

# Einsatz genauer CCD-Kameras für die Erfassung von Ausstrahlcharakteristiken und Farbabweichungen an Scheinwerfersystemen

F. Schmidt, U. Krüger

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ehrenbergstraße 11, D-98693 Ilmenau  
Email: [franz.schmidt@technoteam.de](mailto:franz.schmidt@technoteam.de), [udo.krueger@technoteam.de](mailto:udo.krueger@technoteam.de)

## Abstrakt:

Es wird ein Messsystem vorgestellt, mit dessen Hilfe die Ausstrahlcharakteristik von Scheinwerfern mit einer orts aufgelösten Leuchtdichte- und einer Mehrkanalspektralmessung bestimmt werden kann. Ausgehend von diesem Messsystem werden die Möglichkeiten der Erfassung von Farbabweichungen und anderen charakteristischen Merkmalen von Scheinwerfersystemen dargestellt. Im Besonderen wird dabei auf die Erfassung und Auswertung der Daten eingegangen.

## 1 Einleitung

Die Größe der Farbabweichungen von einem definierten Weißpunkt über die ausgeleuchtete Fläche ist bei der Herstellung, Endkontrolle und Anwendung von Scheinwerfersystemen u.a. für die Bühnen- und Studiobeleuchtung, aber auch für Fahrzeugscheinwerfer insbesondere mit abbildenden Systemen ein wesentliches Qualitätskriterium. In diesem Beitrag werden Messverfahren vorgestellt, mit denen es möglich ist, mit Hilfe der orts aufgelösten Leuchtdichtemesstechnik, verschiedene Ausstrahlcharakteristiken von Scheinwerfern relativ schnell zu erfassen und zu bewerten.

## 2 Vermessung der Ausstrahlcharakteristiken von Scheinwerfern

### 2.1 Zielstellung

Mit dem vorgestellten Messsystem soll es ohne großen Aufwand möglich sein, lichttechnische Basiskenngrößen von Scheinwerfern schnell zu vermessen und zu bewerten. Dabei kommt es nicht in jedem Fall darauf an, die Daten vollständig zu erfassen, sondern es sollte auch möglich sein, einen schnellen Überblick über die Daten erhalten zu können.

Die Vermessung von Scheinwerfern in Nahfeldgoniometern [4] bzw. in Strahlengoniometern [5] erfordert teilweise einen hohen apparativen und zeitlichen Aufwand und ist bei Scheinwerfern sehr hoher Leistung mit thermischen Problemen für die Kamera verbunden. Die Ausstrahlcharakteristiken der Scheinwerfer sind von Typ zu Typ bzw. von Einsatzfall zu Einsatzfall<sup>1</sup> sehr unterschiedlich und variieren von sehr eng strahlenden Typen, die bei der Erfassung eine sehr hohe Winkelauflösung erfordern, bis hin zu sehr breit strahlenden Scheinwerfern mit einem sehr großen Erfassungsbereich für die Messwerte, was z.B. bei der Bestimmung von Lichtstärkeverteilungskörpern (LVK) entsprechend aufwendige und angepasste Verfahrenregimes zur Folge hat, die mit großen Messzeiten verbunden sind.

Die Anwendung einer LVK kann ohne große Fehler nur außerhalb der fotometrischen Grenzentfernung erfolgen. Scheinwerfer haben aber eine sehr große fotometrische Grenzentfernung, die in den meisten Anwendungsfällen unterschritten wird. Die vorgestellten Verfahren arbeiten auf der Basis des quadratischen Entfernungsgesetzes und bewerten die Beleuchtungsstärkeverteilung auf einer Wand, die meist wie auch die Anwendung des Scheinwerfers innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung liegt. Bei der Anwendung dieser Daten in anderen Wandabständen als dem Messabstand kann es zu

---

<sup>1</sup> Z.B. Unterscheidung der Ausstrahlcharakteristik bei KfZ-Scheinwerfern für die Betriebsfälle Fernlicht und Abblendlicht

Fehlern kommen. Diese Fehler sind um so größer je weiter die Wandabstände auseinanderliegen und je weiter unterhalb der fotometrischen Grenzentfernung gemessen wird. Abschätzungen zu entsprechenden Entfernungen sind in [7] zu finden. Das vorgestellte Verfahren unterliegt diesen Restriktionen, liefert aber Informationen, die für eine Bewertung von Scheinwerfern ausreichend sind.

## 2.2 Messaufbau mit Bewegungseinheit

Auf der Basis dieser Überlegungen wurde der in Bild 1 dargestellte Messaufbau entwickelt. Der Scheinwerfer wird auf einer Bewegungseinheit montiert<sup>2</sup> und die Kamera wird in einer zur Projektionswand festen Position angebracht. Mit der Bewegungseinheit kann der Scheinwerfer in der Höhe ( $h$ ) positioniert werden, damit die optische Achse des Scheinwerfers mit dem Mittelpunkt der Projektionswand in Übereinstimmung gebracht werden kann. Die so für den Scheinwerfer eingestellte Höhe wird mit  $h_0$  bezeichnet. Weiterhin hat die Bewegungseinheit ein oder zwei Drehachsen, mit denen der Scheinwerfer um seine  $j$  bzw. seine  $J$ -Achse im Bereich  $-90$  bis  $+90^\circ$  gedreht werden kann. Der resultierende Winkel zwischen der optischen Achse und einem betrachteten Strahl wird im Folgenden mit  $g$  bezeichnet.

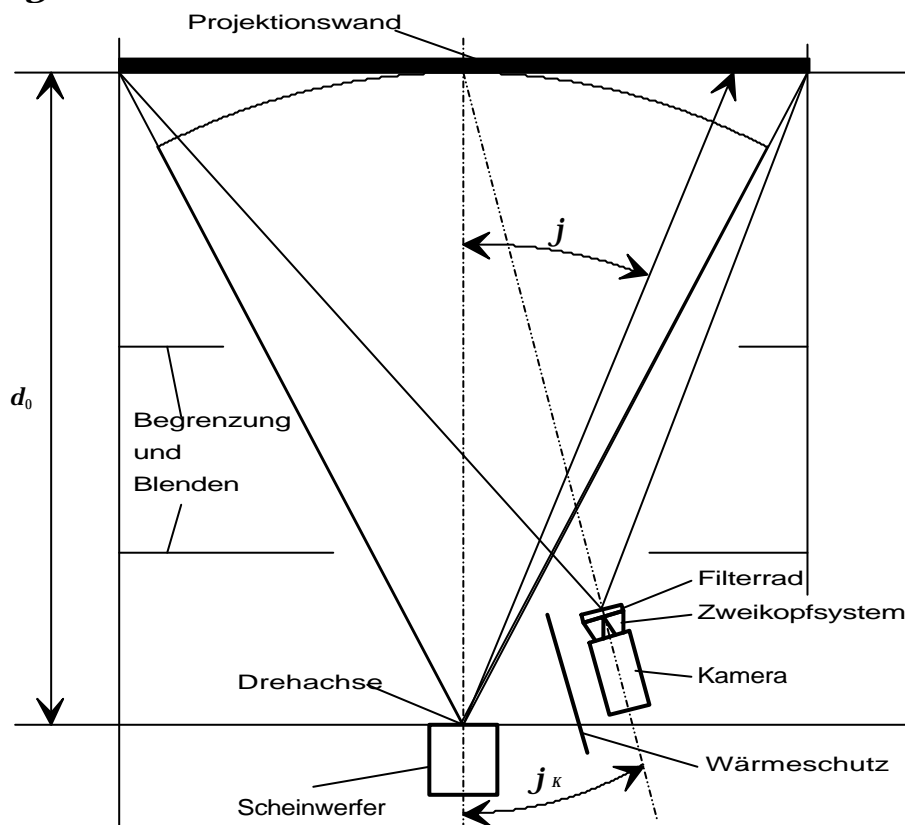


Bild 1: Prinzipskizze (Draufsicht) des Messaufbaus für eine Goniometer- und Bewegungseinheit

Der Scheinwerfer strahlt in einen schwarz ausgekleideten Tunnel, der zusätzlich mit verschiedenen Blenden versehen werden kann. Die Projektionswand der Größe  $2a \cdot 2b$  befindet sich in einem Abstand  $d_0$  von der Drehachse des Scheinwerfers<sup>3</sup> am Ende des

<sup>2</sup> Das hat natürlich die vom Leuchtenwender her bekannten Nachteile des Einflusses der Bewegung der Lampe auf ihre Betriebsbedingungen während der Messung. Im Gegensatz dazu bleibt die Lampe bei Nahfeldgoniometern meist in Ruhe, da sich nur die Kamera bewegt.

<sup>3</sup> Die Drehachse sollte in der Lichtaustrittsfläche des Scheinwerfers liegen, was aus mechanischen Gründen allerdings nicht ganz realisierbar ist. Die Drehachse wird daher etwas in Richtung des Scheinwerfermittelpunktes verlagert und die Daten werden dann in die geforderte Drehachse umgerechnet.

Tunnels. Die Leuchtdichte bzw. die bewerteten Strahldichten der Projektionswand werden in verschiedenen Goniometerpositionen von beiden Sensoren der Zweikopfkamera erfasst und ergeben ein Wertefeld  $S_{i,k}$  mit  $k = 0..3$ , wobei  $k = 0$  das Leuchtdichtebild kennzeichnet und die Bilder mit den Indizes  $k = 1,2,3$  die Kanäle r,g,b der Farbkamera darstellen.

### 2.3 Kamerasystem

Für die Erfassung der lichttechnischen Daten wird eine fest montierte Zweikopfkamera vom Typ LMK96 oder 98 verwendet. Durch dieses Kamerasystem besteht einerseits die Möglichkeit die Leuchtdichten auf der Projektionswand mit einem spektral gut angepassten Sensor ( $f_1' \approx 3.5\%$ ) orts aufgelöst zu erfassen und andererseits auch die Farbverteilung auf der Projektionswand mit Hilfe des 1Chip-RGB Messkopfes zu bestimmen. Um zusätzlich zu den Möglichkeiten der Integrationszeitvariation<sup>4</sup> eine weitere Möglichkeit zur Anpassung des Dynamikbereiches der Kamera an die Szene zu erhalten, werden Neutralgraufilter verwendet, die in einem Filterrad automatisch gehandhabt werden können. Die Kamera bzw. das Objektiv wird so eingerichtet, dass die Projektionswand im größten möglichen Abstand  $d_0$  vollständig erfasst wird.

Der verwendete 1Chip-RGB Messkopf mit RGB-Primärvalenz-Matrix erfasst drei spektrale Bereiche. Die Farbfilter sind bei der verwendeten Matrix mit der Filterstruktur nach Bayer ([1], Matrix Sony ICX084AK [8]) angeordnet. Diese Kamera wird im Weiteren kurz Farbkamera genannt.

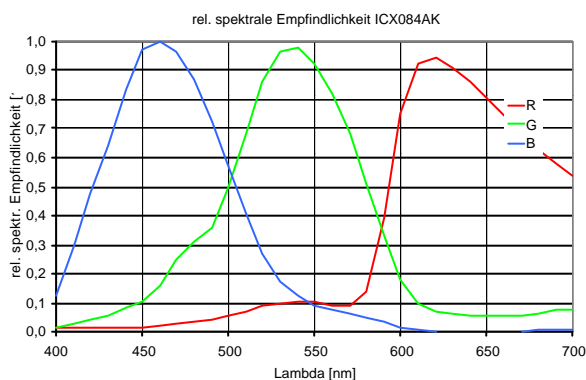


Bild 2: Relative spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Pixelklassen (ICX084AK)

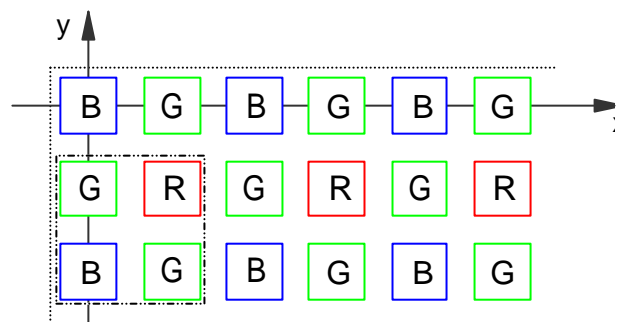


Bild 3: Anordnung der RGB-Primärfilter nach Bayer (Bayer-Struktur, [1])

### 2.4 Grundgleichungen

Die Darstellung in Bild 5 zeigt, wie die Bilddaten erfasst werden und veranschaulicht die Grundlagen für das Zusammensetzen der Bilddaten zu einem Ergebnisdatenfeld. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Projektionswand an die Stelle verschoben, an der die Erfassung bei unbewegtem Scheinwerfer erfolgen müsste. Die angefahrenen Scheinwerferpositionen, die zu diesen Projektionswandpositionen gehören, wurden im Bild unten rechts zusätzlich dargestellt.

<sup>4</sup> Die Möglichkeiten der Integrationszeitvariation der Kamera können bei der Scheinwerfervermessung nicht voll ausgenutzt werden, da die Integrationszeiten nach unten durch die Einflüsse der Lichtmodulation und nach oben durch die zulässige Gesamtmesszeit begrenzt werden. Eine Anpassung des Messbereiches der Kamera durch Neutralgraufilter bietet sich daher an.

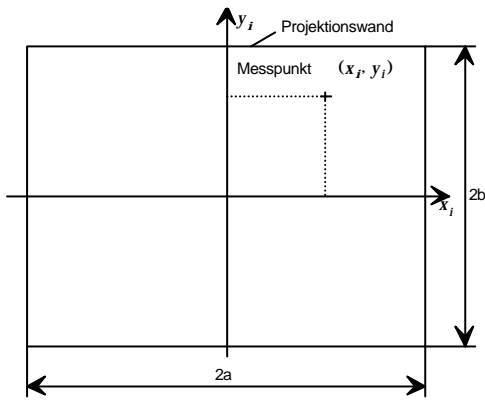


Bild 4: Koordinatensystem auf der realen Projektionswand

Entsprechend der Darstellung in Bild 4 werden auch die Koordinaten  $(x, y)$  der virtuellen Projektionswand beschrieben.

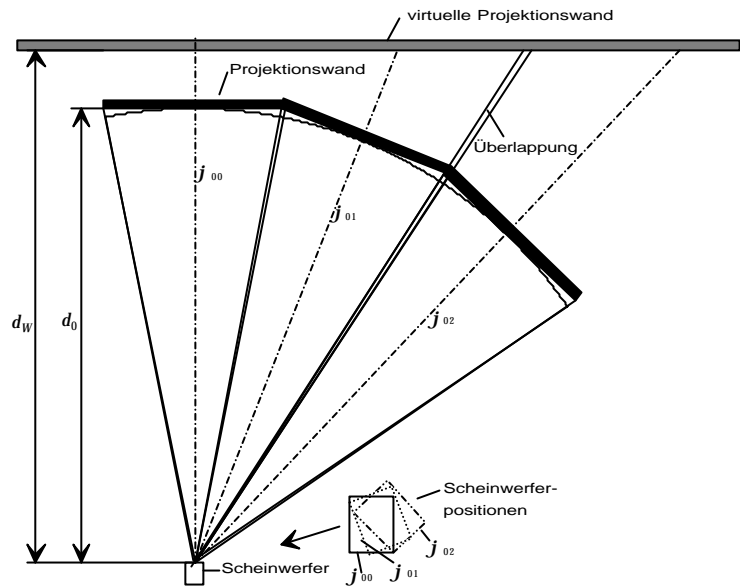


Bild 5: Darstellung verschiedener Positionen (Draufsicht)

### 2.4.1 Koordinatensysteme

Die Kalibrierung der Kamera enthält eine Transformation des Pixelkoordinatensystems in das Koordinatensystem der Projektionswand. Der Abstand eines Punktes auf der Projektionswand von der Oberfläche des zu vermessenden Scheinwerfers in der Richtung  $\mathbf{g}$  wird mit  $d_g$  bezeichnet.

$$d_g = d_w / \cos \mathbf{g}_2 \quad \text{und} \quad d_{g_i} = d_0 / \cos \mathbf{g}_{2i} \quad (1)$$

Der Winkel eines Lichtstrahls bezogen auf die ausstrahlende Flächennormale (Lichtaustrittsfläche des Scheinwerfers) wird mit  $\mathbf{g}_1$  und bezogen auf die Flächennormale der Projektionswand mit  $\mathbf{g}_2$  bezeichnet. Für die virtuelle Projektionswand gilt dabei  $\mathbf{g}_1 = \mathbf{g}_2$ . Für die Teilprojektionswand  $i$  werden die entsprechenden Winkel mit  $\mathbf{g}_{1i}$  und  $\mathbf{g}_{2i}$  bezeichnet. Die Beziehungen zwischen den Größen können mit einfachen geometrischen Beziehungen ermittelt werden.

### 2.4.2 Lichttechnische Umrechnungen

Die erfassten Leuchtdichten bzw. die bewerteten Strahldichten werden sektionsweise erfasst (Bild 5) und müssen für die weitere Verwendung in Beleuchtungsstärken auf der virtuellen Projektionswand (z.B. für Auswertungen nach [2]) bzw. in eine Lichtstärkeverteilung umgerechnet werden.

#### 2.4.2.1 Umrechnung in die Beleuchtungsstärke auf einer virtuellen Wand

Für die Projektionswand kann, bei entsprechend sorgfältiger Auswahl der Materialien im betrachteten Winkelbereich, in guter Näherung Lambertcharakteristik angenommen werden, sodass für die Beleuchtungsstärke auf der Projektionswand gilt:

$$E_i = \frac{\mathbf{P} \cdot \Omega_0}{\mathbf{r}} L_i = k_E \cdot L_i = S_{i,0} \quad (2)$$

Die Projektionswand sollte auf der gesamten Fläche den gleichen Reflexionsfaktor  $\mathbf{r}$  aufweisen, damit man die Gleichung (2) auf das gesamte Bild anwenden kann. Den Kalibrierfaktor  $k_E$  für die Beleuchtungsstärke auf der Wand kann man dann mit Hilfe einer Beleuchtungsstärke- und einer Leuchtdichtemessung in der Mitte der Projektionswand ermitteln. Alternativ dazu könnte die Ungleichförmigkeit der Wand auch im Shading des Objektivs untergebracht werden, allerdings ist hier die Bestimmung der Ungleichförmigkeit

nicht ganz trivial, sodass besonderes Augenmerk auf die Auswahl und die Wartung der Projektionswand gelegt werden sollte.

Für die virtuelle Projektionswand erhält man mit dem quadratischen Entfernungsgesetz und den Gleichungen ( 1) und ( 2) die Gleichung ( 4):

$$E_i = \frac{I(\mathbf{g}_i)}{d_{gi}^2} \cos \mathbf{g}_{2i} \Omega_0 \quad \text{und} \quad E = \frac{I(\mathbf{g}_i)}{d_g^2} \cos \mathbf{g}_2 \Omega_0 \quad (3)$$

$$E = k_E \cdot L_i \frac{d_0^2}{d_w^2} \frac{\cos^3 \mathbf{g}_2}{\cos^3 \mathbf{g}_{2i}} = k_E \cdot L_i \cdot k_{dg} \quad (4)$$

In Bild 6 werden die Zusammenhänge aus Gleichung ( 4) dargestellt.

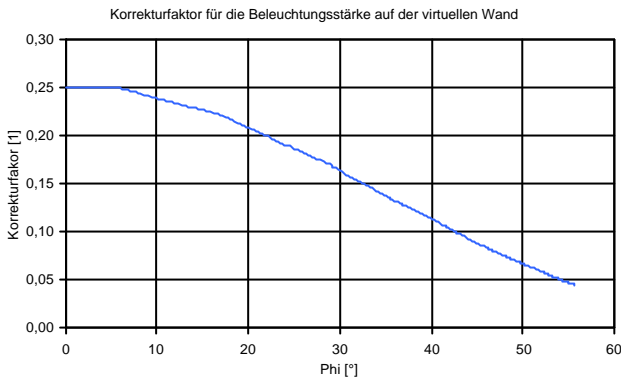


Bild 6: Korrekturfaktor  $k_{dg}$  für die Beleuchtungsstärkeumrechnung auf die virtuelle Wand

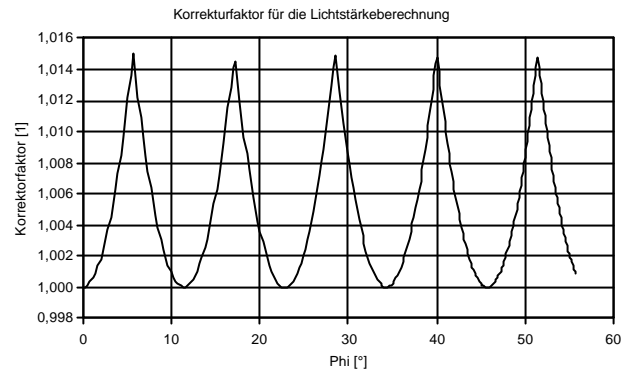


Bild 7: Korrekturfaktoren für die Lichtstärkeumrechnung  $k_l(\mathbf{g}_i)$  in Abhängigkeit des Winkels  $\mathbf{g}_i = \mathbf{j}$

### 2.4.2.2 Berechnung von Lichtstärken

Die Berechnung der Lichtstärkedaten kann mit Hilfe der Gleichungen ( 1) und ( 3) erfolgen:

$$I(\mathbf{g}_i) = \frac{k_E \cdot L_i \cdot d_0^2}{\cos^3 \mathbf{g}_{i2} \Omega_0} = \frac{k_E \cdot L_i \cdot d_0^2 \cdot k_l(\mathbf{g}_i)}{\Omega_0} \quad (5)$$

Die aus Gleichung ( 5) resultierenden Korrekturfaktoren  $k_l(\mathbf{g}_i)$  sind in Bild 7 dargestellt, wobei für das Beispiel  $\mathbf{g}_i = \mathbf{j}$  gilt. Die Abweichungen von einer Konstanten sind für die geometrischen Verhältnisse des Beispiels sehr gering, sodass man hier ggf. auf eine Korrektur verzichten kann.

### 2.4.2.3 Berechnung von Farbwertanteilen

Aus den direkt ausgelesenen und korrigierten Signalwerten der 1Chip-CCD-Matrix werden durch einfache Makropixelbildung oder durch entsprechende Interpolationsalgorithmen [3] die Signalwerte der Bildaufnahmen in den Kanälen  $k=1,2$  und  $3$  (r,g,b) für das Datenfeld  $S_{i,k}$  ermittelt. Im Anschluss daran werden die relativen Farbanteile berechnet:

$$s_{i,k} = \frac{S_{i,k}}{S_{i,1} + S_{i,2} + S_{i,3}} \quad (6)$$

Diese Farbwertanteile liegen in dem durch die relativen spektralen Empfindlichkeiten der Kamera gebildeten Farbraum vor und können im Allgemeinen nicht in Farbkordinaten von Standardfarbräumen umgerechnet werden. Grundlagen und Applikationen für diese Umrechnungen wurden von den Autoren in [6] beschrieben.

In der hier beschriebenen Anwendung kommt es aber nicht darauf an, normgerechte Farbkordinaten zu ermitteln. Es sind Farbabweichungen gefordert, die auch im Farbraum der Kamera bestimmt werden können.

Die Daten aus Gleichung ( 6) können per Koordinatentransformation auf eine virtuelle Wand projiziert werden, wobei die Farbwertanteile nicht umgerechnet werden müssen. Es

erfolgt nur eine andere Anordnung der Werte. Hierbei eignet sich dann die Darstellung mit Abstandsfaktoren nach der ESTA-Norm besonders.

#### 2.4.2.4 Abstandsfaktoren nach ESTA-Norm

Die in der ESTA-Norm [2] geforderten Darstellungen werden nicht über Winkel oder Abstände sondern über sogenannte Abstandsfaktoren (Throw Distance Multipliers, TDM) aufgetragen. Diese berechnen sich aus den hier verwendeten Koordinaten in folgender Weise:

$$TDM(x) = \frac{x}{d_w} \quad \text{und} \quad TDM(y) = \frac{y}{d_w} \quad (7)$$

Werden die Achsen der Darstellung, wie in der ESTA-Norm gefordert, mit TDM bezeichnet und skaliert man die Bilddaten für die Beleuchtungsstärke auf einen Bereich von 0 bis 100% mit einer zusätzlichen Angabe für das Beleuchtungsstärkemaximum, dann entfällt auch die Umrechnung bei verschiedenen virtuellen Wandabständen. Für Projektionswände verschiedener Abstände (von  $d_1$  nach  $d_2$ ) muss dann nur die maximale Beleuchtungsstärke umgerechnet werden, wobei man aus Gleichung (4)  $E_2 = E_1 \cdot d_1^2 / d_2^2$  erhält. Zur Zulässigkeit der Umrechnung von  $d_1$  nach  $d_2$  innerhalb der fotometrischen Grenzentfernung siehe Abschnitt 2.1.

### 3 Beispielmessungen

In Bild 8 ist die relative Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Projektionswand in Pseudofarben eines Standardscheinwerfers dargestellt. Dabei wurden die Daten logarithmisch skaliert, wobei ein Bereich von 3 Dekaden verwendet wurde. In die Darstellung wurde ein Rechteck und eine Linie eingezeichnet, die zur Orientierung dienen. Der Bereich des Rechtecks ist in Bild 9 und Bild 10 nochmals dargestellt. Dabei wurde in Bild 9 die nach ESTA-Norm [2] geforderte ISO-Darstellung verwendet. In Bild 10 ist der Bereich des Rechtecks in Pseudofarben dargestellt, wobei eine lineare Skalierung verwendet wurde. Man kann gut erkennen, dass die Ausstrahlcharakteristik des Scheinwerfers von der Rotationssymmetrie abweicht. Allgemein erhält man mit diesen Darstellungsmöglichkeiten einen guten Überblick über die Einsatzmöglichkeiten des Scheinwerfers.

In Bild 11 sind für die in Bild 8 eingezeichnete Linie die relative Beleuchtungsstärke und die relativen Kamerafarbkoordinaten  $r$  und  $g$  über die Linienlänge dargestellt. Die Farbwertanteile der Kamera ändern sich über die Scheinwerferfläche erheblich, was in diesem Fall den Farbeindruck verschlechtert und korrigiert werden muss. Ob die Farbwertunterschiede im Kamerafarbraum vom Auge detektiert werden können, muss im Einzelfall auf der Basis spezieller Farbraumtransformationen ermittelt werden.

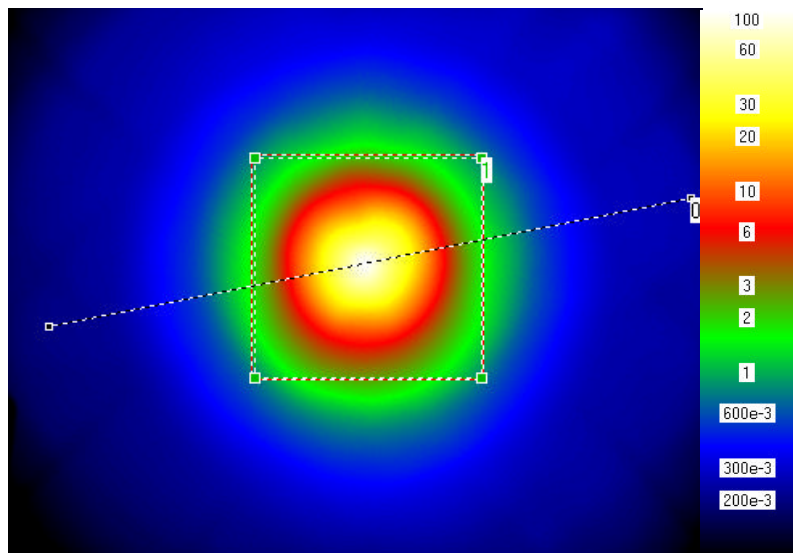


Bild 8: Relative Beleuchtungsstärkeverteilung eines Scheinwerfers auf einer Projektionswand (Pseudofarben, Skalierung in %, 3 Dekaden logarithmisch)

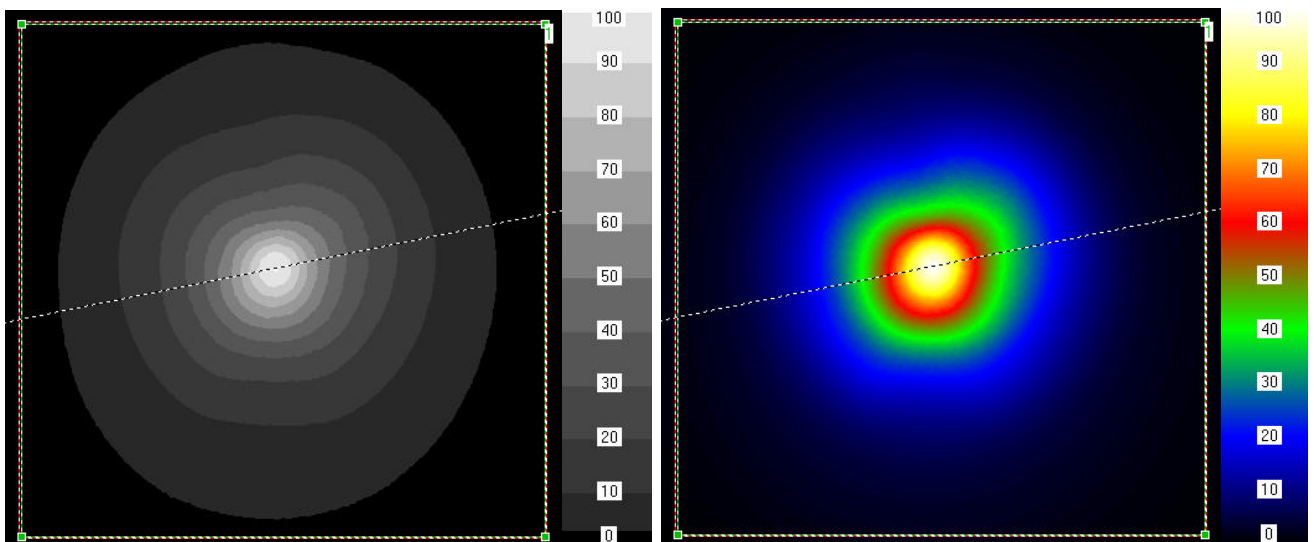


Bild 9: Isofarbendarstellung der relativen Beleuchtungsstärke (100,90,...,10,3%)

Bild 10: Pseudofarbendarstellung der relativen Beleuchtungsstärke (lineare Skalierung)

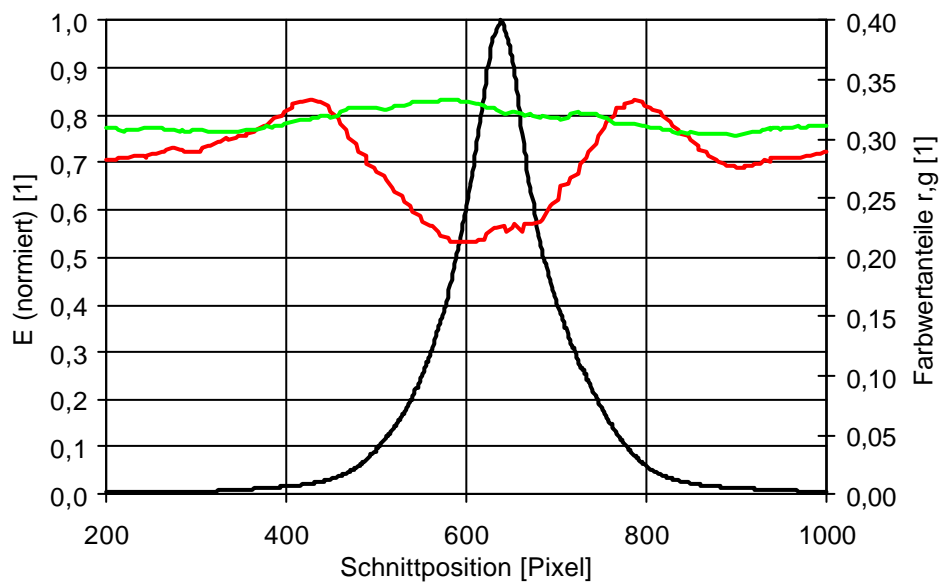


Bild 11: Schnittdarstellung für die relative Beleuchtungsstärke und die Farbwertanteile r,g

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass mit kalibrierten digitalen CCD-Kameras in Verbindung mit applikationsspezifischen Messanordnungen, Scheinwerfer effektiv vermessen werden können. Dabei ging es bei den Anwendungen, die in diesem Artikel betrachtet wurden, im Wesentlichen um Scheinwerfer sehr hoher Leistung und um schnelle Messzeiten, die auch einen Einsatz in der Produktionskontrolle ermöglichen.

Mit dem vorgestellten Messsystem können Leuchtdichte-, Beleuchtungsstärke- und Lichtstärkeverteilungen erfasst werden. Weiterhin können Farbabweichungen bestimmt werden, die zur Beurteilung der Farbkonstanz über die beleuchtete Fläche eines Scheinwerfers eingesetzt werden.

### Literatur:

- [1] Bayer, B.E.: Color Imaging Array. US Patent No.3971065, PD:20.07.1976
- [2] ESTA: Draft Entertainment Lighting Luminaries – Presentation of Photometric Performance Data. Entertainment Service and Technology Association, 1/22/2000
- [3] Gupta, M.R.; Chen, T.: Vector Color Filter Array Demosaicing. Information Systems Laboratory, Department of Electrical Engineering, Stanford University, In Proceedings of the SPIE Electronic Imaging '2001 conference, Vol. 4306, San Jose, CA, January 2001
- [4] Riemann, M.; Schmidt, F.; Poschmann, R.: Verfahren und Anordnung zur Messung der Lichtstärkeverteilung von Leuchten und Lampen. DE4110574A1, AD: 30.03.1991
- [5] Schmidt, F.; Fischbach, I.; Poschmann, R.: Rigo 801 – Nahfeldgoniometer. über [www.technoteam.de](http://www.technoteam.de)
- [6] Schmidt, F.; Krüger, U.: Eigenschaften von digitalen 1Chip-CCD-Kameras bei der Anwendung zur Farbbeurteilung und Farbdarstellung. Tagung der Deutschen Farbwissenschaftlichen Gesellschaft, 10.-11.09.1999, Ilmenau, 1999, auszugsweise veröffentlicht in: Schmidt, F., Krüger, U.: Titel, 47. Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 2000, S. 114-140, 2000
- [7] Schmidt, U.: Bestimmung der räumlichen Beleuchtungsstärkeverteilung von Scheinwerfern mittels Leuchtdichtekamera - Beurteilung der Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2001
- [8] Sony: Datenblätter CCD-Komponenten. ICX085AK; über [www.sony.com](http://www.sony.com)
- [9] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH. Leuchtdichtemesskamera LMK96-2; über [www.technoteam.de](http://www.technoteam.de)