

I. Fischbach / F. Schmidt

Die Erfassung lichttechnischer Größen mit bildauflösender Leuchtdichtemessung (Leuchtdichte-Analysator)

1 DAS MESSPROBLEM

Für Leuchtensimulationen (z.B. Berechnung von Reflektoren in Scheinwerfern), für Beleuchtungsplanungen oder für Raytracing-Verfahren (Computersimulation von Wohnräumen o.ä.) sind die Daten der strahlenden/leuchtenden Objekte erforderlich. Die vollständige Beschreibung der Ausstrahlungsverhältnisse eines Körpers erfordert die Angabe der Leuchtdichteverteilung $L_{x,y,z,l}(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ an allen Oberflächenpunkten $(x, y, z) \in \text{Oberfläche}$ des Körpers. (In den folgenden Betrachtungen soll die spektrale Verteilung in Abhängigkeit von der Oberfläche außer Acht gelassen werden.)

Da sich eine Oberfläche durch zwei Parameter beschreiben läßt $z = f(x, y)$, ergibt sich ein 4-dimensionales Datenfeld $L(\mathbf{q}, \mathbf{f}, x, y)$.

Für die Erfassung der Leuchtdichteverhältnisse auf der Lampenoberfläche ist der Einsatz von integral messenden Einzelsensoren nicht möglich. Die erforderlichen Daten können prinzipiell mit einer **bildauflösenden Leuchtdichtekamera (LMK)** z.B. auf einer Positioniereinheit (Goniometer) vermessen werden.

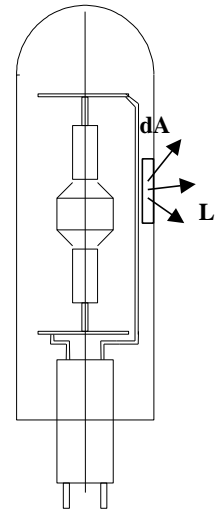


Bild 1: Beispiel einer zu vermessenden Lampe

2 GRUNDPRINZIP: BILDAUFLÖSENDES GONIOPHOTOMETER

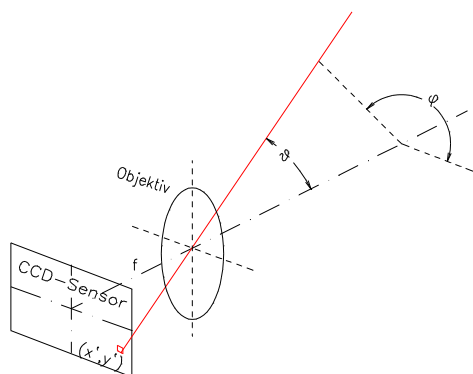


Bild 2: Zuordnung Kamerapixel zu Leuchtdichtegerichtung

Eine Kamera erfährt mit jeder Aufnahme ein Leuchtdichtebild. Dabei wird von jedem Bildpunkt (x', y') eine Leuchtdichtegerichtung (\mathbf{q}, \mathbf{f}) im Raum mit

$$\mathbf{q} = \arctan\left(\frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{f}\right)$$

$$\mathbf{f} = \arctan\left(\frac{y'}{x'}\right)$$

und einer dem Pixelgrauwert entsprechenden Leuchtdichte $L = f(\text{GW})$ erfährt. Alle von der Aufnahme erfähten „Leuchtdichtestrahlen“ gehen durch einen Punkt im Raum (Eintrittspupille des Objektivs, i.a. die Blende).

In einem bildauflösenden Goniometer wird die Kamera oder das Meßobjekt von der Goniometermechanik bewegt und an mehreren Punkten eine Aufnahme gemacht.

Bei entsprechend kalibrierter Kamera (Leuchtdichtemeßkamera LMK) ist die gemessene physikalische Größe das Leuchtdichtebild.

Die Menge aller erfaßten Leuchtdichtebilder ergibt eine vierdimensionale Leuchtdichteverteilung $L(\mathbf{q}, \mathbf{f}, x, y)$, aus denen weitere lichttechnische Größen im Raum oder auf Flächen bestimmt werden können.

Die Rohdatenmenge (Leuchtdichtenverteilung) nach der Messung kann sehr hoch werden.

In diesen Daten sind **alle** Informationen, die die Lichtausstrahlung der Lampe betreffen (außer spektrale Verteilungen), enthalten.

Werden unmittelbar im Anschluß an die Bildaufnahme lichttechnische Größen berechnet, kann der Speicherbedarf auf das für diese benötigte Maß verringert werden.

Ein vernünftiger Kompromiß ist die Übergabe der Daten als

- lokale Lichtstärkeverteilungskörper LVK $I_j(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ auf A_j
bzw. als weitere Datenreduktion die Beschreibung durch
- Einheitslichtstrahlen $\Phi(x, y, z, \mathbf{q}, \mathbf{f}) = \Phi_0$.

An eine Fläche angebunden reduziert sich auch dieses Datenfeld auf ein vierdimensionales $\Phi(x, y, \mathbf{q}, \mathbf{f})$ mit $z = f(x, y)$.

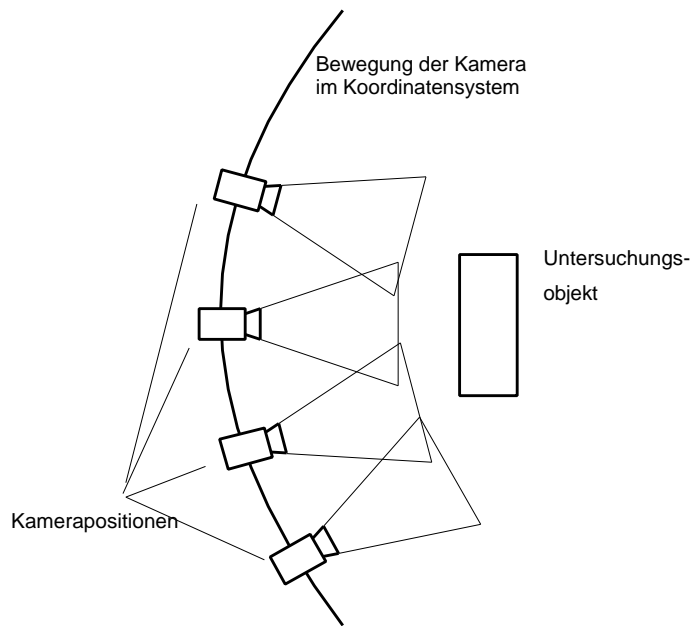
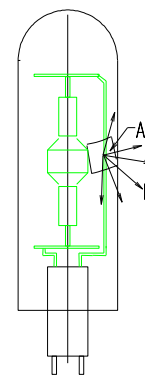


Bild 3: Kamerapositionen zur Leuchtdichtebilderfassung in einem Goniometer

3 GRUNDPRINZIP DER BERECHNUNG REDUZIRTER DATEN

3.1 Lokale Lichtstärkeverteilungskörper

Die Lampen/Leuchtenoberfläche oder eine andere beliebige Fläche um die Lampe/Leuchte herum wird in hinreichend kleine Teile zerlegt. Für jede Teilfläche A_j wird ein eigener Lichtstärkeverteilungskörper $I_j(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ berechnet. Der Speicherbedarf ist dann proportional zur Anzahl der Flächen und dem Speicherbedarf für einen LVK. Der LVK wird an den jeweiligen Flächenschwerpunkt angebunden.



Dies bedeutet für den zu entwickelnden Algorithmus: eine Umsortierung der erfaßten Leuchtdichten aus den Leuchtdichtebildern

$$L(\mathbf{q}, \mathbf{f})|_{(x,y)\text{Kameraposition}k} \rightarrow L(\mathbf{q}, \mathbf{f})|_{(x,y)\text{Oberfläche } j}$$

Bild 4: Teilflächen A_j auf der Lampenoberfläche mit eigenem Lichtstärkeverteilungskörper LVK

und

- Wichtung mit Raumwinkelprojektion der Aufnahmepositionen und Aufsummierung über solch eine Oberfläche j

$$I(\mathbf{q}, \mathbf{f})_j = \sum_{\forall (x,y) \in \text{Oberfläche } j} L(\mathbf{q}, \mathbf{f})|_{(x,y) \text{ Oberfläche } j} \cdot \Omega_{p(x,y)}$$

$\Omega_{p(x,y)} = \text{Raumwinkelprojektion, abhängig von Dichte der Erfassungspositionen}$

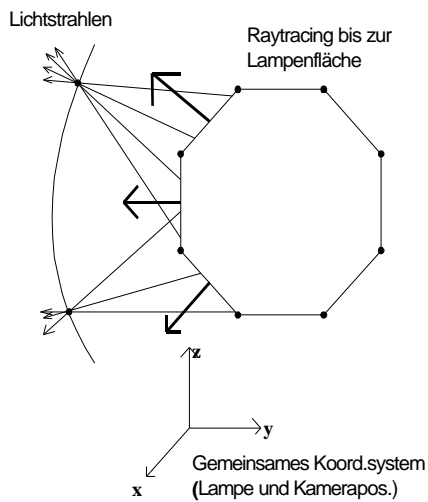


Bild 5: Zusammenfassung von Lichtstrahlen aus unterschiedlichen Leuchtdichtebildern (Kamera-bildern) zu Lichtstärkeverteilungen auf den Teilflächen

Bild 5 veranschaulicht den Algorithmus zur Berechnung der lokalen LVK:

- Aus den Leuchtdichten in jedem Kamerabild werden Lichtstrahlen berechnet (Lichtstromanteil je Kameraposition und Raumrichtung).
- Diese Strahlen werden durch Strahlverfolgung bis auf eine der Teilflächen A_j zurückgeführt. Sie tragen jeweils zum lokalen Lichtstärkeverteilungskörper ihrer Durchstoßungsfläche mit der Teilfläche bei.
- Voraussetzung ist die exakte Kenntnis der Lage der Kamera und der Teilflächen in einem gemeinsamen Koordinatensystem.

3.2 Liste von Einheitslichtstrahlen

Eine weitere Möglichkeit ist, die eben erwähnten Lichtstrahlen als Einheitsstrahlen zu definieren. Dann sind in jedem Kamerabild jeweils so viele Leuchtdichten gewichtet mit entsprechenden Raumwinkeln aufzusummieren, bis sich ein vorher festgelegter Einheitslichtstrom Φ ergibt. Diese Einheitsstrahlen ergeben ebenfalls eine Liste vierdimensionaler Größen $\Phi(\mathbf{q}, \mathbf{f}, x, y)$. Die Größe des Datenfeldes ist über die Vorgabe der Größe des Einheitslichtstromes der Lichtstrahlen in weiten Grenzen steuerbar und damit einfach an die jeweilige Problemstellung anpaßbar.

Bei der Entwicklung eines bildauflösenden Goniometers für ein spezielles Meßproblem sind weitere Zusammenhänge zu beachten, die sich aus den Eigenschaften der zu vermessenden Lichtstärkeverteilungskörper und den eingesetzten Geräten (Leuchtdichtekamera und Goniometermechanik) ergeben. Sie erfordern letztendlich ein an das Meßproblem angepaßtes Gerätedesign. Einige der Zusammenhänge zwischen den Geräteparametern und den Meßwerten sollen im folgenden Abschnitt zumindest kurz angeschnitten werden.

4 DISKRETISIERUNG DES 4-DIMENSIONALEN DATENFELDES

Physikalisch gesehen, ist das Leuchtdichtefeld eine stetige Funktion über einem vierdimensionalen Definitionsbereich. Im bildauflösenden Goniometer werden von der Kamera an vorher festgelegten Orten (Goniometer-Winkel) Bilder aufgenommen. Die Bilder selbst repräsentieren Leuchtdichtedaten an diskreten Orten, Pixel (x', y') und zugehörigen diskreten Winkeln (\mathbf{q}, \mathbf{f}) im Raum. In Bezug auf das kontinuierliche Leuchtdichtefeld bedeutet das die Entnahme von

Meßwerten an diskreten "Stützstellen", die kontinuierliche Funktion wird durch Abtastwerte ersetzt. Die Lage der Stützstellen im vierdimensionalen Definitionsbereich wird bestimmt durch:

- die Orte im Raum, an denen eine Kameraaufnahme erfolgt,
- die Lage der Bildpunkte im Kamerabild.

Bei der Festlegung der Abstände der Kamerapositionen und der Diskretisierungsabstände der Leuchtdichtedaten in den Leuchtdichtebildern $(\Delta x', \Delta y') = f(\Delta \mathbf{q}, \Delta \mathbf{f})$ ist das Abtasttheorem zu beachten. Durch die Festlegung der Geräteparameter

- Abstand zwischen Kamera und Goniometerdrehpunkt
- Winkelschrittweite des Goniometers zwischen zwei Kameraaufnahmen (umgekehrt proportional zur Anzahl der aufzunehmenden Bilder)
- Öffnungswinkel des Objektivs

nimmt man unter Beachtung des tatsächlichen Funktionsverlaufs der Leuchtdichteverteilung unmittelbar Einfluß auf die Größe der verbleibenden Meßfehler. Eine (gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen natürlich stark übertriebene) anschauliche

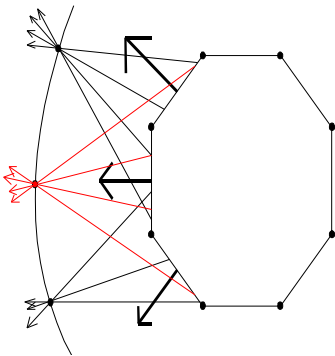


Bild 6: Einbeziehung unterschiedlicher Kamerapositionen in einen LVK

Darstellung der Ursache der Meßfehler zeigt Abbildung 6.

Wird die rot gezeichnete Kameraposition berücksichtigt, dann sind die für die drei Teilflächen berechneten LVK wesentlich genauer als ohne Berücksichtigung, weil mehr Lichtstrahlen je Fläche zur Bestimmung des lokalen LVK herangezogen werden können. Umgekehrt beeinflussen natürlich solche Größen, wie die Anzahl der aufzunehmenden und zu verarbeitenden Bilder die Meßzeit.

5 GENAUIGKEIT DER LEUCHTDICHTEMESSUNG

Die Genauigkeit der Leuchtdichtemeßdaten hängt neben der durch die Meßtechnik (LMK96/98, RIGO601) vorgegebenen Meßgenauigkeit auch vom Meßregime (Einzelbildmessung, Mehrbildmessung, High-Dyn-Messung) ab. Die erreichbare Genauigkeit kann durch einen absoluten Fehler $\Delta L(\mathbf{q}, \mathbf{f}, x, y)$ oder einen auf den Meßwert bezogenen, relativen Fehler $\frac{\Delta L(\mathbf{q}, \mathbf{f}, x, y)}{L(\mathbf{q}, \mathbf{f}, x, y)}$ angegeben werden.

Die zu erreichende Genauigkeit der endgültig zu errechnenden Daten bei der Erfassung von lichttechnischen Daten hängt wesentlich von der weiteren Verarbeitung der Leuchtdichtedaten ab.

Sollen die Leuchtdichtebilder $L(x, y)$ bzw. $L(x, y, \mathbf{q}, \mathbf{f})$ selbst als Ergebnis zur Verfügung stehen, ist eine Aussage zum relativen Fehler der Meßdaten sinnvoll. An jeder Stelle im Bild kann dann die Meßgröße Leuchtdichte in ihrer Meßgenauigkeit eingeschätzt werden.

Aus den gemessenen vierdimensionalen Leuchtdichtedaten $L(\mathbf{q}, \mathbf{f}, x, y)$ sollen vielfach auch abgeleitete integrale Größen bestimmt werden:

Lichtstärkeverteilungen:

$$I(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \sum_i L_i(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot \Omega_{p(x,y)}$$

Lokale Lichtstärkeverteilungen auf Teiloberflächen (siehe Pkt. 3.1):

$$I(\mathbf{q}, \mathbf{f})_j = \sum_{\forall(x,y) \in \text{Oberfläche}_j} L(\mathbf{q}, \mathbf{f})|_{(x,y) \text{Oberfläche}_j} \cdot \Omega_{p(x,y)}$$

Für eine Genauigkeitsbetrachtung sind in erster Näherung die absoluten Abweichungen der Meßdaten von Interesse.

Da sich die Ergebnisdaten (Lichtstärkeverteilungen, lokale Lichtstärkeverteilungen) aus der Summe vieler einzelner, gegebenenfalls gewichteter Leuchtdichten ergeben, sind z.B. sehr kleine Werte weniger interessant, wenn große Werte schon hohe absolute Fehleranteile erbringen, andererseits können kleine Werte mit auch kleinen Fehlern (z.B. dunkle Anteile in Leuchtdichtebildern) auf großen Flächenanteilen zu großen Fehlern für abgeleitete integrale Größen (z.B. Lichtstrom ϕ) führen. Weiterhin steckt in der Weiterverarbeitung der Leuchtdichtedaten vielfach selbst auch ein mittelender Prozeß, so daß die endgültige Genauigkeit auch durch diese Verrechnung erhöht wird.

6 ERREICHBARE AUFLÖSUNGEN UND GENAUIGKEITEN

Die Leuchtdichtemeßkamera LMK98 ist durch folgende Parameter bestimmt:

| | |
|-------------------|--|
| Auflösung | 1300 * 1000 Pixel |
| Grauwertauflösung | 10 bit |
| Rauschen | |
| Dunkelsignal | $\sigma = 0,6$ LSB |
| Hellsignal | $\sigma \approx 8$ LSB (Poissonrauschen) |

Die erreichbaren Genauigkeiten und Auflösungen ergeben sich damit etwa zu:

Einzelaufnahme (ohne Binning)

$$\text{für } L = L_{\max} \approx 1000 \quad \frac{\Delta L}{L_{\max}} = 0,008$$

$$\text{für } L = L_0 \text{ mit } L_0 = \frac{L_{\max}}{50} \approx 20 \quad \frac{\Delta L}{L_0} = 0,05$$

Mehrbildmessung (über n Bilder gemittelt)

$$\text{für } L = L_{\max} \quad \frac{\Delta L}{L_{\max}} = \frac{s_p}{L_{\max} \cdot \sqrt{n}} = 0,0025 \text{ bei } n = 10$$

$$\text{für } L = L_0 \text{ mit } L_0 = \frac{L_{\max}}{50} \quad \frac{\Delta L}{L_0} = 0,015$$

High-Dyn-Messung (Integrationszeiten 1:20)

$$\text{für } L = L_{\max} \quad \frac{\Delta L}{L_{\max}} = \frac{s_p}{L_{\max}} \approx 0,008$$

$$\text{für } L = L_0 \text{ mit } L_0 = \frac{L_{\max}}{50} \quad \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{s_{400}}{400} \approx 0,01 \quad (s_{400} \approx 4 \text{ LSB})$$

7 CCD-LEUCHTDICHTEMESSKAMERA LMK

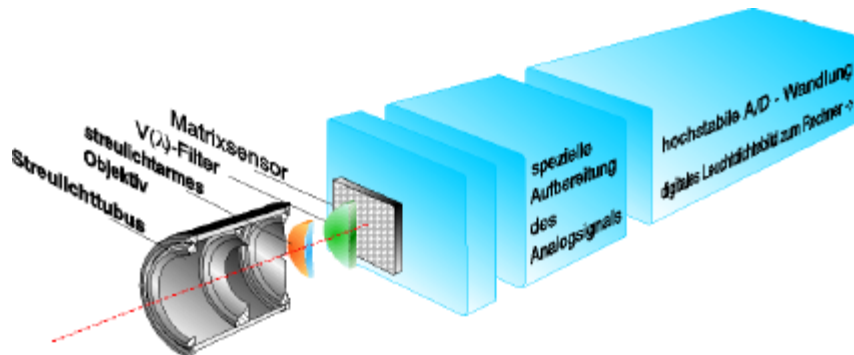


Bild 7: - Prinzipaufbau der Leuchtdichtemeßkamera LMK98

| | |
|--|--|
| Meßbereiche | abhängig vom Objektiv z.B. Innenraummessung: 3 .. 30 000 cd/m ² bis 300 und mehr Mcd/m ² über Graufilter Einstellung der Meßbereiche über Wahl der Integrationszeit |
| Auflösung Einzelpunkt (Dynamikumfang) | Einzelmessung 1:1000 HighDyn-Messung: bis 1:1 000 000 |
| V(l)-Anpassung | f1 < 3.5 % |
| räumliche Bewertung | f2(g) < 0,5 % |
| Einfluß der Umfeldleuchtdichte | f2(u) < 2 % |
| Linearitätsfehler | f3 < 0.2 % |
| Abgleichfehler | f11 < 0.5 % |
| Kalibrierunsicherheit | < 2 % |

Literatur, Quellen:

- Schmidt, F.: Einsatz moderner CCD-Kameras zur genauen Orts- und Leuchtdichtemessung, 40. Intern. Wiss. Kolloq. d. TU Ilmenau, 18.-21.9.95, Tgb. S. 551 - 556
- Riemann, M.; Poschmann, R.; Schmidt, F.: Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung mittels eines bildauflösenden Goniofotometers, Licht 7-8/93, S. 592 - 596
- Riemann, M.; Fischbach, I.; Schmidt, F.: Zur Leistungsfähigkeit der Messung von Lichtstärkeverteilungskurven mittels bildauflösender Fotometrie, Licht 7-8/95, S. 640 - 645
- Riemann, M.; Fischbach, I.; Schmidt, F.: Anwendungen angepaßter CCD-Sensortechnik in der ortsaufgelösten Lichtmeßtechnik, Licht 7-8/97, S. 582 - 587
- Schmidt, F.: Bilddatenauswertung zur Erfassung geometrischer und fotometrischer Relationen, Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 1997 (44. Jhrg.), Herausgeber: Prenzel, W.-D.; S. 82 - 116
- Krüger, U.; Schlichting, B.; Schmidt, F.; Weyh, St.: Digitale CCD-Kameras mit hoher Quantisierungsauflösung - Analyse und Design, Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 1998 (45. Jhrg.), Herausgeber: Prenzel, W.-D.;
- Gall, D.; Wolf, St.: Der "Leuchtdichteanalysator" als neue Qualität eines Meßgerätes für die Lichttechnik, Licht 98 Bregenz Tagungsband S. 146 - 152
- Fischbach, I.: Bewertung der Sichtverhältnisse im nächtlichen Straßenverkehr mit Leuchtdichteanalysatoren (bildauflösender Leuchtdichtemeßtechnik), Licht 98 Bregenz Tagungsband S. 232 - 241
- Nevoigt, J.: Der Einsatz des "Leuchtdichteanalysators" zur Blendungsbewertung bei Tageslicht, Licht 98 Bregenz Tagungsband S. 253 - 260

Autorenangaben:

Dipl.-Ing. Ingo Fischbach, PD Dr.-Ing. habil. Franz Schmidt
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH Ehrenbergstraße 11,
98693 Ilmenau

Tel.: 03677 / 668 480
Fax: 03677 / 668 472
e-mail: <http://www.technoteam.de>