

Angewandte ortsauflösende Licht- und Farbmesstechnik – Einführung und Applikationsbeispiele

Schmidt, Franz und Krüger, Udo
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
Werner-von-Siemens-Straße 10

D-98693 Ilmenau

Franz.Schmidt@technoteam.de; Udo.Krueger@technoteam.de

1 Einführung

Die orts aufgelöste Bestimmung von licht- und strahlungsphysikalischen Größen ist in den letzten Jahren immer wichtiger geworden. In zahlreichen Applikationen u.a. Nachtdesign im Auto, Bewertung von Arbeitsplatz-, Straßen- und Tunnelbeleuchtung, um nur wenige Beispiele zu nennen, gehört die orts aufgelöste Bestimmung der Leuchtdichte- und Farbwerte zum Stand der Technik.

In Ihrem Beitrag gehen die Autoren kurz auf die Grundlagen der orts aufgelösten Leuchtdichte- und Farbmessstechnik ein, um darauf aufbauend anhand von Applikationsbeispielen die Zielstellungen bestimmter Messaufgaben und deren Umsetzung aus Sicht der Messtechnik zu erläutern.

2 Grundlagen der Leuchtdichte- und Farbmessung

Leuchtdichte- und Farbmesskameras setzen heute auf hochwertigen CCD-Digitalkameras auf, deren jede einzelne entsprechend analysiert, kalibriert und an die Lichtmessung angepasst werden sollte. Die Signalwerte im Bild lassen sich dann direkt in Leuchtdichte- bzw. Farbwerte umrechnen.

Leuchtdichte- und Farbmesskameras besitzen wie alle technischen Geräte von idealen Modellen abweichende Eigenschaften. Diese Abweichungen lassen sich in systematische und stochastische Komponenten einteilen. Abweichungen der Messwerte vom idealen Verhalten, die determiniert sind, können erfasst und korrigiert werden. Die systematischen Restabweichungen nach der Korrektur sind in ihrer Größe durch die technologischen Voraussetzungen, die vorhandenen Kalibriermittel und die Kalibriersorgfalt bedingt. Als stochastische Komponenten existieren signalabhängiges und signalunabhängiges Rauschen.

Die Leuchtdichte $L(x, y, \vartheta, \varphi)$ 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). Die CCD-Matrix als strahlungsempfindlicher Sensor wandelt den einfallenden Strahlstrom in Signalladungen entsprechend ihrer spektralen Empfindlichkeit $S(\lambda)$.

Soll das System Leuchtdichten bzw. Farbvalenzen messen, muss die spektrale Empfindlichkeit des Gesamtsystems an die $V(\lambda)$ -Funktion bzw. an die Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ angepasst sein. Dazu wird für jede Kamera ein Filter $F(\lambda)$ bzw. ein Satz von Filtern $F_i(\lambda)$ eingesetzt. Der Einsatz des Filters bzw. die Kombina-

tion der Messwerte des Filtersatzes passt in Verbindung mit der spektralen Empfindlichkeit des jeweiligen Sensors und der spektralen Transmission des Objektivs das Messsystem an die oben genannten Normempfindlichkeiten an.

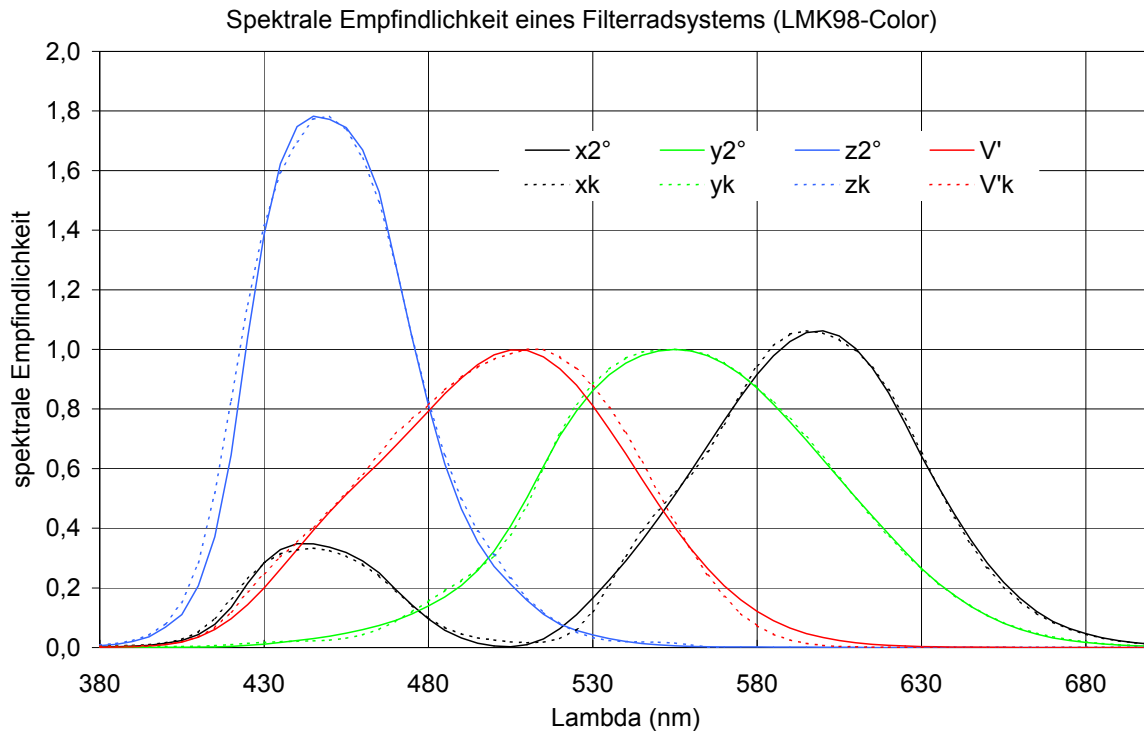


Abbildung 1: Relative spektrale Empfindlichkeit eines Filterradsystems LMK98 Color

Mit einem Messsystem, das die in Abbildung 1 dargestellten relativen spektralen Empfindlichkeiten realisiert, können Leuchtdichten im photopischen und skotopischen Bereich und Farbvalenzen orts aufgelöst bestimmt werden. Bei der spektralen Anpassung von ortsauflösenden Sensoren sind zahlreiche Probleme zu beachten, die in [1] beschrieben sind.

Das vorgestellte System realisiert die folgenden spektralen Kennwerte:

Zielfunktion	f'_1 (%)	f_1^* (%)
X2°	3,9	3,9
y2° / $V(\lambda)$	2,1	2,1
Z2°	5,4	5,9
$V'(\lambda)$	6,2	5,5

- Kennwert f'_1 siehe DIN5032
- Kennwert f_1^* siehe [2] - f'_1 ohne Wichtung mit Normlichtart A

Mit einem derartigen Messsystem können zahlreiche Aufgabenstellungen im Bereich lichttechnischer Fragestellungen realisiert werden.

2.1 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 $n_0 + (ldN)/2$ Bit gesteigert werden. (N...Anzahl der Mittelungen (Pixel, Bilder), n_0 ... Grundauflösung des AD-Wandlers in Bit).

Lichttechnisch zu bewertende Szenen sind vielfach durch einen hohen Dynamikumfang (z.B. Leuchten und beleuchtete Szene gemeinsam im Bild) gekennzeichnet. Der mit einer Messkamera erfassbare Dynamikumfang kann durch eine High-Dyn-Messung, bei der die Szene mehrfach und mit unterschiedlichen Integrationszeiten aufgenommen wird, erhöht werden. Mit diesem Verfahren sind Dynamikumfänge von 10^6 und Genauigkeiten bis 10^{-2} erreichbar.

2.2 Korrektur realer Eigenschaften ortsauflösender Messsysteme

Beim Einsatz der Messkamera zur Leuchtdichte- bzw. Farbmessung oder zur Bestimmung abgeleiteter lichttechnischer Größen sind neben den Eigenschaften des Messsystems selbst (technische Parameter) eine Vielzahl weiterer Einflüsse für die Erreichung hinreichend genauer Messergebnisse maßgebend. Wie bei jedem Messsystem kann die unsachgemäße Anwendung zu schwerwiegenden Fehleinschätzungen führen. Deshalb sei dringend darauf hingewiesen, jedes Messergebnis kritisch zu bewerten. Neben dem unsachgemäßen Umgang mit dem Messsystem, wobei insbesondere die Abbildung der Szene (unscharfe Abbildung, Messen zu kleiner Strukturen) einen großen Einfluss hat, ist auch die Gestaltung der Szene nicht unwesentlich. So können die Messdaten z.B. durch Fremdlicht (dessen Größenordnung vielfach unterschätzt wird) oder durch Instabilitäten, wie z.B. Flimmern von Lampen beeinflusst sein und liefern nur noch eine geringe oder gar keine Information über die lichttechnischen Parameter des Gerätes, der Anlage oder der Szene.

Für das technische Messsystem müssen unter anderem die folgenden Effekte korrigiert bzw. vermieden werden:

- Dunkelsignal
- Nichtlinearität
- Abschattung des Objektivs (Shading)
- Blooming, Smear
- Defekte Bildpunkte

Beispielhaft für einen zu beachtenden Effekt wird im Folgenden auf das Streulicht eingegangen:

Jedes abbildende System erzeugt einen mehr oder weniger großen Anteil an Streu- oder Falschlicht. Das abbildende System besteht aus Linsen oder Spiegeln, die neben ihrer idealen Funktion (Linsen - Brechung bei Lichtdurchgang; Spiegel - Reflexion) auch nichtideales Verhalten haben.

Glas-Luft-Grenzflächen brechen nicht nur, sondern reflektieren auch Licht (ca. 4%) und Spiegel reflektieren nicht nur gerichtet, sondern auch diffus. Licht kann an Linsenfassungen und Blenden gestreut werden.

Damit wird Licht vom Objekt nicht nur an die Stellen übertragen, die sich aus der geometrischen Optik ergeben, sondern gelangt auch an ganz andere Stellen. Weiterhin hat der Sensor selbst ein endliches Reflexionsvermögen (Silizium 30 ...65 %). D.h. das auf den Sensor abgebildete Licht wird zu beträchtlichen Teilen reflektiert und "geistert im Objektiv herum". Alle diese Effekte führen zu einem mehr oder weniger starken "Streulichtteppich".

Damit sind zwei wesentliche Messprobleme verbunden:

1. Großflächig ausgeleuchtete Objekte erhalten auf Grund des Streulichtes einen etwas größeren Messwert (abhängig von der Ausleuchtung des Objektfeldes insgesamt).
2. In dunklen Bereichen misst man zusätzlich Streulicht, d.h. gemessene Kontraste sind stets kleiner als die tatsächlich vorhandenen (ebenfalls abhängig von der Ausleuchtung des Objektfeldes insgesamt). Wichtig ist dies vor allem bei der Beurteilung von Negativkontrasten, d.h. kleine dunkle Strukturen vor großem hellem Hintergrund.

3 Beispielapplikationen

Der Einsatz von bildauflösenden Messverfahren bringt einige nicht zu unterschätzende Vorteile:

1. Der zeitliche Aufwand zur Messung z.B. an Arbeitsplätzen, Stadien, Flughäfen und Straßen kann mit portablen CCD-Messsystemen in akzeptablem Rahmen gestaltet werden.
2. In einem Messbild sind die Informationen über die geometrischen Zusammenhänge der einzelnen zu vermessenden Punkte bereits enthalten.
3. Die Speicherung von Aufnahmeszenen erlaubt die einfache Auswertung und Protokollierung der Messung.
4. Die rechentechnische Anbindung der bildauflösenden Licht- und Farbmesssysteme gestattet eine einfache Berechnung von Leuchtdichten, Farbwerten sowie abgeleiteten Parametern, z.B. Beleuchtungsstärken (bei Einsatz von Reflexionsnormalen).

Stellvertretend für die Vielzahl von Anwendungen sind im Folgenden einige aufgeführt:

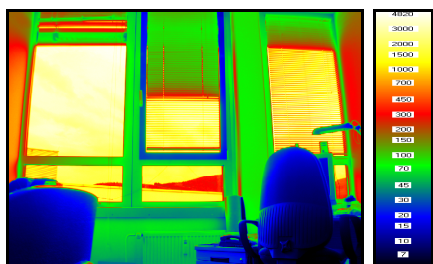


Innenraummessung

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

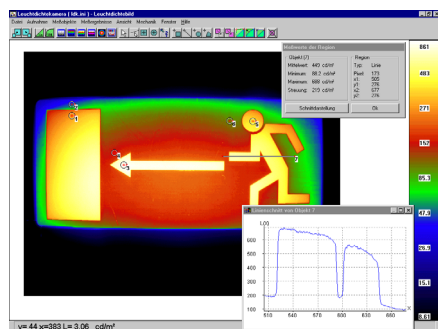
- Kontraste (z.B. CRF-Messung)
- Beleuchtungsstärken (durch den Einsatz von Reflexionsvorlagen mit Lambert-Charakteristik auf Leuchtdichtemessung rückführbar)

Durch angepasste Objektive kann der gesamte Halbraum mit einer Messung erfasst werden.



Blendungsbewertung

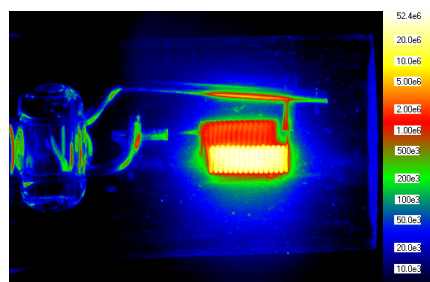
Bei der Beleuchtung mit Tages- oder künstlichem Licht ist die Blendung ein wesentlicher Gesichtspunkt. Dies betrifft die Entwicklung und Fertigung von Leuchten ebenso wie die Entwicklung und den Einsatz von Sonnenschutz- oder Lichtleitsystemen. Die Bestimmung moderner Parameter zur Blendungsbewertung (z.B. UGR) erfordert den Einsatz bildauflösender Leuchtdichtemesstechnik.



Leuchtenvermessung

Die Leuchtdichtevert eilung ist ein wesentliches Kriterium zur Kennzeichnung von Leuchten. Neben der Kontrolle der zur realisierenden Vorschriften kann sie auch marktwirksam in Katalogen verwendet werden.

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



Lampenvermessung

Neben 2-dimensionalen Leuchtdichtevert eilungen sind 4-dimensionale Lichtvert eilungen $L(x, y, \delta, \phi)$ für die Entwicklung lichttechnischer Baugruppen notwendig. Werden die bildauflösenden Leuchtdichtemesser in einem Goniometer eingesetzt, stehen Messsysteme zur Erfassung solcher Strahlendaten zur Verfügung.

3.1 Beurteilung der Ausstrahlcharakteristik von Lampen/Leuchten durch indirekte Messungen

Die Ausstrahlcharakteristik von Lampen/Leuchten kann z.B. mit Hilfe einer Bündelmessung indirekt bestimmt bzw. bewertet werden. Für eine Bündelmessung strahlt man mit der Lampe/Leuchte an eine homogene Wand. Die Kamera wird seitlich der Lichtquelle positioniert und bewertet primär die Leuchtdichte- und Farbvert eilung auf dieser Wand.

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt in mehreren Schritten, die an die jeweilige Applikation angepasst werden können:

1. Entzerrung des Bündelbildes mit Hilfe einer projektiven Entzerrung. Es entsteht ein Bild, das einer Kameraposition in der Lichtquelle entspricht, d.h. die Verzerrungen, die durch die schräge Ansicht der Wand entstehen, werden eliminiert. Für diese Umrechnung werden Marken an der Wand angebracht, die jeweils einem bestimmten Ausstrahlwinkel der Lichtquelle entsprechen.
2. Das entzerrte Bild wird in ein Winkelbild umgerechnet. Dazu wird eine entsprechend parametrisierte Koordinatentransformation auf das entzerrte Bild angewendet, die dafür sorgt, dass die Pixel äquidistant in Theta und Phi-Winkel dargestellt werden können.
3. In diesem Bild können dann die Halbwertswinkel sehr einfach bestimmt (abgelesen) werden bzw. andere Auswertungen erfolgen (z.B. Farbverläufe in Schnitten).

Die folgenden Beispiele stellen die Verhältnisse bei einer Bündelmessung für einen Halogenstrahler dar. Alle Darstellungen sind logarithmisch skaliert, wobei ein Dynamikumumfang von 3 Dekaden auf den Anzeigebereich abgebildet wurde.

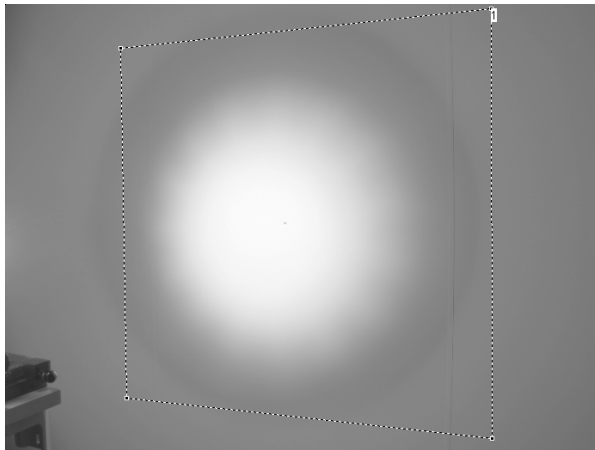


Abbildung 2: Leuchtdichtebild des Bündels

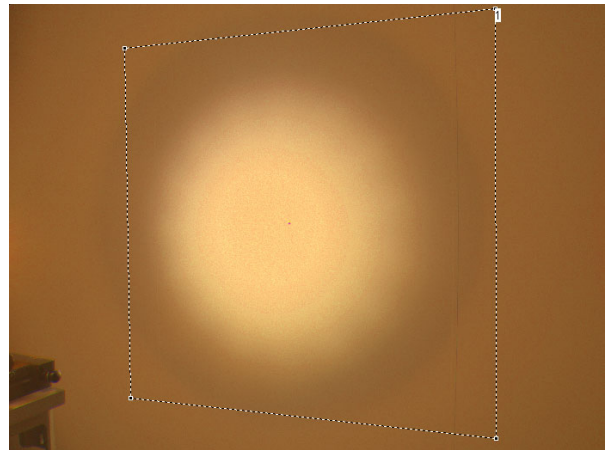


Abbildung 3: Farbbild des Bündels

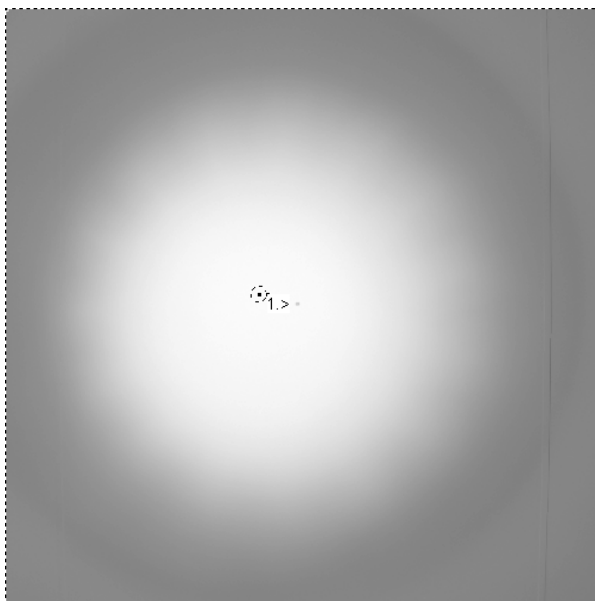


Abbildung 4: Bündel nach projektiver Entzerrung



Abbildung 5: Farbbündel nach projektiver Entzerrung

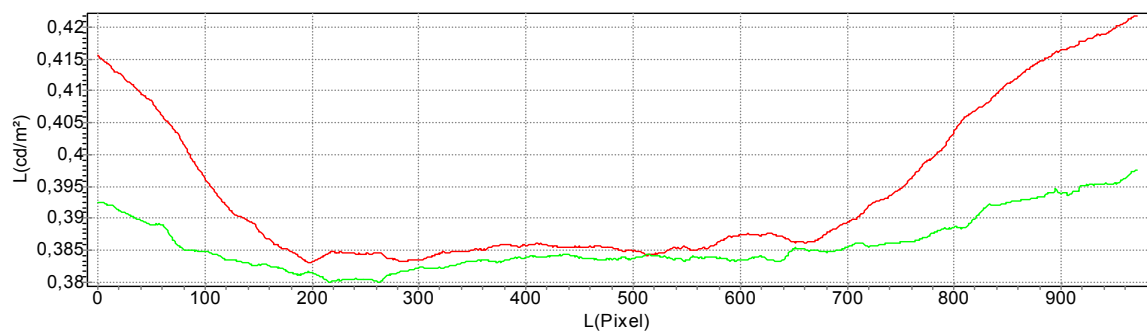


Abbildung 6: Darstellung der Farbkoordinaten (x Rot und y Grün) für einen Schnitt durch das Maximum der Bündelmessung

3.2 Bewertung der Ausstrahlcharakteristik von Lampen/ Leuchten durch direkte Messungen

Bei der Vermessung von Lampen sind einige besondere Bedingungen zu beachten. Lampen sind i.a. kleine Objekte. Sie benötigen zur Messung Abbildungssysteme mit Abbildungsmaßstäben $\beta' \approx 1$. Dies ist prinzipiell mit Makroobjektiven oder Objektiven langer Brennweite möglich. Die Wärmeentwicklung der Lampen ist zu beachten. Ein größerer Arbeitsabstand ist anzustreben.

Die hohen Leuchtdichten erfordern den Einsatz von Graufiltern. Bei hohen Dämpfungen (kleine Transmissionen $\tau < 10^{-3}$) sind die spektralen Abhängigkeiten $\tau(\lambda)$ zu berücksichtigen, da die Filter nicht mehr "grau" sind. Bei bekannter spektraler Emission der Lampen kann ein CCF (color correction factor) berechnet werden.

Die Leuchtdichten können in verschiedenen Skalierungen dargestellt werden und die Auswertung in bestimmten Regionen (z.B. über Linien) kann sehr schnell und unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen.

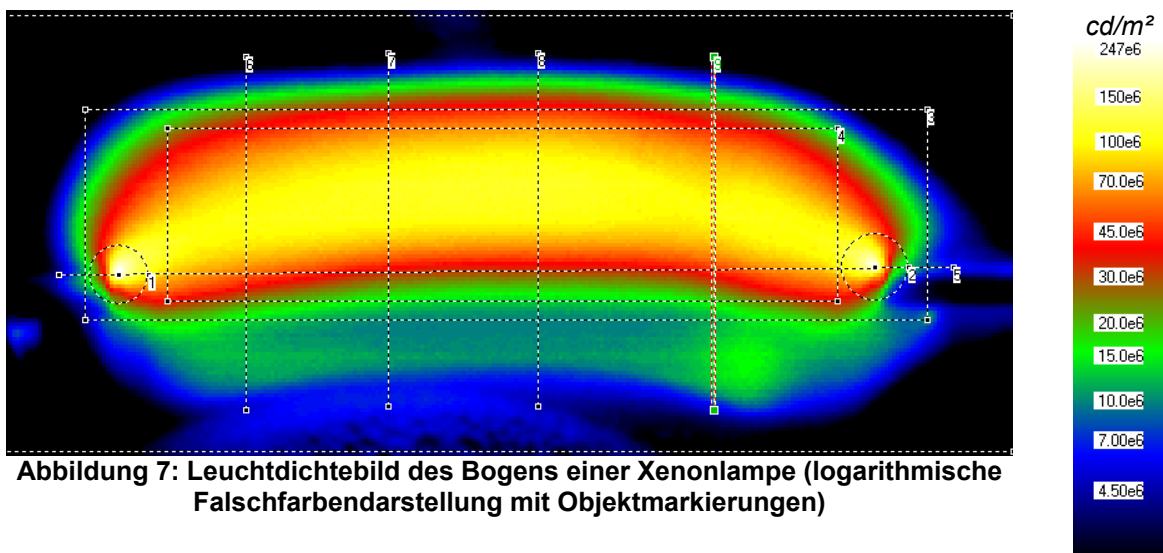


Abbildung 7: Leuchtdichtebild des Bogens einer Xenonlampe (logarithmische Falschfarbendarstellung mit Objektmarkierungen)

Die umfassende Bestimmung von Lampen- und Leuchtendaten wird immer wichtiger. Für die Entwicklung und Bewertung von Lampen und Leuchten ist die Lichtstärkeverteilungscharakteristik (LVK) wesentlich. Für Beleuchtungsplaner sind sie die Grundvoraussetzung einer korrekten Planung.

Die Messdaten können zur Simulation und zur Lampen- und Leuchtenentwicklung genutzt werden. Die Daten sind zur Katalogisierung und zur Präsentation erforderlich.

Die Messung im Fernfeld erfordert große Abstände der Messsensoren. Die Goniophotometer RiGO nach Prof. Riemann nutzen die bildauflösende CCD-Leuchtdichtemesstechnik LMK zur Bestimmung der Lichtstärke- und Leuchtdichtevertellungen und messen damit direkt im Nahfeld. Eine CCD-Kamera wird durch ein Goniometer auf einer Kugelfläche um die ruhende Leuchte herumgeführt, wobei der Radius dieser Kugel nur durch den Feldwinkel der Kamera festgelegt ist. Das Goniometer kann damit auch in kleineren Laboratorien aufgestellt werden. Die Goniophotometer RiGO801 werden an das Lampen/Leuchtensortiment des Kunden und an den zur Verfügung stehenden Messraum angepasst. Die Messsysteme liefern die vollständige Beschreibung der Lichtausstrahlung durch 4D-Leuchtdichtedaten $L(x,y,z,\delta,\varphi)$ [3].

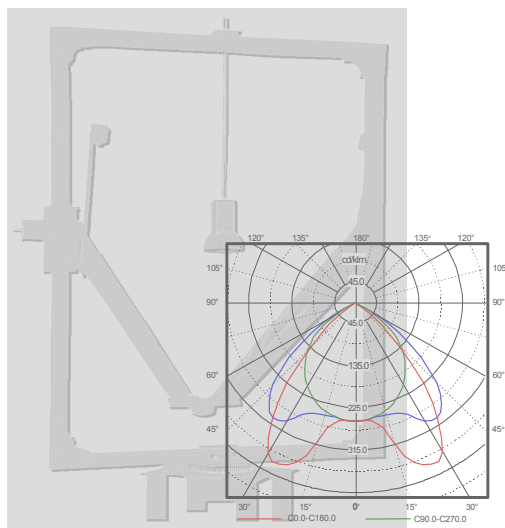


Abbildung 8: RiGO 801 (Konstruktionsprinzip) mit LVK in C-Ebenen-Darstellung

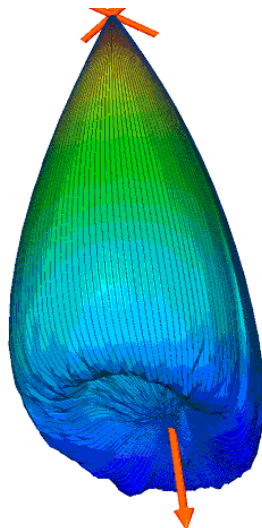


Abbildung 9: LVK eines Down-Light als Körper dargestellt

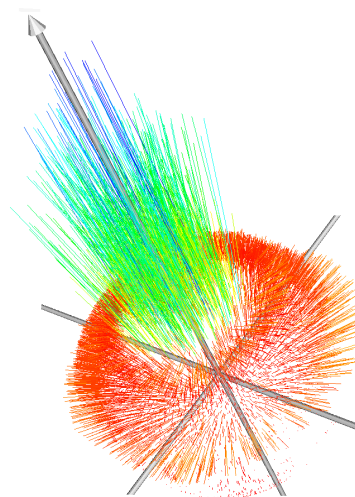


Abbildung 10: Strahlendaten-satz einer LED (weiß)

Die Messung der Objekte erfolgt in Gebrauchslage. Bewegungen und Lageveränderungen, die den Lichtstrom verändern, werden vermieden.

Für die Entwicklung von Leuchten werden zunehmend Simulationsprogramme, die auf Strahlendaten von Lampen aufsetzen, genutzt. Diese Strahlendaten werden von den Goniophotometern RiGO801 geliefert.



Abbildung 11: Goniophotometer

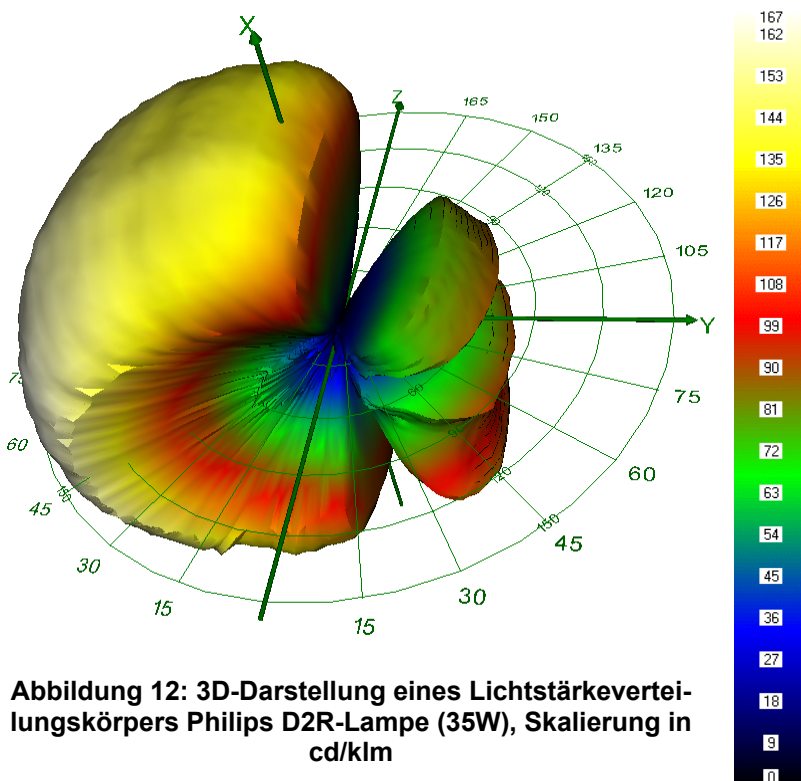


Abbildung 12: 3D-Darstellung eines Lichtstärkeverteilungskörpers Philips D2R-Lampe (35W), Skalierung in cd/klm

3.3 Beurteilung der Leuchtdichteverhältnisse im Tunnel

Die Beurteilung von Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken in Tunneln und auf Straßen ist zur kontinuierlichen Gewährleistung der Verkehrssicherheit sehr wichtig. Mit Hilfe der orts aufgelösten Leuchtdichtemesstechnik können gleichzeitig große Tunnelbereiche erfasst werden. Dies kann in besonderen Fällen auch aus einem langsam fahrenden Fahrzeug heraus erfolgen. Mann kann die Sperrzeiten des Tunnels mit diesen Methoden reduzieren oder ganz vermeiden.

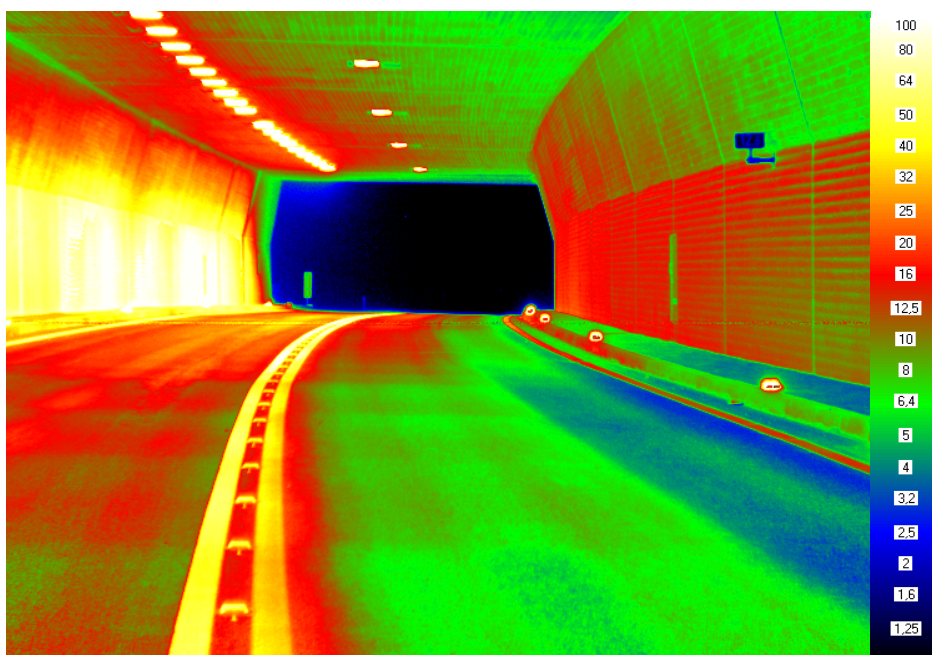


Abbildung 13: Falschfarbendarstellung der Leuchtdichte eines Tunnelsegmentes. Skalierung auf 100cd/m², Log. Darstellung über 2 Dekaden

Die so schnell erfassten Aufnahmen können im Büro ausgewertet werden, wobei verschiedene Aspekte berücksichtigt werden können und die Dokumentation der Messpunkte durch die Darstellung im Bild immer gewährleistet ist.

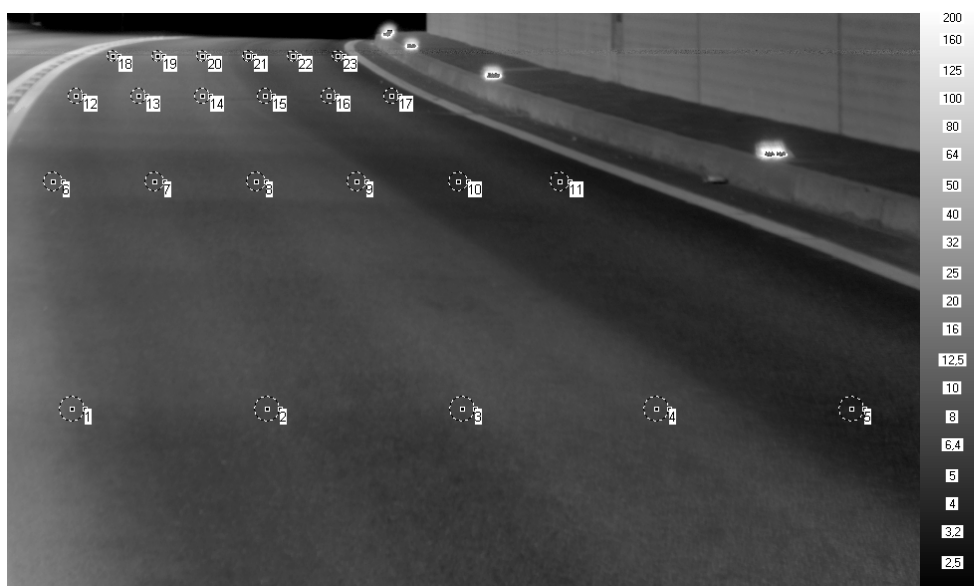


Abbildung 14: Ausschnitt aus Abbildung 13 mit Messpunkten nach DIN5044

Man erhält für die dargestellten Messpunkte die folgenden Leuchtdichten:

Leuchtdichten (cd/m²)							
	17,2	19,2	16,7	10,9	10,3	6,1	
	14,2	14,1	13,6	8,5	7,50	5,7	
	10,2	8,5	8,0	6,8	4,4	3,8	
	10,7	7,6	7,4	7,0	3,7		
Min	10,2	7,6	7,4	6,8	3,7	3,8	3,7
Max	17,2	19,2	16,7	10,9	10,3	6,1	19,2
U_i	1,68	2,53	2,27	1,60	2,81	1,63	
						U₀	5,22

Literatur:

- [1] Krüger, U.: Technological aspects of spectral correction adjustment of space resolved radiation detectors. Light&Engineering 3/2001, pp.61-71, 2001.
- [2] Muray, K.; Schanda, G., Schanda, J.: Filter fabrication techniques for LED photometry. CIE LED Symposium 97 on Standard Methods for Specifying and Measuring LED Characteristics, CIEEx013, pp.61-64, 1997
- [3] Riemann, M., F. Schmidt und R. Poschmann: Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung mittels eines bildauflösenden Goniofotometers. LICHT , H. 7-8, S. 592 - 596, 1993.