

# **Anwendungen angepaßter CCD-Sensortechnik in der fotometrischen Lichtmeßtechnik**

## **1 Einleitung**

Die traditionelle Lichtmeßtechnik hat heute einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Neben den dort meist eingesetzten Einzelsensoren können CCD-Matrixkameras als abbildende Systeme so modifiziert werden, daß sie die geforderten Parameter für fotometrische Messungen erfüllen. Der Einsatz solcher bildauflösenden Meßapparaturen bringt einige nicht zu unterschätzende Vorteile:

1. Der zeitliche Aufwand zur Bewertung von Lichtquellen und Beleuchtungssituationen als Funktion des Ortes  $f(x, y)$  ist mit Einzelsensoren oft nicht vertretbar. Messungen z.B. an Arbeitsplätzen, Stadien, Flughäfen und Straßen können mit solchen CCD-Meßsystemen in akzeptablen Rahmen gestaltet werden.
2. In einem Meßbild sind die Informationen über den geometrischen Zusammenhang der einzelnen zu vermessenden Punkte bereits enthalten.
3. Die Speicherung von Aufnahmeszenen erlaubt das Reproduzieren der Messung.
4. Die rechtechnische Anbindung der CCD-Kamera gestattet eine einfache Handhabung und Protokollierung.

Für abbildende CCD-Meßsysteme ist die Leuchtdichte in  $\text{cd/m}^2$  die lichttechnische Größe, die dem Meßsignal direkt proportional ist. Auch in konventionellen Leuchtdichtemeßgeräten z.B. von der Firma LMT Berlin werden abbildende Systeme genutzt.

Im folgenden Abschnitt werden einige Anforderungen an leuchtdichtemessende Systeme aufgeführt und realisierte CCD-Meßkameras eingeordnet. Der 3. Abschnitt behandelt die notwendigen Probleme zur hardwareseitigen Qualifizierung einer CCD-Kamera für die Leuchtdichtemessung. Im darauffolgenden Abschnitt werden die notwendigen softwaretechnischen Verfahren und Korrekturen beschrieben, die für das Bildsignal der Kamera die Berechnung von Leuchtdichtewerte ermöglichen. In einem abschließenden Abschnitt werden zwei von der Firma TechnoTeam entwickelte und realisierte Meßsysteme vorgestellt.

## **2 Anforderungen an Leuchtdichtemeßgeräte**

Der Normenausschuß Lichttechnik hat für Leuchtdichtemeßgeräte die wesentlichen Parameter zur Klassifizierung festgelegt /DIN85/. Dabei sind die folgenden Punkte wesentlich, wenn man ein CCD-Kamerasystem zur Messung von Leuchtdichten klassifizieren will:

1.  $V(\lambda)$ -Anpassung an die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges
2. Cosinus-getreue Bewertung der Leuchtdichte
3. Linearitätsfehler
4. Temperaturkoeffizient
5. Fehler durch moduliertes Licht
6. Gesamtfehler

In der Unterteilung der Klassen ordnen sich realisierte CCD-Meßsysteme in den Genauigkeitsklassen A und B ein, wobei gilt:

- |   |                        |
|---|------------------------|
| L | höchste Genauigkeiten  |
| A | hohe Genauigkeiten     |
| B | mittlere Genauigkeiten |
| C | geringe Genauigkeiten  |

Merkmal	Klasse L	Klasse A	Klasse B	Klasse C
V( $\lambda$ )-Anpassung	1.5 %	<b>3 %</b>	<b>6 %</b>	9 %
Cosinus-Treue	1.5 %	<b>1.5 %</b>	<b>3 %</b>	6 %
Linearitätsfehler	0.2 %	<b>1 %</b>	<b>2 %</b>	5 %
Temp.Koeffizient	0.1 %/K	<b>0.2 %/K</b>	<b>1 %/K</b>	2 %/K
moduliertes Licht	0.1 %	<b>0.2 %</b>	<b>0.5 %</b>	1 %
Gesamtfehler	3 %	<b>5 %</b>	<b>10 %</b>	20 %

Weitere Anforderungen /DIN90/ stellen folgende Parameter dar, die nicht in die Klassifizierung von Leuchtdichtemeßgeräten eingehen.

1. 10 cd/m<sup>2</sup> kleinster Meßbereich mit einer Auflösung von 100 Digit
2. Meßfeldgröße kleiner als 1°
3. minimaler Meßabstand kleiner als 1m

Diese Forderungen sind sinnvoll, wenn man die real auftretenden Leuchtdichten betrachtet. Sie bewegen sich von ca. 0,7 cd/m<sup>2</sup> für die mittlere Leuchtdichte bei Straßenbeleuchtungen bis ca. 100 000 cd/m<sup>2</sup> 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.

### 3 Technische Anforderungen und Umsetzung

Um die geforderten Kriterien an ein Leuchtdichtemeßgerät zu erfüllen, sind einige technische Veränderungen der derzeit verfügbaren CCD-Standardtechnik vorzunehmen. Die zu verwendenden Module sind dabei sorgfältig auszuwählen. Wesentliche Aufgaben sind:

1. die korrigierbare systematische Fehler zu stabilisieren und
2. nichtkorrigierbare stochastische und nichtkorrigierbare systematische Fehler zu minimieren.

#### 3.1 Objektiv

Standardobjektive sind im allgemeinen nicht für lichttechnische Meßaufgaben geeignet. Die verwendeten Irisblenden gewährleisten keine ausreichende Reproduzierbarkeit der Blendenstufen. Zudem verursacht das notwendige Spiel der einzelnen Lamellen bei Erschütterungen Abweichungen der Blendenöffnung bis zu 20 %. Zur Lösung dieses Problems kann nur eine Festblende zum Einsatz kommen. Die Anpassung an die unterschiedlichen absoluten Leuchtdichten muß dann über Neutralglasfilter oder über die Variation der Integrationszeit realisiert werden.

Als zweite Fehlerquelle im Objektiv ist das Streulicht zu betrachten, das durch die hohe Anzahl von Glas-Luft-Schichten der Objektiv verursacht wird. Den Streulichtanteil kann man nur durch konsequente Verringerung der Anzahl der Linsen und deren Vergütung erreichen. In vielen Fällen ist der Einsatz eines Achromaten ausreichend, da für lichttechnische Zwecke hohe Schärfe und geringe Verzeichnung meist nicht erforderlich sind. Als eine weitere Fehlerquelle stellen sich lose Linsen in Objektiven heraus. Die Veränderung der Position der Linsen im Objektiv hat unmittelbar die Veränderung der optischen Abbildungsverhältnisse, insbesondere des Ortes der optischen Achse und der Randabschattung der Optik zur Folge.

### **3.2 Analogelektronik**

Die größten Instabilitäten verursacht die Analogelektronik /VIS94/.

Ein wesentliches Problem ist dabei die Konstanz des Dunkelsignaloffsets. Einfluß hierauf haben:

1. die Matrix als Ort der Entstehung von Ladungen durch die Temperatur mit Onchip-Verstärker
2. die Wandlung in ein Videosignal und dessen Übertragung bei Analogkameras
3. die Analog-Digital-Wandlung des Videosignal und hier besonders die Konstanz der Referenzspannungen zur A/D-Wandlung

Eine Möglichkeit der Stabilisierung ist die Thermostatisierung der einzelnen Komponenten. Dabei hat sich eine Erhöhung der Temperatur durch Heizung als einfachste Variante herausgestellt. Das Hauptproblem der Kühlung, die Entstehung von Kondensationswasser, wird damit verhindert.

Neben der thermischen Stabilität ist der sorgsame Aufbau der Kameraelektronik ein weiterer Faktor zur Stabilisierung des Gesamtsystems. Besonders Masseschleifen führen zu unkontrolliertem Verhalten.

Um den Einfluß auf die Analogelektronik zu minimieren, bietet sich die Verwendung einer Digitalkamera an. Erstens ist dann der Ort der Einflußmöglichkeiten beschränkt und zweitens entfällt die Umwandlung in ein BAS-Videosignal.

### **3.3 $V(l)$ -Anpassung**

Zur Anpassung an die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges muß die CCD-Kamera spektral vermessen und mittels Vollfilterung angepaßt werden. Die Vermessung der Kamera erfolgt mittels Monochromator und Vergleichsempfänger. Die Matrix der Kamera wird dabei an unterschiedlichen Positionen vermessen und eine gemittelte Kurve zur Filterberechnung genutzt. Für besondere Anwendungen kann auf eine kostenintensive Vollfilterung der Kamera verzichtet werden. Das ist der Fall, wenn sich die spektrale Verteilung des zu vermessenden Objektes sowohl örtlich als auch zeitlich nicht ändert. Dann kann über ein  $V(\lambda)$ -angepaßtes Fotoelement die Anbindung der relativen Kameradaten über die Lichtenergie(Lichtstrom) erfolgen.

## **4 Softwarekorrekturen - Mittel und Methoden**

Ist die Stabilität der systematischen Fehler gewährleistet, können diese softwaretechnisch korrigiert werden. Zu korrigieren sind:

1. Dunkelsignal-Offset
2. Nichtlinearitäten zwischen der Leuchtdichte und dem Kamerasignal
3. Randabfall der Optik und die Ungleichförmigkeit der Pixelempfindlichkeiten
4. Verzeichnung der Optik
5. Absolutwertanbindung an die lichttechnische Größe Leuchtdichte

### **4.1 Linearitätsmessung**

Zur Messung der Linearität ist ein optischer Aufbau mit regelbarem Lichtniveau notwendig. Dabei muß gewährleistet sein, daß sich die Lichttemperatur während der Messung nicht verändert, was durch eine Blende realisiert werden kann. Parallel zur Kameramessung wird das Licht über einen linearen Fotosensor bestimmt. Wird eine Kamera mit veränderlicher Integrationszeit eingesetzt, kann die Linearität sehr einfach durch Bezug zur eingestellten Integrationszeit überprüft werden.

## **4.2 Shading**

Der Einfluß des Randabfalls der Optik kann in Abhängigkeit vom verwendeten Objektiv bis zu 60 % betragen und ist damit wesentlich größer als die Ungleichförmigkeit der Pixelempfindlichkeiten. Beide Faktoren können gemeinsam als Shading bezeichnet werden. Die Bestimmung des Shadings kann über zwei verschiedene Wege erfolgen:

1. Abbildung eines konstant leuchtenden Fleckes auf unterschiedliche Matrixorte
2. Abbildung einer Fläche mit konstanter Leuchtdichtevertelung

Der Kalibrieraufwand mit einer gleichmäßig leuchtenden Fläche ist gegenüber dem 1. Verfahren weniger aufwendig, wenn man erst einmal eine solche Fläche als Kalibriernormal besitzt. In der Firma TechnoTeam wurde mit einer 4-Lampenanordnung eine Fläche von 60cm x 60cm realisiert, die eine Konstanz der Leuchtdichte von 1..2 % aufweist. Mittels Mehrfachmessungen an unterschiedlichen Positionen und mit unterschiedlichen Winkeln können damit Meßkameras mit einer Abweichung unter 1 % kalibriert werden.

## **4.3 Verzeichnung**

Für bestimmte Meßaufgaben ist eine relative oder absolute Zuordnung zu dem Ort oder Blickwinkel im Objektkoordinatensystem notwendig. Die Verwendung von streulichtarmen Objektiven bewirken jedoch relativ starke Verzeichnungen, so daß ohne Korrektur eine Zuordnung nicht erfolgen kann. Die Kalibrierung zur Bestimmung von Ortskoordinaten erfolgt üblicherweise mit Rastervorlagen, deren Parameter hochgenau bekannt sind. In der Lichtmeßtechnik beziehen sich die Ergebnisdaten oft auf Winkel. Für solche Meßaufgaben wurde ein Verfahren entwickelt, das die Verzeichnung mittels Verdrehung der Kamera ermitteln kann.

## **4.4 Absolutwertanbindung**

Die mit einer fotometrischen Kamera erhaltenen lichttechnischen Daten sind nach allen vorangegangenen Korrekturen relative Daten. Der Bezug auf absolute Leuchtdichten erfolgt über

1. eine Fläche mit bekannter Leuchtdichte oder
2. über die Referenzmessung einer leuchtenden Fläche mit einem zertifiziertem Leuchtdichtemeßgerät.

## **4.5 Erhöhung der Dynamik**

Einen wesentlichen Gesichtspunkt für CCD-Systeme stellt die Erhöhung der Auflösung dar /VIS94/. Die im allgemeinen von einer CCD-Kamera zur Verfügung stehenden 7 bit Auflösung erlauben keine genaue Messung. Die Vielzahl der vorhandenen Bildpunkte (CCIR 768\*576) wird jedoch meistens zur Lösung von lichttechnischen Aufgaben nicht benötigt. So kann das Zusammenfassen mehrerer Pixel zu Makropixeln die Grauwertauflösung sofort drastisch erhöhen. Werden z.B. Makropixel der Größe 16\*16 genutzt, steht eine Auflösung von ca. 11 bit zur Verfügung. Eine weitere Erhöhung kann man mit der Mittelung über mehrere Bilder erreichen.

## **5 Realisierungen von bildauflösenden Leuchtdichtemeßsystemen**

Unter Berücksichtigung der oben genannten Probleme hat die Firma TechnoTeam zwei Systeme entwickelt, die die Messung lichttechnischer Größen erlauben. Das sind ein Leuchtdichtemeßgerät zur Bewertung von Straßenbeleuchtungen und eine Meßanlage zur Bestimmung von Lichtstärkeverteilungen von Leuchten und Lampen.

## 5.1 Leuchtdichtemeßgerät für Straßenbeleuchtungen

Das realisierte Leuchtdichtemeßgerät wird zur Vermessung von unterschiedlichen Szenen der Straßenbeleuchtungen eingesetzt. Auf Grund des flachen Beobachtungswinkels im Bezug auf die Straße ist eine Winkelauflösung von weniger als 2 Winkelminuten notwendig. Die zu bewertenden Leuchtdichten liegen in einem Bereich von ca.  $0.1 \text{ cd/m}^2$  bis  $4 \text{ cd/m}^2$  und bewegen sich damit im unteren Leuchtdichtebereich von lichttechnischen Meßaufgaben. Zu berechnende Parameter sind:

1. Mittlere Leuchtdichte über eine Meßlinie und über die gesamte Straßenfläche
2. Ungleichförmigkeit der Leuchtdichteverteilung über diese Meßlinie bzw. Straßenfläche

In dem realisierten System kommt eine modifizierte digitale Slow-Scan-Kamera zum Einsatz. Eine getrennte Thermostatisierung von Matrix und Analogelektronik gewährleistet die geforderte thermische Stabilität des Systems. Die Empfindlichkeit der Kamera wird dabei über unterschiedliche Integrationszeiten bis zu 10 s angepaßt. Sie ist damit zwischen  $2 \text{ cd/m}^2$  und  $2000 \text{ cd/m}^2$  einstellbar.

## 5.2 Bildauflösende Messung von Lichtstärkeverteilungen

Im Rahmen der Modernisierung von Lichtlabors wurden in der Firma RZB Leuchten Bamberg und im Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau Meßanlagen zur Bestimmung von Lichtstärkeverteilungen installiert.

### 5.2.1 Einordnung

Zur Berechnung von Beleuchtungsstärken bei der Beleuchtungsplanung geht man von der Lichtstärkeverteilung der Leuchten aus, wobei man das fotometrische Entfernungsgesetz zugrunde legt. Gleichfalls hat man dieses Gesetz bei der Messung der Lichtstärkeverteilung zu beachten. Die Lichtstärke als Größe ist jeweils in einer Richtung definiert und müßte deshalb im parallelen Licht, d.h. in unendlicher Entfernung gemessen werden. Derzeitige Meßeinrichtungen (Drehspiegelgoniometer) berücksichtigen dies näherungsweise, indem sie die Meßsensoren in Abständen von der Leuchte anordnen, die etwa dem 30fachen der Leuchtenabmessungen entsprechen. Zur Vermessung großer Leuchten sind zum einen große mechanische System zur Spiegel- und Leuchtenbewegung notwendig, und zum anderen ist ein großes „schwarzes“ Labor erforderlich.

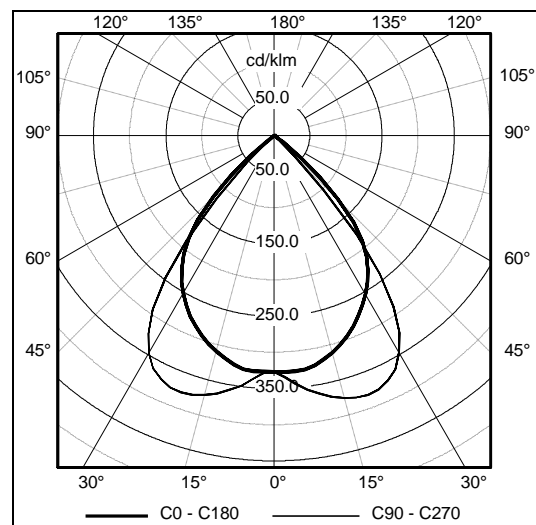


Abbildung 2

Auf der Basis einer Idee von Prof. Riemann /LIC93/ an der TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, wurde in der Firma TechnoTeam ein Meßplatz 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.

## 5.2.2 Aufbau und Verfahren

Die Kamera wird an diesem Meßplatz mit einer kardanischen Aufhängung auf einer gedachten Kugeloberfläche um die Leuchte herumgeführt. In äquidistanten Winkelschritten werden mit der Kamera Leuchtdichtebilder aufgenommen und die Lichtstärkeanteile verschiedener Richtungen durch Abbilden eines Kugelkoordinatensystem in dem Bild bestimmt. Die Algorithmen des Meßverfahrens erfordern eine Umsetzung, die die mathematischen Zusammenhänge auf Rechenanlagen in endlicher Zeit berechnen lassen. Neben der Rechenzeit stellt auch die Bewegung des Goniometers eine begrenzende Größe dar. Daraus ergeben sich untere Grenzen für die Größe der einzelnen Leuchtenelemente und damit für die Winkelauflösung der Lichtstärkeverteilung. Für Leuchten und Lampen sind Auflösungen innerhalb einer C-Ebene(Theta) und der Winkelabstand der C-Ebenen selbst(Phi) mit jeweils  $2.5^\circ$  ausreichend. Die Aufteilung der Leuchte in Elemente in jedem aufgenommenen Bild und die spätere Zusammensetzung der Meßwerte zu Lichtstärken erfolgt örtlich(Theta,Phi) diskret mit der gleichen Auflösung von jeweils  $2.5^\circ$  Winkel des Kugelkoordinatensystems (projiziert auf die Bildebene) und korrespondiert damit mit dem Abtasttheorem von Shannon und Kotelnikow. Dies bedeutet für die bildauflösende Lichtmeßtechnik generell, daß bei ungünstiger Wahl der Meßorte Meßfehler auftreten können. Weitere Abtastprobleme treten durch die Zuordnung quadratischer Berechnungsfelder zu den Meßpunkten des projizierten Kugelkoordinatensystems in Polnähe auf. Dort kommt es zu Überschneidungen der einzelnen Berechnungsfelder.

Zur Bestimmung der Leuchtdichtebilder der Leuchte bzw. Lampe sind CCD-Matrixkameras XC 75 CE von Sony mit CCIR Videonorm zum Einsatz gekommen. Die Kameras sind auf ca.  $38^\circ\text{C}$  thermostatisiert. Die PC-Schnittstelle wird durch einen 8 bit Framegrabber BFP von Leutron Vision realisiert. Die  $V(\lambda)$ -Anpassung erfolgt über den Lichtstrom, der von einem parallel mitgeführten Fotoelement gemessen wird.

Die realisierten Meßanlagen zeigten bei Vergleichsmessungen Ergebnisse mit 2 % bis 5 % Abweichungen. Dabei wurden Vergleichsmessungen an einem Drehspiegelgoniometer, an einem Goniofotometer mit einem bewegten Empfänger an einem langen Ausleger sowie an Leuchtenwendern durchgeführt/LIC95/.

### 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 Grenzfremdung mittels eines bildauflösenden Goniofotometers; S. 592-597
- /LIC95/ M. Riemann, F. Schmidt, I. Fischbach: LICHT 7-8 / 1995; Zur Bestimmung der Lichtstärkeverteilungen von Leuchten aus bildauflösenden Messungen in ihrem Nahfeld
- /VIS94/ F. Schmidt: Vision Jahrbuch 1994, Photometrische bildauflösende Meßtechnik; S. 46-48

### Autoren:

Dipl.-Ing. Fischbach, Ingo  
Dr. Ing. habil. Schmidt, Franz  
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH  
Langewiesener Str. 16  
98693 Ilmenau  
Tel. 03677 / 663286  
Fax 03677 / 663285