

# Erfassung photometrisch richtiger Daten mit CCD-Kameras

## 1 Einleitung

Geräte mit lichttechnischen Baugruppen stellen im heutigen Informationszeitalter den Mittelpunkt der Schnittstellen multimedialer Kommunikationssysteme dar. Die Komplexität der Informationen, die vom Menschen erfaßt werden muß, steigt ständig an. Im gleichen Maße erhöht sich die Komplexität lichttechnischer Baugruppen und die Anforderung an deren Parameter. Ein Beispiel dafür sind Informationssysteme im Automobilbereich. Navigationssysteme und Kontrollsysteme für Fahrzeugfunktionen zählen dazu.

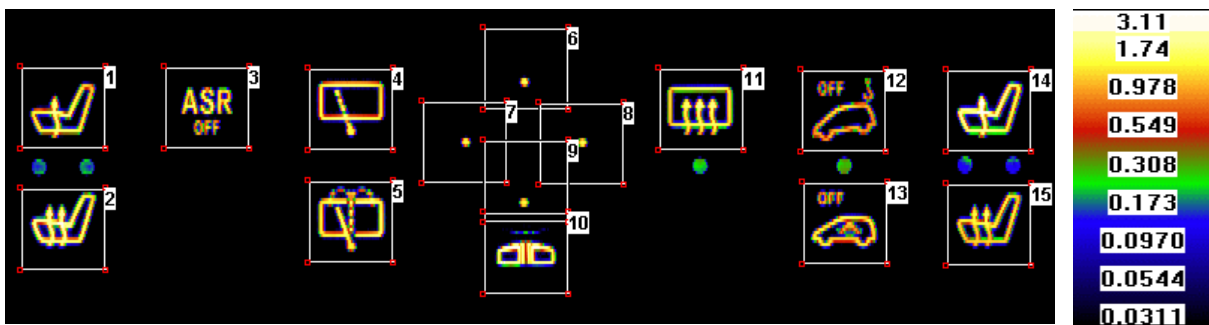


Abbildung 1 – Bewertung einer Leuchtdichteverteilung

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, nur in einem großen Raster oder gar nicht zu bewältigen. Durch die Entwicklung insbesondere von digitalen CCD-Matrixkameras in den letzten Jahren ist die Möglichkeit geschaffen worden, bildauflösende Meßsysteme zu schaffen, die solche komplexen Meßprobleme lösen. Dies erfordert jedoch die genaue Untersuchung der Parameter dieser Systeme und die Einordnung in Kategorien vorhandener Lichtmeßtechnik.

Die bildauflösende Leuchtdichtemeßtechnik vereinigt dabei die Erfassung photometrischer Größen mit den Algorithmen der Bildverarbeitung zur Gewinnung photogrammetrischer Daten. Sie realisiert eine neue Leuchtdichteanalytik, die die komplexe Erfassung und Bewertung z.B. von Leuchtdichteverteilungen an Displays in eleganter Weise lösen kann.

## 2 Erfassung der fotometrischen Größe Leuchtdichte

Bei der Erfassung fotometrischer Größen mittels CCD-Kameras wird entweder Licht selbststrahlender Quellen oder von Oberflächen reflektiertes Licht vermessen. Dieser Prozeß ist sowohl in zeitlicher als auch in örtlicher Hinsicht ein abtastender Prozeß. In beiden Fällen ist das Abtasttheorem einzuhalten.

Der zeitliche Verlauf des zu vermessenden Lichtes spielt in den praktischen Anwendungen der Lichttechnik eine immer größere Rolle. Einerseits werden Lampen oft mit Wechselspannung betrieben und andererseits setzen sich immer mehr gepulste Lichtquellen (z.B. mit EVG) durch. In solchen Fällen ist es unumgänglich, das zeitliche Verhalten der Lichteinwirkung zu kennen.

Damit können die auftretenden Fehler in der Messung abgeschätzt und in der Bewertung berücksichtigt werden.

Im Allgemeinen werden großflächige Objekte vermessen, so daß die einzelnen Sensorelemente der CCD-Matrix vollkommen mit Abbildung des Objektes ausgeleuchtet sind. Gleichung ( 1) beschreibt vereinfacht die lichttechnische Wirkung auf das Sensorelement. Der Signalwert ist dann proportional zur mittleren Leuchtdichte des Objektes in dem vom Sensorelement erfaßten Raumwinkel.

Aus

$$S(i, j) = k \cdot \frac{\Phi(i, j)}{A_p(i, j) \cdot \Omega(i, j)} \text{ folgt } S(i, j) \sim L(i, j) \quad (1)$$

Mit:

$S(i, j)$	Sensorsignal des Pixelortes (i, j)	$\Omega(i, j)$	Raumwinkel der vom Pixel (i, j) erfaßt wird
$\Phi(i, j)$	Lichtstrom der auf das Pixel (i, j) wirkt	$L(i, j)$	mittlere Leuchtdichte für den Pixelort (i, j)
$A_p(i, j)$	projektive Fläche des Pixels (i, j)	$k$	Proportionalitätsfaktor

In der Praxis weicht das Verhalten von CCD-Kameras von dem idealen Modell ab. Aus Gleichung ( 2) gehen die einzelnen Einflußgrößen zur Berechnung eines Leuchtdichtewertes aus dem Pixelgrauwert hervor.

$$L = [GW(i, j, t) - DS(t) - DS(i, j)] * LN(GW) * SH(i, j) \quad (2)$$

Mit:

$GW(i, j, t)$	Grauwert des Pixels am Ort (i,j) zum Zeitpunkt t
$DS(t)$	Zeitabhängiges Dunkelsignal (da sich die Temperatur mit der Zeit ändern kann)
$DS(i, j)$	Ortsabhängiges Dunkelsignal, Bestimmung in der Kalibrierphase
$LN(GW)$	Linearitätskorrektur, Bestimmung der Werte in der Kalibrierphase
$SH(i, j)$	Shadingkorrektur im weiteren Sinne, d.h. beinhaltet sowohl die Korrektur des eigentlichen Shadings als auch die Umrechnung in Leuchtdichten (Absolutwertkalibrierung)

### 3 Bewertung als Leuchtdichtemeßsystem

Die DIN 5032 Teil 6 definiert dafür die Begriffe, Eigenschaften und Kennzeichnungen von Fotometern. Hier sind neben den Definitionen der einzelnen Kenngrößen auch die Art und Weise der Bestimmung festgelegt. Viele Parameter können für die bildauflösende Leuchtdichtemeßtechnik in der gleichen Art und Weise wie bei Einzelsensoren bestimmt und bewertet werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über diese Parameter.

Tabelle 1 - Parameter zur Bewertung von Leuchtdichtemessern

Bezeichnung	Fehlertyp	Bezeichnung	Fehlertyp
$f_1$	V( $\lambda$ )-Anpassung	$f_8$	Polarisationsfehler
$f_{2(g)}$	räumliche Bewertung (Shading)	$f_{11}$	Abgleichfehler/ Kalibrierunsicherheit
$f_{2(u)}$	Einfluß der Umfeldleuchtdichte (Streulicht)	$f_{12}$	Dunkelstromdrift
$f_3$	Linearitätsfehler	$f_5$	Ermüdung
$f_7$	moduliertes Licht	$f_{ges}$	Gesamtfehler

Von besonderer Bedeutung für die bildauflösende Meßtechnik sind dabei die Parameter V(?) -Anpassung und das Dunkelsignalverhalten.

### 4 Meßtechnische Grundlagen

Sollen CCD-Kameras zur Erfassung photometrischer Daten eingesetzt werden, so sind sowohl an den CCD-Sensor selbst als auch an das gesamte Auswertesystem einige Anforderungen zu stellen, um normgerechte Messungen nach DIN5032 Teil 1-7 durchführen zu können.

## 4.1 Kameratechnik

Für die Erfassung der Daten werden digitale CCD-Kameras eingesetzt. Eine derartige Kamera besitzt eine serielle oder parallele digitale Daten- und Steuerschnittstelle mit deren Hilfe die Kamera an einen PC oder ein anderes Auswertesystem angeschlossen wird. Die Analog-Digital-Wandlung (AD-Wandlung) findet bereits in der Kamera mit sehr enger Anbindung an das Arbeitsregime des CCD-Sensors statt. Dies verringert die Störmöglichkeiten gegenüber der herkömmlichen analogen Videoübertragung, ermöglicht pixelsynchrone AD-Wandlung und die Verwendung nicht genormter Bildformate, um nur einige Vorteile zu nennen. Ein weiterer wesentlicher Grund für den Einsatz digitaler Kameras ist die gute Steuerbarkeit der elektrischen Kameraparameter (z.B. Verstärkung, Offset und Integrationszeit), so daß ohne Eingriffe in den optischen Kanal das Gesamtsystem sehr flexibel an veränderte Aufnahmebedingungen angepaßt werden kann.

Um die Bilddaten, d.h. die aus dem Sensorsignal ermittelten Grauwerte, in photometrische Daten umrechnen zu können müssen zahlreiche Effekte des CCD-Kamerasystems erfaßt und korrigiert werden, von denen hier einige nur kurz angerissen werden können.

### 1. Dunkelsignal

Nach der Erfassung eines Bildes muß das Signal vom erfaßten Bild abgezogen werden, das ohne Lichteinwirkung entstanden wäre. Hierbei werden verschiedene Einflüsse des Systems auf das Bildsignal eliminiert. Dazu zählen die Ungleichförmigkeit des Dunkelsignals im Bild (dark signal nonuniformity - DSNU), die Abhängigkeit des Dunkelsignals von der Integrationszeit und der Kamertemperatur (insbesondere bei Integrationszeiten größer als 1s und bei nicht gekühlten Kameras) und der Einfluß von Defektpixeln, d.h. Bildpunkten mit gegenüber ihrer Umgebung wesentlich anderen Eigenschaften.

### 2. Shadding

Mit der Shaddingkorrektur wird der Randabfall der verwendeten Optik und die Ungleichförmigkeit der Pixelempfindlichkeit (photo response nonuniformity - PRNU) ausgeglichen und gleichzeitig die Absolutwertanbindung vorgenommen. In der Praxis hat sich gezeigt, daß die Eigenschaften der optischen Systeme nur bei Objektiven mit fester Blenden-, Brennweiten- und Focuseinstellung mit ausreichender Genauigkeit bestimmt und ausgewertet werden können.

Da das Dunkelsignal sehr stark von der Temperatur abhängt (Verdopplung des Dunkelsignals alle  $5,6\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) wird in zahlreichen Applikationen (insbesondere in der Astronomie) die CCD-Matrix mit hohem technischen und finanziellen Aufwand gekühlt. Bei Temperaturen von  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  kann die Dunkelsignalgenerationsrate durch die Kühlung auch für Langzeitintegrationen von mehreren Minuten bis Stunden vernachlässigt werden. Für den Einsatz der Kamera LMK96 im Bereich der Leuchtdichtemeßtechnik sind jedoch maximal Integrationszeiten von 10 s vorgesehen. Bei dieser Integrationszeit erreicht man bei Vollaussteuerung der Matrix mit einem Standardobjektiv  $\text{XXXcd/m}^2$ . Dieser Wert ist für die meisten Applikationen als Endwert für den empfindlichsten Meßbereich ausreichend. Bei Integrationszeiten bis 10 s spielt die Dunkelsignalgenerationsrate allerdings noch keine Rolle. Der Fehler der im thermischen Gleichgewicht der Kamera (nach Korrektur des Dunkelsignals ohne Berücksichtigung der Temperatureinflüsse) auftreten kann liegt bei ca. 0,5 LSB (10Bit-Vollaussteuerung). In den neueren Versionen unserer Leuchtdichtemeßkamera LMK98 sind an verschiedenen Punkten in der Kamera Temperatursensoren angebracht, mit deren Hilfe es möglich sein wird, auch für Langzeitintegrationen im Minutenbereich eine genaue Korrektur des Dunkelsignals vorzunehmen. Eine zusätzliche Kühlung würde hier lediglich den Aussteuerbereich bei Langzeitintegration erhöhen, da Dunkelsignalelektronen, für die über den Photoelektrischen Effekt generierten Elektronen, zur Verfügung stehenden Platz begrenzen. Weiterhin wird durch die Kühlung das

Grundrauschniveau verringert. Bei modernen Kameras ist dieses Rauschniveau allerdings schon fast zu klein um die in 4.3 erläuterten Algorithmen voll ausnutzen zu können.

Die Kennwerte dieser und einiger weiterer Einflüsse sind für jedes System zu erfassen und mit geeigneten Algorithmen nach der Erfassung des Bildsignals zu korrigieren. Weitere Einzelheiten sind z.B. in /SCHM98/ veröffentlicht worden.

## 4.2 $V(\lambda)$ -Anpassung des Sensors

Eine wesentliche Voraussetzung für die gute Anpassung des Gesamtsystems an die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges (nach DIN 5031 Teil 3,  $V(\lambda)$ -Anpassung) ist die genaue Vermessung der relativen spektralen Empfindlichkeit des zu verwendenden CCD-Sensors. Die, der zu untersuchenden Matrix über einen Monochromator angebotenen, spektralen Strahldichten (5 nm Bandbreite) werden dazu mit Hilfe

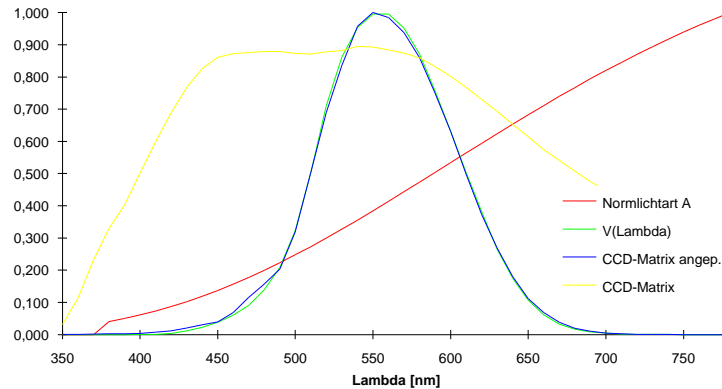


Abbildung 2: Relative spektrale Empfindlichkeit einer CCD-Matrix (incl. Objektiv) und Vergleich der durch Vollfilter angepaßten Matrix mit der  $V(\lambda)$ -Kurve

einer HighDyn-Messung für den Wellenlängenbereich 380 bis 780 nm in 10nm Schritten erfaßt und mit den Meßwerten einer Referenzdiode, deren relative spektrale Empfindlichkeit bekannt ist, verglichen bzw. bewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt und weichen etwas von den Werten aus den Sony-Datenblättern /SONY/ ab.

Nach der Berücksichtigung des eingesetzten Objektivtypes kann mit Hilfe der Überlegungen aus /STEV95/ ein Vollfilter berechnet und realisiert werden. Dazu werden bestimmte, ausgesuchte und genau vermessene Farbgläser verschiedener Dicke (ca. 30µm bis 1mm) zu einem Vollfilter verkittet. Die Güte dieser spektralen Sensoranpassung, die eines der entscheidenden Kriterien für die Klassifikation des Meßgerätes ist, wird über den f1-Fehler angegeben, der sich nach DIN 5032 Teil 6 berechnen läßt.

## 4.3 Aufnahmeverfahren und Auswertung der Daten

Die Datenauflösung und der erreichbare Dynamikumfang sind zwei wesentliche Kennwerte einer photometrischen Messung. Neben der Genauigkeit der Anpassungen aus den vorhergehenden Abschnitten hängen diese Kennwerte u.a. auch von der verwendeten Quantisierungsauflösung der Kamera, d.h. primär von der Datenbreite des verwendeten AD-Wandlers und von der Art und Weise der Bilderfassung und Auswertung ab.

Die Datenbreite des AD-Wandlers ist mit  $n_0 = 8$  bzw. 10 Bit für viele lichtechnische Anwendungen nicht ausreichend. Die Meßwertauflösung kann durch Mittelwertbildung über benachbarte Pixel (**Makropixel**) oder über mehrere nacheinander erfaßte Bilder (**Mehrfachmessung**) erhöht werden. Dabei kann die Meßwertauflösung  $n$  auf einen Wert von etwa

$$n = n_0 + \frac{\text{ld } N}{2} \quad (3)$$

gesteigert werden, wenn mit  $N$  die Anzahl der zur Mittelwertbildung verwendeten Pixel bzw. Bilder bezeichnet wird. Diese Erhöhung der Meßwertauflösung reduziert entweder die Anzahl der effektiv verfügbaren Meßpunkte oder erhöht die Erfassungszeit der Bilddaten. Der Erhöhung

der Auflösung werden durch die Verteilung des Quantisierungsrauschens und durch korrelierte Rauschteile Grenzen gesetzt, so daß in der Praxis nur eine Erhöhung der Meßwertauflösung um maximal 4 Bit realistisch erscheint.

Der erfaßbare Dynamikumfang im Bild einer zu analysierenden Szene kann durch eine **High-Dyn-Messung**, bei der die Szene mehrfach und mit verschiedenen Integrationszeiten aufgenommen wird, erhöht werden. Die Analyse der so erfaßten Bilder gestattet in Verbindung mit einer aufwendigen DSNU- und PRNU-Korrektur die Angabe der Meßwerte mit hoher Auflösung und mit einem sehr hohem Dynamikumfang.

Natürlich ist auch eine Kombination der vorgestellten Auswerte- und Erfassungsmethoden denkbar.

## **5 Anwendungen mit der bildauflösenden Meßkamera LMK96**

Mit der bildauflösenden Meßkamera LMK96 von der Firma TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH Ilmenau wurden sowohl an universitären Einrichtungen als auch in der Industrie Anwendungen realisiert, die den Vorteil des Einsatzes bildauflösender Meßtechnik gegenüber punktförmig messender Systeme demonstrieren.

### **5.1 Vermessung von Displays**

Die Bewertung von Displays im KFZ-Bereich stellt immer höhere Anforderungen an die Gleichförmigkeit der Leuchtdichteverteilung und die Einhaltung zulässiger Leuchtdichtetoleranzen. Vorteile bestehen hier vor allem in der Meßzeit. Die Konstanz der lichttechnischen Parameter während der Messung muß nur für einige Sekunden gewährleistet werden. Punktförmig messende Systeme können hier nur scannend eingesetzt werden. Solche Messungen dauern in der Regel mehrere Stunden. Die rechentechnische Anbindung erlaubt eine komplexe Analyse der Szene mittels verschiedener Werkzeuge.

Tabelle 2 - Darstellungsformen

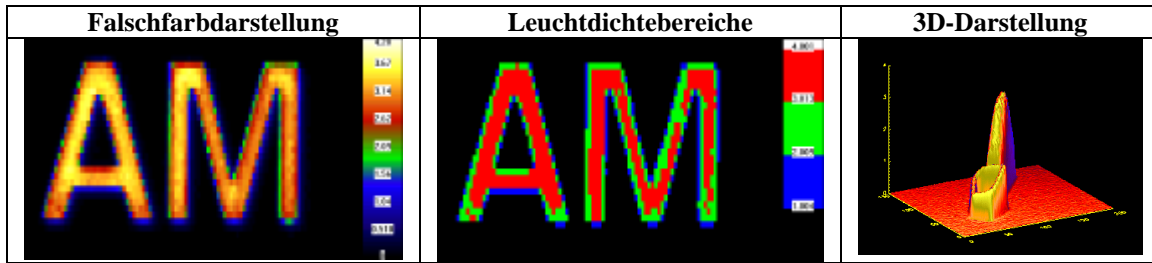


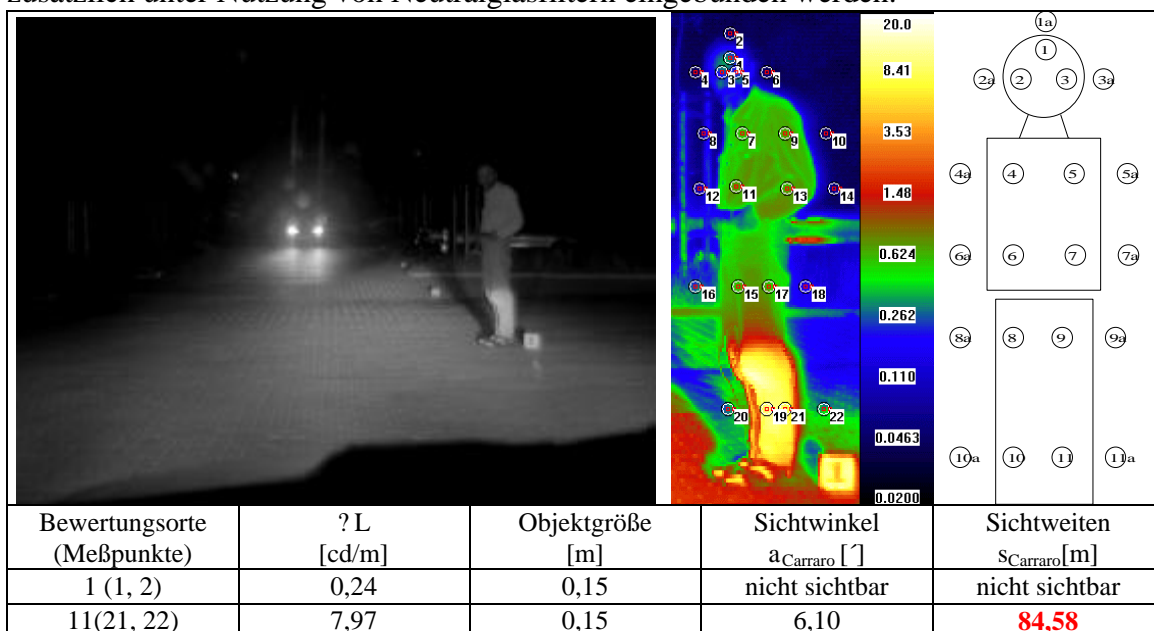
Tabelle 3 - lichttechnische Bewertung

Einzelner Symbole	Korrespondierende Meßregionen	Leuchtdichteschnitte	Parameter
			<ul style="list-style-type: none"> <li>- statistische Parameter</li> <li>- Kontraste</li> <li>- Ungleichförmigkeiten</li> <li>- Güteklassen</li> <li>- Ausdehnungen</li> </ul>

### 5.2 Sichtweitenberechnung im nächtlichen Straßenverkehr

Die Berechnung von Sichtweiten im Straßenverkehr aus Leuchtdichteverteilungen bei Dämmerung und Dunkelheit stellt zum Teil hohe Anforderungen an die Leuchtdichtemeßtechnik. Gegenüber der punktförmigen und fotografischen Messung /ECK93/ bietet die bildauflösende Meßtechnik hier vor allem die Vorteile der höheren Zuverlässigkeit und wesentlich kürzeren Zeit zur Aufnahme und Verrechnung der Meßergebnisse. So ist die in der Berechnung notwendige mittlere Leuchtdichte über einen Beobachtungswinkel von  $\alpha = 20^\circ$  punktförmig nur sehr ungenau zu bestimmen. Weitere Parameter, die sich aus den Leuchtdichteverteilungen berechnen lassen sind die Leuchtdichteunterschiede einer zu erkennenden Person und die Schleierleuchtdichte, die sich aus den Blendleuchtdichten entgegenkommender Fahrzeug berechnen läßt.

In den Dunkelstunden sind vor allem niedrige Leuchtdichten ( $0,01 \text{ cd/m}^2$ ) enthalten. Neben den geringen Leuchtdichten treten oft auch extrem hohe Leuchtdichten ( $> 10 \text{ Mcd/m}^2$ ) von entgegenkommenden Kraftfahrzeugen auf. Damit ergeben sich besondere Anforderungen an die Meßdynamik bildauflösender Leuchtdichtemeßtechnik. Durch den Einsatz der HighDyn-Messung der LMK96 kann dieser Dynamikumfang realisiert werden. Extrem hohe Leuchtdichten können zusätzlich unter Nutzung von Neutralglasfiltern eingebunden werden.



### 5.3 Vermessung von Lampen

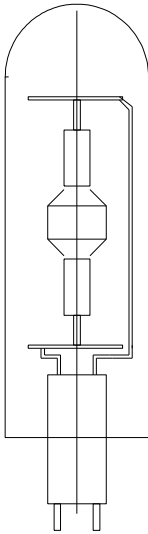


Abbildung 3 - Beispiel einer zu vermessenden Lampe

Die Vermessung von Lampen kann Daten für die Berechnung von Leuchten, speziell für die Simulation von reflektierenden Flächen liefern. Dazu sind neben den integralen Parametern Lichtstrom und Lichtstärkeverteilungskörper, die von einer idealen Punktquelle ausgehen, weitere Parameter notwendig. Insbesondere die geometrische Verteilung der Lichtausstrahlung ist interessant. Diese Informationen sind in Leuchtdichteverteilungen  $L(\mathbf{q}, \mathbf{f}, x, y, z)$  enthalten.

In Simulationsprogrammen (z.B. zum Raytracing an reflektierenden Flächen) wird vielfach ein Strahlenmodell in Verbindung mit einem statistischen Rechenansatz (Monte-Carlo-Methode) verwendet. Der Zusammenhang zwischen Leuchtdichtebildern und solchen Einheitsstrahlen ergibt sich über die Raumwinkel und ist einfach herzustellen. D.h. auch solche Daten über Einheitsstrahlen sind aus den Leuchtdichtebildern direkt zu gewinnen.

Ziel ist die Erfassung der Ausstrahlcharakteristik von Lampen mit bildauflösender Leuchtdichtemeßtechnik und Übergabe der Meßergebnisse in einer geeigneten, die wichtigen Informationen enthaltenden Datenstruktur. Für die Erfassung der Leuchtdichteverhältnisse auf der Lampenoberfläche ist der Einsatz von integral messenden Einzelsensoren nicht möglich. Die Lichtstärkeverteilung der gesamten Lampe als Punktquelle erlaubt keinen Bezug zu den Leuchtdichteverhältnissen auf der Oberfläche der Lampen.

Die Vermessung von Lampen stellt hohe Anforderungen an die geometrische Auflösung des Meßobjektes und den hohen Dynamikumfang. Der Einsatz von CCD-Kameras mit entsprechender Pixelauflösung und entsprechender abbildender Optik ermöglicht die Lösung solcher Meßprobleme. Beispielhaft sind die Meßdaten einer Glühlampe mit variable Darstellungsformen (linear, logarithmisch, auf Leuchtdichtebereiche begrenzt, ...) gezeigt.

lineare Darstellung	logarithmisch mit 2 Dekaden	logarithmisch mit 3 Dekaden	logarithmisch mit 4 Dekaden	logarithmisch mit 5 Dekaden

## 6 Zusammenfassung

### Literaturquellen:

- /ECK93/ Eckert, Martin: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr, 1. Aufl. –Berlin; München; Verlag Technik GmbH 1993
- /SCHM98/ Schmidt, F.; Weyh, S.; Schlichting, B.; Krüger, U.: Digitale CCD-Kameras mit hoher Quantisierungsauflösung – Analyse&Design, 45. Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 1998, S.139-166, 1998
- /SONY/ Sony: Datenblätter CCD-Komponenten. ICX039DLA; über [www.sony.com](http://www.sony.com)
- /STEV95/ Stefanow, E:  $V(\lambda)$ -Anpassung eines bildauflösenden Lichtempfängers, Dissertation TU Ilmenau 1995

### Autoren:

Fischbach, Ingo, Dipl.-Ing.  
email: [ingo.fischbach@technoteam.de](mailto:ingo.fischbach@technoteam.de)

Krüger, Udo, Dipl.-Ing.  
email: [udo.krueger@technoteam.de](mailto:udo.krueger@technoteam.de)

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH  
Ehrenbergstraße 11  
98693 Ilmenau  
Tel.: 03677/ 668480  
Fax.: 03677/ 668472

