

Ortsaufgelöste Farbmessung von Licht- und Körperfarben

Franz Schmidt, Udo Krüger, Ralf Poschmann

1 EINLEITUNG

Die ortsaufgelöste Bestimmung von licht- und strahlungsphysikalischen Größen ist in den letzten Jahren immer wichtiger geworden. In zahlreichen Applikationen u.a. Analyse von Arbeitsplatz-, Straßen- und Tunnelbeleuchtung und in der Bewertung des Nachtdesigns im Auto, um nur wenige Beispiele zu nennen, gehört die ortsaufgelöste Bestimmung der Leuchtdichte zum Stand der Technik [1][2]. In zunehmenden Maße wird die ortsaufgelöste Bestimmung von Farbwerten und Farbabweichungen immer interessanter. Dabei geht es vielfach darum Farbwerte zu prüfen (Vergleichsmessungen/ Abweichungen zum Sollwert). In diesem Beitrag werden die Grundlagen der ortsaufgelösten Bestimmung von Farbwerten kurz beschrieben, um darauf aufbauend auf die Messung von lichttechnischen und farbmeterischen Daten an Scheinwerfersystemen einzugehen.

1.1 Möglichkeiten zur ortsaufgelösten Bestimmung von Farbvalenzen

Die punktweise Farbmessung erfolgt üblicherweise mit drei oder mehr Sensoren, die entsprechend der gewünschten Farbräume speziell angepasste spektrale Empfindlichkeiten aufweisen. Bei der ortsaufgelösten Bestimmung lichttechnischer Größen sind entsprechend drei oder mehr Bilder erforderlich, die mit Bildsensoren entsprechender spektraler Empfindlichkeitscharakteristik gewonnen werden. Für die ortsaufgelöste Bestimmung der Farbwerte muss überlegt werden, wie die einzelnen Spektralbereiche angeordnet werden, bzw. wie deren Erfassung gestaltet wird. Die getrennte Erfassung der Spektralbereiche kann optisch, örtlich, zeitlich oder in einer Kombination aus den drei genannten Verfahren erfolgen:

- **Optische Signaltrennung:** Das Spektrum wird durch optische Maßnahmen so aufgeteilt, dass verschiedene Empfänger das Signal gleichzeitig erfassen können (z.B. Strahlteilerwürfel mit dichroitischen Spiegelflächen, Gitter, Prisma).
- **Örtliche Signaltrennung:** Verschieden angepasste Empfänger werden nebeneinander angeordnet, sodass die Signalerfassung nur angenähert an einem Ort stattfindet (z.B. 1Chip-CCD-Matrix, Dreibereichssensoren).
- **Zeitliche Trennung:** Die Daten für die einzelnen Sensoren werden zeitlich nacheinander erfasst. Filterrad (z.B. Liquid Crystal Tunable Filter [3], Elektrisch veränderbare Empfindlichkeiten der Sensoren [4], Bewegte Gitter, Prismen und Spiegel).

Eine neue Art von Sensoren [5] nutzt die wellenlängenabhängige Eindringtiefe von Photonen in das Halbleitermaterial aus, um verschiedene spektrale Empfindlichkeiten gleichzeitig in einem Pixel zu realisieren.

Durch die Verwendung digitaler Kameras in Verbindung mit ausgewählten Objektiven können unter Einbeziehung und Korrektur der Systemeigenschaften bildauflösende Messsysteme für strahlungs- und lichttechnische Größen realisiert werden und gehören inzwischen zu den Standardmesssystemen im Labor und im Feld [1][2][6].

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Werner-von-Siemens-Straße 10, D-98693 Ilmenau,
<http://www.technoteam.de>

1.2 Berechnung von Farbwertanteilen

Aus den direkt ausgelesenen und korrigierten Signalwerten der 1Chip-Sensoren werden durch einfache Makropixelbildung oder durch Interpolationsalgorithmen [7] die Signalwerte der Bildaufnahmen in den Kanälen (R,G,B) für das Sensordatenfeld ermittelt. Im Anschluss daran werden die Farbwertanteile (r,g,b) berechnet. Diese Farbwertanteile liegen in dem durch die relativen spektralen Empfindlichkeiten der Kamera gebildeten Farbraum vor. Die Umrechnung in Farbkoordinaten von Standardfarbräumen führt zu mehr oder weniger großen Fehlern und kann in der Regel nur für definierte Randbedingungen eingesetzt werden. Die Messunsicherheiten der relativen Farbwertanteile können nach den in [8] und [9] beschriebenen Verfahren¹ abgeschätzt werden. Für verschiedene Lichtquellen und für eine spektral vermessene 1Chip-CCD Farbkamera erhält man mit einer relativen Messunsicherheit der Ausgangsdaten R,G,B von $\tilde{u}(\cdot) = 1\%$ folgende Abschätzungen:

Lichtquelle	r	g	$\tilde{u}_c(r)$	$\tilde{u}_c(g)$
Halogenlampe	0,536	0,321	0,006	0,009
D65	0,283	0,371	0,009	0,007
Monochromatisch (590nm)	0,417	0,582	0,008	0,006

2 ORTSAUFGELOSTE FARBMESSUNG ZUR BEURTEILUNG VON SCHEINWERFERN

Die Größe der Farbabweichungen von einem definierten Weißpunkt über die ausgeleuchtete Fläche ist bei der Herstellung, Endkontrolle und Anwendung von Scheinwerfersystemen ein wesentliches Qualitätskriterium. Es wird im Folgenden ein Messverfahren vorgestellt, mit dem es möglich ist, mit Hilfe der ortsaufgelösten Licht- und Farbmessstechnik, Ausstrahlcharakteristiken von Scheinwerfern relativ schnell zu erfassen und zu bewerten. Der Scheinwerfer wird auf einer Bewegungseinheit montiert und die Kamera wird in einer zur Projektionswand festen Position angebracht. Die Bewegungseinheit hat neben einer Höhenverstellung ein oder zwei Drehachsen (ϑ_G, ϕ_G).

2.1 Durchführung einer Messung

Nach Montage und Ausrichtung des Scheinwerfers wird das Goniometer so bewegt, dass man durch die Zusammenfassung der Einzelaufnahmen (Positionen der Einzelaufnahmen siehe Bild 2) nach entsprechenden Koordinatentransformationen ein Beleuchtungsstärkebild

¹ Für die kombinierte Messunsicherheit $u_c^2(r)$, $u_c^2(g)$ der Farbwertanteile r,g im Farbraum der Kamera erhält man mit der relativen Messunsicherheit $\tilde{u}(\cdot)$ der Kameramesswerte und den Korrelationskoeffizienten r_{ij} folgende Ausdrücke:

$$\begin{aligned}
 u_c^2(r) &= (1-r)^2 \tilde{u}^2(R) + g^2 \tilde{u}^2(G) + (1-r-g)^2 \tilde{u}^2(B) - 2r_{RG} g (1-r) \tilde{u}(R) \tilde{u}(G) \\
 &\quad - 2r_{RB} (r-1)(r+g-1) \tilde{u}(R) \tilde{u}(B) + 2r_{GB} g (1-r-g) \tilde{u}(G) \tilde{u}(B) \\
 u_c^2(g) &= r^2 \tilde{u}^2(R) + (1-g)^2 \tilde{u}^2(G) + (1-r-g)^2 \tilde{u}^2(B) - 2r_{RG} r (1-g) \tilde{u}(R) \tilde{u}(G) \\
 &\quad + 2r_{RB} r (1-r-g) \tilde{u}(R) \tilde{u}(B) - 2r_{GB} (1-g)(1-r-g) \tilde{u}(G) \tilde{u}(B)
 \end{aligned}$$

Speziell für den hier betrachteten Fall der Farbmessung ist zu berücksichtigen, dass sich die relativen spektralen Empfindlichkeiten in bestimmten Teilen des Spektrums überlappen können und so für spektral abhängige korrelierte Anteile sorgen [10].

und ein Bild mit Farbwertanteilen im Kamerafarbraum auf einer virtuellen Projektionswand oder auf einem Kugelsegment um den Scheinwerfer erhält. Aus diesen Daten können dann die gesuchten lichttechnischen und farbmetrischen Kenngrößen berechnet werden.

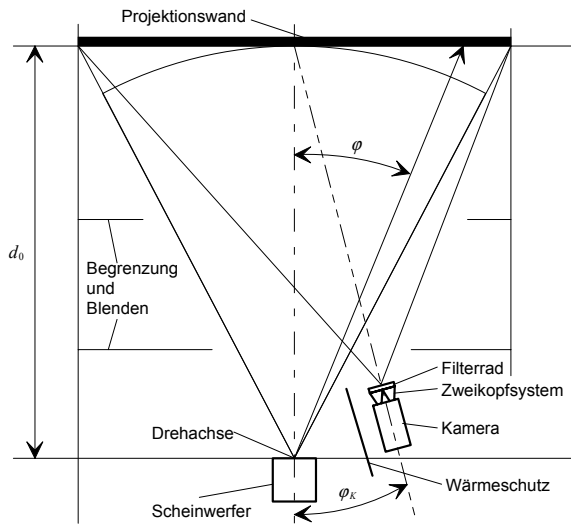


Bild 1: Prinzipskizze (Draufsicht) des Messaufbaus für eine Goniometer- und Bewegungseinheit

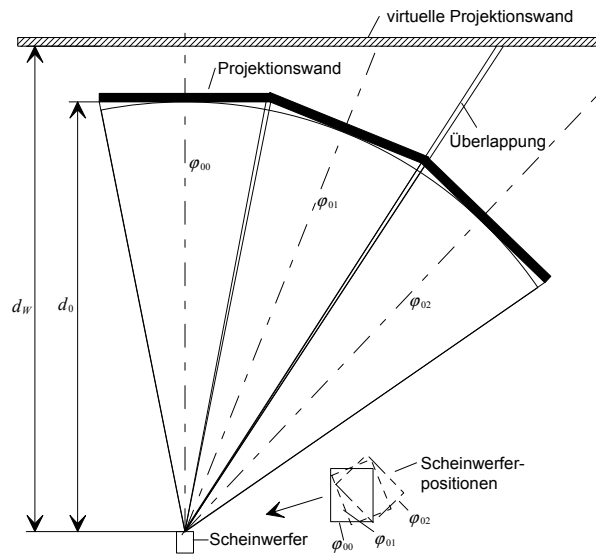


Bild 2: Darstellung verschiedener Positionen

2.2 Messergebnisse für ein Scheinwerfersystem

Für einen sehr leistungsstarken Scheinwerfer in der Betriebsart „Spot“ werden im Folgenden Messwerte angegeben. Die eingezeichneten Regionen (C1-C3) stellen den Bereich des Scheinwerfers dar in dem $I > 50\% I_{\max}$, $10\% I_{\max}$ und $3\% I_{\max}$ ist.

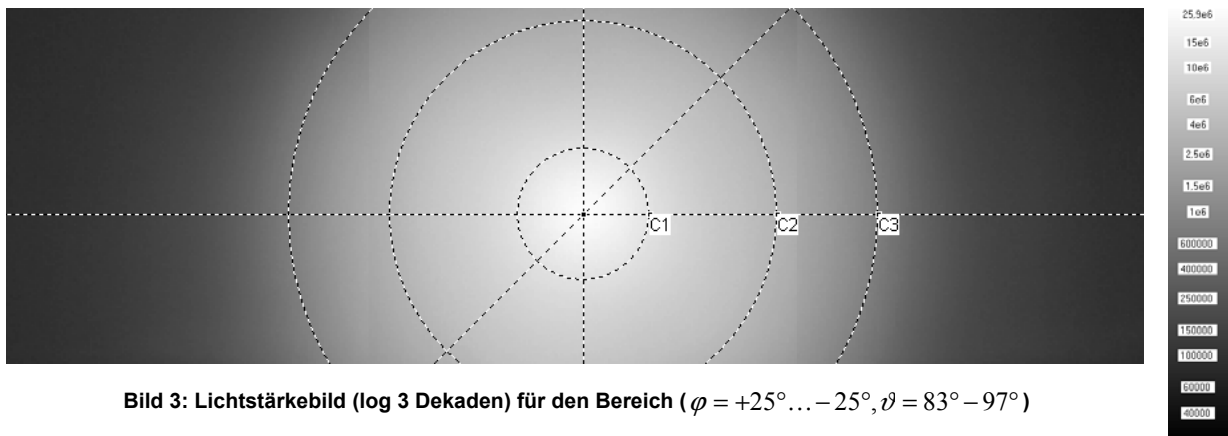


Bild 3: Lichtstärkebild (log 3 Dekaden) für den Bereich ($\varphi = +25^\circ \dots -25^\circ, \vartheta = 83^\circ - 97^\circ$)

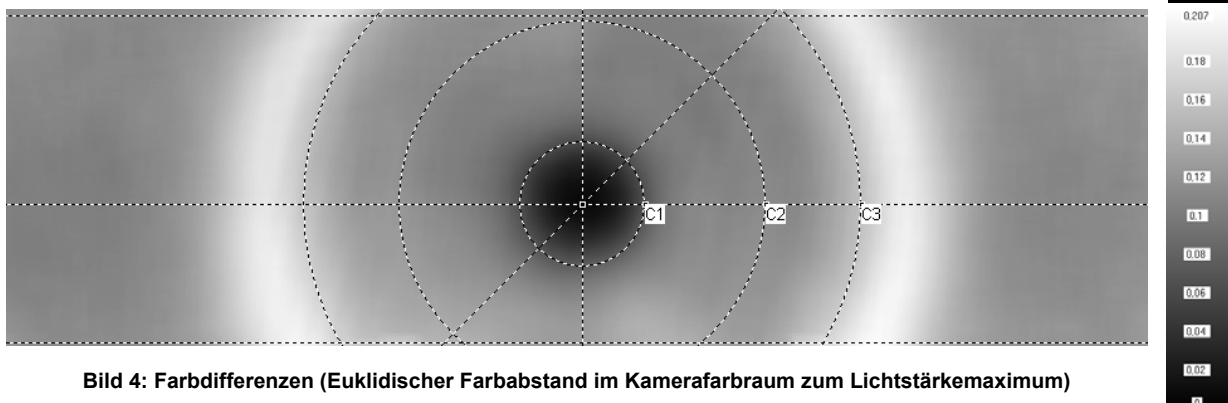


Bild 4: Farbdifferenzen (Euklidischer Farbabstand im Kamerafarbraum zum Lichtstärkemaximum)

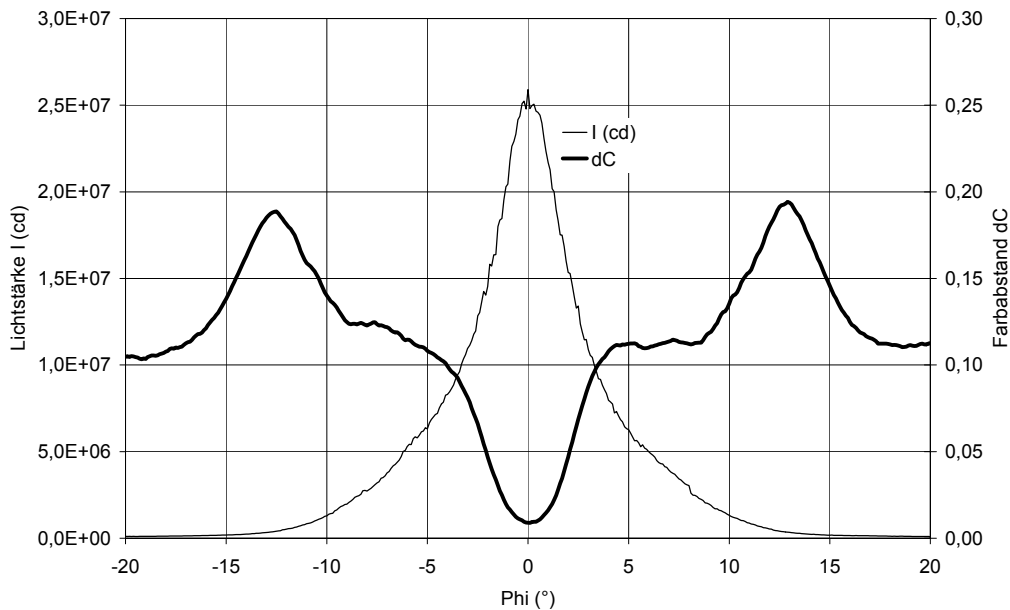


Bild 5: Horizontale Schnittdarstellung (Lichtstärke und Farbabweichung)

In Bild 5 kann man die gut detektierbaren Farbabweichungen erkennen. Für die Beurteilung der Auswirkungen auf das menschliche Farbempfinden müssen Erfahrungswerte gesammelt werden.

3 DANKSAGUNG

Die Autoren möchten sich bei den Mitarbeitern des Lichttechnischen Institutes der Technischen Universität Ilmenau für die Unterstützung bei der Durchführung unserer zahlreichen Messungen bedanken. Besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. em. M. Riemann für zahlreiche Hinweise und Anregungen bei der Lösung verschiedener lichttechnischer Probleme.

Literatur:

- [1] Schmidt, F.; Weyh, S.; Schlichting, B.; Krüger, U.: Digitale CCD-Kameras mit hoher Quantisierungsaufösung – Analyse&Design, 45. Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 1998, S.139-166, 1998
- [2] Wolf, S., Gall, D.: Der "Leuchtdichte-Analysator" als neue Qualität eines Messgerätes für die Lichtmesstechnik. Licht 98, Tagungsband, S. 146-152, 1998
- [3] Sharp, G.D.; Johnson, K.M.: A New RGB Tunable Filter Technology. Proc SPIE Vol. 2650, p.98-105, 1996
- [4] Rieve, P.; Böhm, M.: Elektrisch steuerbare Farbsensoren. Proc. Bildverarbeitung '97, Forschen, Entwickeln, Anwenden; Herg.: R.-J. Ahlers, 26-28.11.1997, Esslingen, (1997)
- [5] Merrill, R.B.: Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure. US Patent No.5965875, PD:24.04.1998 und http://www.foveon.net/X3_tech.html
- [6] Nevoigt, J.: Der Einsatz des Leuchtdichte-Analysators zur Blendungsbewertung von Tageslicht. Licht 98, Tagungsband, S. 253-260, 1998
- [7] Gupta, M.R.; Chen, T.: Vector Color Filter Array Demosaicing. Information Systems Laboratory, Department of Electrical Engineering, Stanford University, CA 94305, USA, SPIE, 2001
- [8] DIN: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Deutsche Übersetzung des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“, Beuth Verlag GmbH, 1. Ausgabe, 1995
- [9] Gardner, J.L.: Uncertainty Estimation in Colour Measurement. COLOR research and application, Vol. 25, No.5, pp 349-355, 2000
- [10] Robertson, A.R.: Colorimetric Significance of Spectrophotometric Errors. J. of the Optical Society of America, Vol. 57, No. 5, 1967