann, M.: Anwendung angepasster CCD-Sensortechnik in der ortsaufgelösten Lichtmesstechnik. Tagungsbericht 3. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs "Lux-junior '97", Dörfeld/Ilm 26. - 28. 9 1997, S. 250 – 259, 1997
- [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, 1995
- [3] Krüger, U.: Technological aspects of spectral correction adjustment of space resolved radiation detectors. Light & Engineering, Vol. 9; No.3,pp.61-71,2001
- [4] Giczi, I.: Evaluation of contrast rendering factor (CRF) distribution on large area using solid state camera and image processing system. 22. CIE-Session 1991, Melbourne, Vol. 1(1), pp 23 – 24, 1991
- [5] Wolf, S.; Löffler, K.; Gall, D.: Ermittlung von CRF-Werten mittels bildauflösender Leuchtdichtemessung. Licht '96, Leipzig 2. - 4. 10. 1996, S. 334 – 338, 1996
- [6] Berutto, V.; Fontoyout, M.: Applications of CCD Cameras to lighting research: Review and extension to the measurement of glare indices. 23. CIE-Session 1995, New Delhi, pp 192 – 195, 1995
- [7] Wolf, S.; Gall, D.: Praktische Messung von Blendungsparametern am Beispiel des UGR. Tagungsbericht 3. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs "Lux-junior '97", Dörfeld/Ilm 26. - 28. 9 1997, S. 133 – 138, 1997
- [8] Riemann, M.; Schmidt, F.; Poschmann, R.: Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung mittels eines bildauflösenden Goniophotometers. Licht 7 - 8, S. 592 – 597, 1993

Autorenangaben:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Gall
Dipl.-Ing. Wolf Stefan

PD Dr.-Ing. habil Franz Schmidt
Dipl.-Ing. Udo Krüger

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Lichttechnik und Technische Optik
Fachgebiet Lichttechnik
PF 10 05 65
D-98684 Ilmenau
Tel.: 03677 84690
Fax: 03677 842463
Dietrich.Gall@mb.tu-ilmenau.de
Stefan.Wolf@mb.tu-ilmenau.de

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
Werner-von-Siemens-Straße 10
98693 Ilmenau

Tel.: 03677 4624 0
Fax: 03677 4624 10
Franz.Schmidt@technoteam.de
Udo.Krueger@technteam.de