

# Ortsaufgelöste Farbmessung – Parameter und Kennwerte einer realisierten Filterradkamera

**Udo Krüger, Franz Schmidt**

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH  
Werner-von-Siemens-Straße 10, D-98693 Ilmenau  
e-Mail: [udo.krueger@technoteam.de](mailto:udo.krueger@technoteam.de), [franz.schmidt@technoteam.de](mailto:franz.schmidt@technoteam.de)

## Zusammenfassung

Im folgenden Beitrag werden aufbauend auf unserem Vortrag im Vorjahr [1], der die Designaspekte eines Filterradsystems zur ortsaufgelösten Farbmessung beschrieb, Parameter und Kennwerte des realisierten Filterradsystems mit Hilfe von Messergebnissen präsentiert. Im Anschluss daran wird der Einsatz des Systems anhand der Vermessung von Displays und einer Bündelmessung zur Bewertung eines Halogenstrahlers erläutert.

## 1 Einleitung

Die ortsaufgelöste Bestimmung von licht- und strahlungsphysikalischen Größen ist in den letzten Jahren immer wichtiger geworden. In zahlreichen Applikationen u.a. Nachtdesign im Auto, Bewertung von Arbeitsplatz-, Straßen- und Tunnelbeleuchtung, um nur wenige Beispiele zu nennen, gehört die ortsaufgelöste Bestimmung der Leuchtdichte zum Stand der Technik.

Aktuell werden mehr und mehr ortsaufauflösende Farbmesssysteme nachgefragt, die u.a. in der Entwicklung und Produktion von Displays und Lampen eingesetzt werden. Besonders die zunehmende Verwendung von LED's als Lichtquelle (auch für Beleuchtungszwecke) macht die ortsaufauflösende Farbmessung immer interessanter.

## 2 Systemrealisierung

Das in [1] vorgestellte Systemkonzept wurde im Verlauf des letzten Jahres realisiert und die beschriebenen bzw. vorhergesagten Daten konnten weitgehend erreicht werden. Das System wird als LMK-Color bezeichnet. Die LMK-Color ist eine auf dem Dreibeereichsverfahren basierende Farbmesskamera, die primär die Farbkoordinaten X,Y,Z nach CIE31 bestimmt, wobei der Y-Kanal auf Leuchtdichte in  $\text{cd/m}^2$  kalibriert wird.

Es werden **vier** Bilder mit speziell angepassten Filtern zeitlich nacheinander erfasst und in der Software mit Hilfe einer linearen parametrierbaren Matrizierung in ein Farbbild umgerechnet.

Im Filterrad, das insgesamt sechs Filterpositionen enthält, ist eine freie Öffnung (Glas) vorhanden, die für Messungen bis ins nahe Infrarot, die Verwendung eines Spektrometervorsatzes oder als schnelle Einstellhilfe eingesetzt werden kann. Die sechste Öffnung kann mit einem  $V'(\lambda)$  Filter für skotopische Messungen bestückt werden.

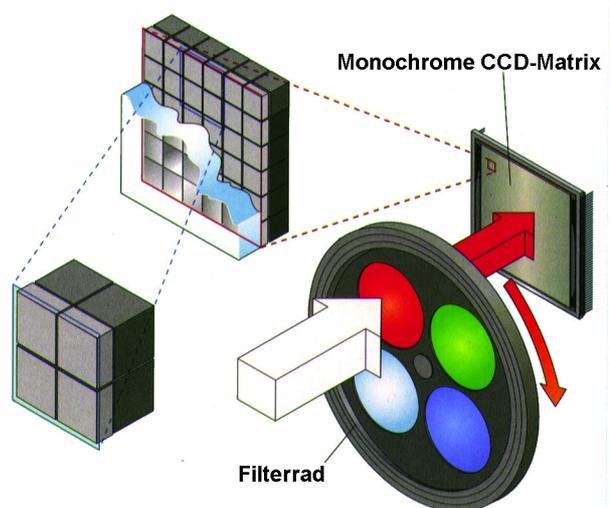


Bild aus AGFA: Einführung in die digitale Fotografie, 1996



Abbildung 1: LMK 98-3 Color (CCD-Kamera mit Filterrad zwischen Objektiv und CCD-Matrix)

### 3 Messwerte

Mit dem realisierten System wurden zahlreiche Messungen an verschiedenen Lichtquellen durchgeführt, die im Folgenden dargestellt werden. Alle Farbkoordinaten wurden im Vergleich zu einem Minolta CS-1000 gemessen.

#### 3.1 Spektrale Empfindlichkeit

Die spektrale Empfindlichkeit wurde durch die separate Vermessung von Filtern, Objektiven und Matrizen ermittelt. Das normierte Produkt dieser Einzelmessungen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

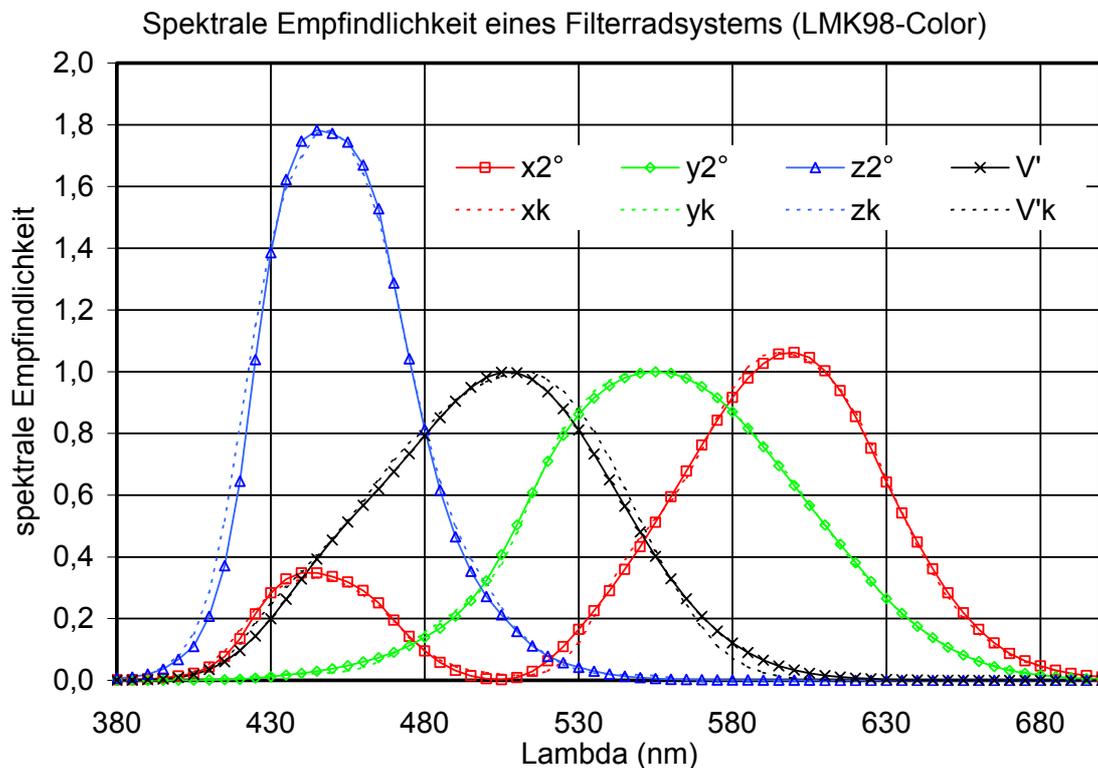


Abbildung 2: LMK 98-3 Color (CCD-Kamera mit Filterrad zwischen Objektiv und CCD-Matrix)

Die sich daraus ergebenden integralen Kennwerte, deren Berechnung in [1] erläutert wurde, sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Zielfunktion	$f'_1$ (%)	$f_1^*$ (%)	$\Delta_{\max}$	$\sum \Delta_i^2$
X2°	3,9	<b>3,9</b>	0,05	0,016
y2° / V(λ)	<b>2,1</b>	2,1	0,03	0,007
Z2°	5,4	<b>5,9</b>	0,10	0,028
V'(λ)	<b>6,2</b>	5,5	0,07	0,049

### 3.2 Messungen an breitbandigen Proben

Die Messungen für die breitbandigen Proben erfolgten an 40 Transmissionsproben verschiedener spektraler Transmission, die mit einer stabilisierten Xe-Hochdrucklampe/ U-Kugel hinterleuchtet wurden. Diese Proben decken einen großen Bereich an Farbkoordinaten ab.

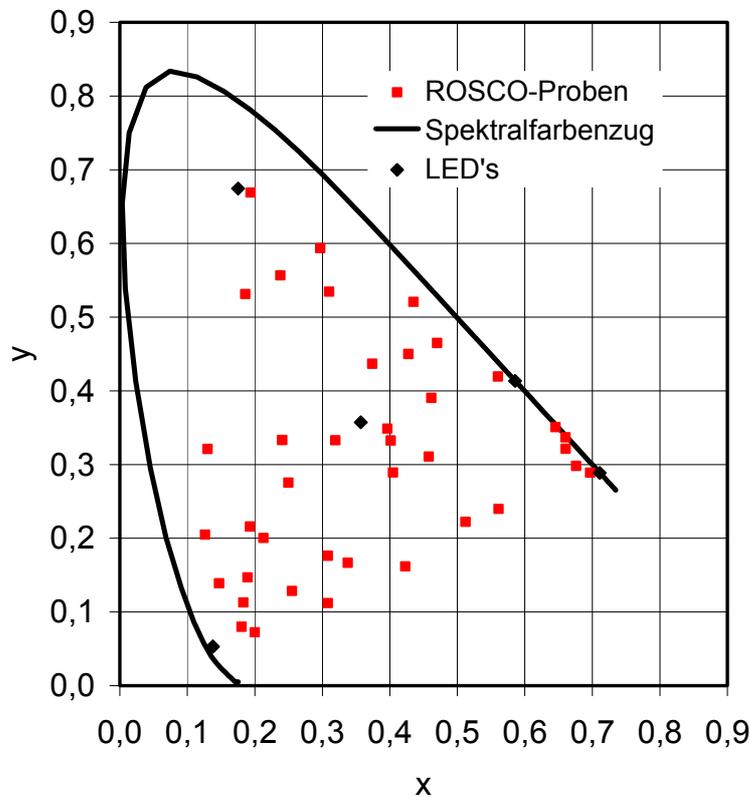


Abbildung 3: Farbkoordinaten der Testfolien und LED's

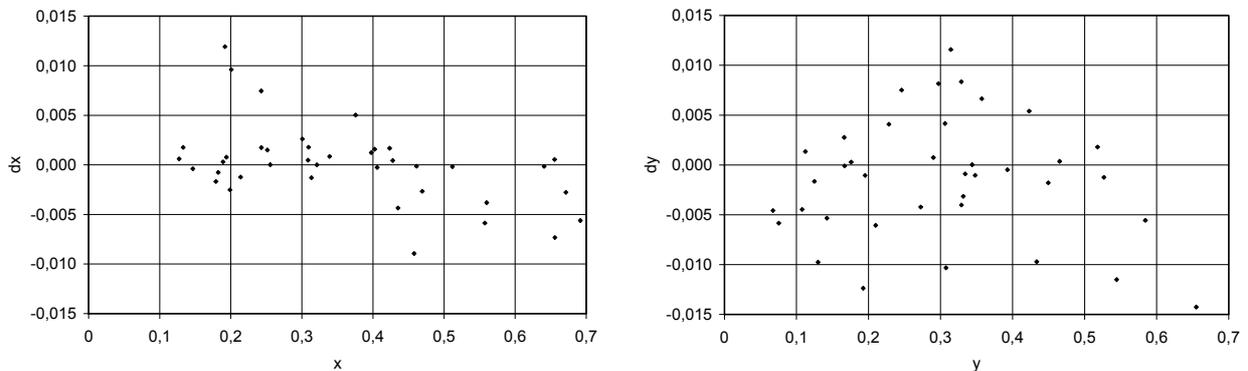


Abbildung 4: Abweichung der bestimmten Farbkoordinaten zum Referenzwert mit Standardmatrixierung

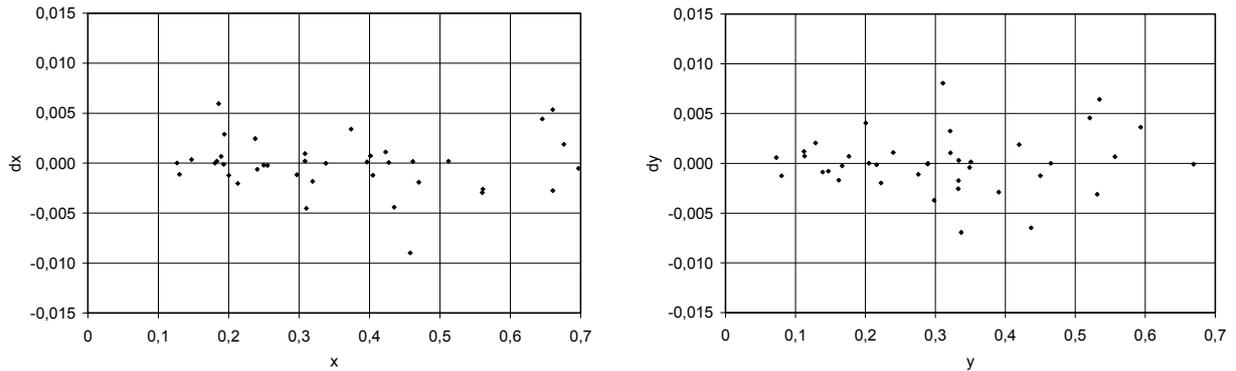


Abbildung 5: Abweichung der bestimmten Farbkoordinaten zum Referenzwert mit optimierter Matrixierung

### 3.3 Messungen an LED's

Die Farbkoordinaten von LED's wurden über sogenannte LED-Normale ermittelt. Hierbei werden thermostatisierte LED's an einer Konstantstromquelle betrieben, sodass sich die lichttechnischen Eigenschaften (Leuchtdichte, Farbkoordinate) zeitlich gesehen nur geringfügig ändern. Die LED's strahlen in eine Halbkugel. Das reflektierte Licht wird über eine Streuscheibe ausgekoppelt, sodass die leuchtende Fläche relativ gleichförmig erscheint.

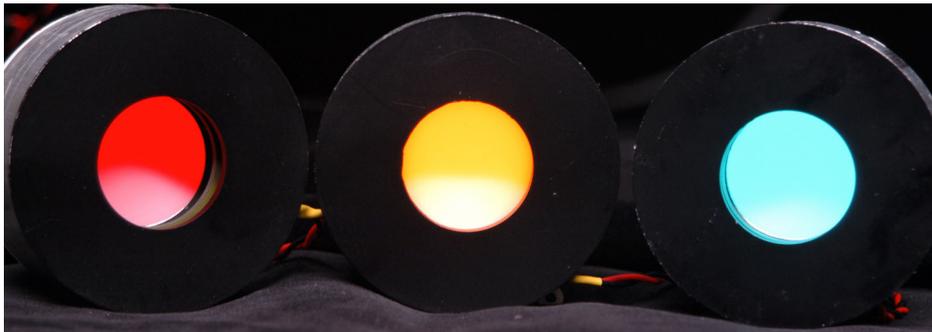


Abbildung 6: LED-Normale für den stabilen Betrieb von LED's

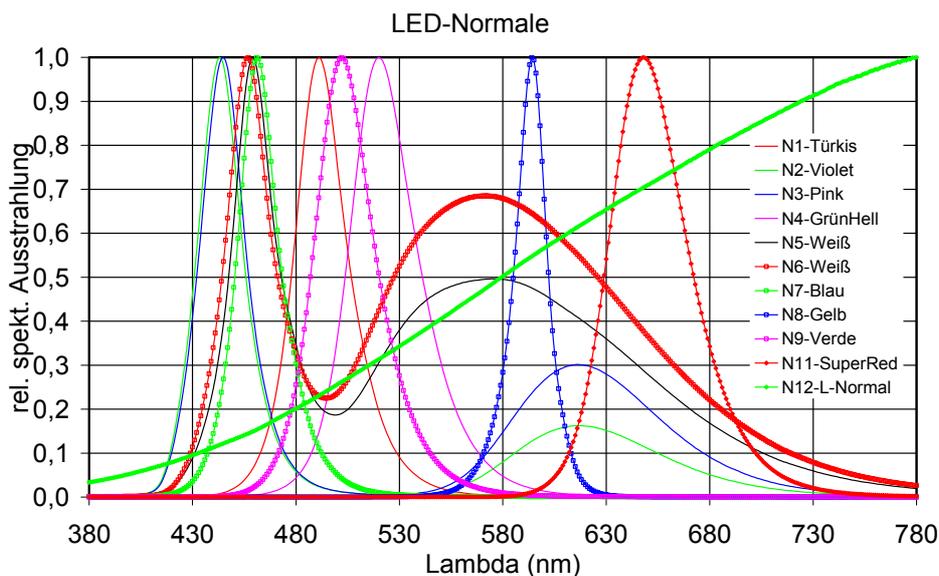


Abbildung 7: Spektrale Strahlendichte der LED-Normale und des Leuchtdichtennormals mit Normlichtart A

In der folgenden Tabelle werden die Leuchtdichte- und Farbwerte der einzelnen LED-Normale und deren Abweichung zum Referenzmessgerät dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass das Referenzmessgerät auf NIST<sup>1</sup> kalibriert ist, wogegen die Kamera mit Hilfe eines von der PTB<sup>2</sup> kalibrierten Leuchtdichtenormals angebunden wurde.

LED Normal	$L$ cd/m <sup>2</sup>	$x$	$y$	$\Delta L$ %	$\Delta x$	$\Delta y$
Türkis	148,4	0,0792	0,3521	6,1	-0,0041	0,0039
Violet	17,0	0,2549	0,0979	6,3	-0,0005	0,0036
Pink	19,4	0,3106	0,1414	3,9	0,0003	0,0027
GrünHell	463,6	0,1783	0,7115	2,7	-0,0063	0,0046
Weiß	363,9	0,3350	0,3254	1,6	-0,0011	-0,0018
Weiß	85,4	0,3535	0,3531	1,5	-0,0013	-0,0012
Blau	17,0	0,1388	0,0524	16,2	0,0031	0,0064
Gelb	93,3	0,5808	0,4183	-0,8	0,0032	-0,0043
Verde	73,9	0,0904	0,5590	7,2	-0,0106	0,0102
TrueGreen	89,0	0,1880	0,7046	2,8	-0,0068	0,0041
SuperRed	8,6	0,7092	0,2903	2,9	0,0047	-0,0055
Leuchtdichtenormal NLA	499,3	0,4514	0,4122	1,8	-0,0004	-0,0004

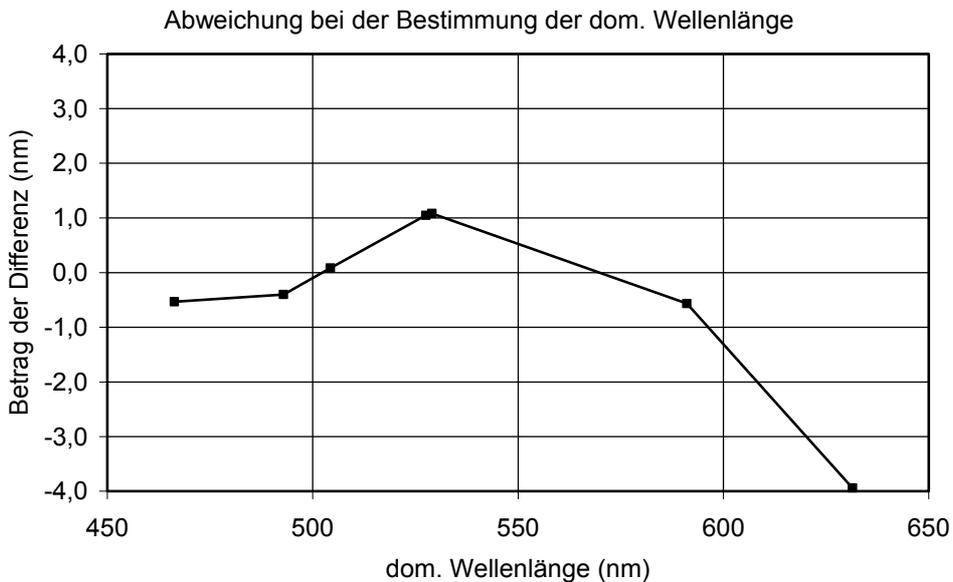


Abbildung 8: Abweichungen bei der Berechnung der dominanten Wellenlänge der monomodalen LED's zwischen der Farbkamera und dem Referenzgerät

### 3.4 Reproduzierbarkeit

Die Stabilität der Messkamera wurde anhand wiederholter Messungen eines weißen LED-Normals mit  $L=100$  cd/m<sup>2</sup>;  $x=0,3553$ ;  $y= 0,3621$  nachgewiesen. Die Messwerte wurden als Mittelwert über 1000 Pixel erfasst und es wurde die Wiederholpräzision als Streuung des Mittelwertes bestimmt.

$x,y$  <0,0001  
 $L$  <0.1%

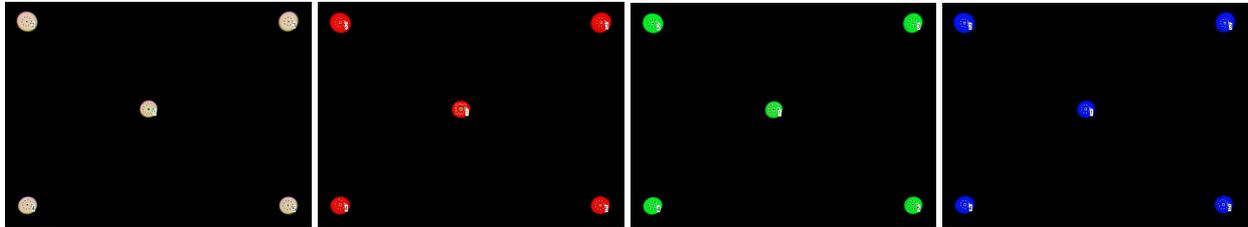
Wiederholpräzision (Repeatability) (Wiederholte Messung unter gleichen Messbedingungen mit den gleichen Parametern für die Erfassung und Auswertung)

<sup>1</sup> NIST: National Institute of Standards and Technology. <http://www.nist.gov>

<sup>2</sup> PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. <http://www.ptb.de>

### 3.5 Abweichungen über die Sensorfläche

Neben der Farbkoordinate an sich spielt bei einem ortsauflösenden Messsystem die Konstanz der Daten über den gesamten Bildbereich eine große Rolle. Für ein 8mm-Objektiv wurden diese Daten mit Hilfe der LED Normale bestimmt. Dazu wurden verschiedenfarbige LED Normale jeweils in der Bildmitte und in den Ecken vermessen. In der Abbildung sind die zusammengefassten Einzelaufnahmen dargestellt.



LED Normal	$\sigma_L$ (%)	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\Delta L$ (%)	$\Delta x$	$\Delta y$
Weiß	0,64	0,0005	0,0022	1,57	0,0013	0,0053
Rot	0,50	0,0016	0,0017	1,26	0,0043	0,0044
Grün	1,00	0,0010	0,0021	2,02	0,0024	0,0052
Blau	1,49	0,0001	0,0002	3,29	0,0002	0,0004

In der Tabelle sind die örtliche Streuung der Messwerte<sup>3</sup> ( $\sigma_L; \sigma_x; \sigma_y$ ) und die maximale Abweichung des größten vom kleinsten Messwert ( $\Delta L; \Delta x; \Delta y$ ) angegeben. Es ist zu beachten, dass bei der Bewertung der Ergebnisse neben der Winkelabhängigkeit der spektralen Transmission der Vollfilter und Objektivdaten auch die Ausstrahlcharakteristik der LED Normale, die lambertförmig angenommen wurde, zu berücksichtigen ist.

## 4 Anwendungsbeispiele

Die orts aufgelöste Farbmessung bietet viele Anwendungsmöglichkeiten, da mit dieser Methode viele Messwerte gleichzeitig erfasst werden können. Anhand einiger Aspekte bei der farbmetrischen Bewertung von Displays und Lampen soll dies erläutert werden.

### 4.1 Displayvermessung

Mit Hilfe eines hyperzentrischen Objektivs [2] wird Licht, das unter bestimmten Richtungen in das hyperzentrische Objektiv (andernorts auch konoskopisches Objektiv genannt) gelangt, auf unterschiedliche Pixel auf der Matrix abgebildet. Bei entsprechender Einstellung der Objektentfernung kommen alle erfaßten Lichtbündel näherungsweise vom gleichen Ausschnitt des Displays. Bei dem eingesetzten hyperzentrischen Objektiv ist der dann erfaßte Ausschnitt des Displays etwa 1 mm groß.

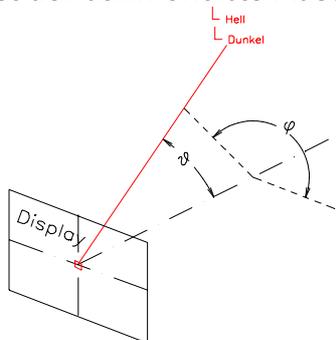


Abbildung 9: Winkelzuordnung

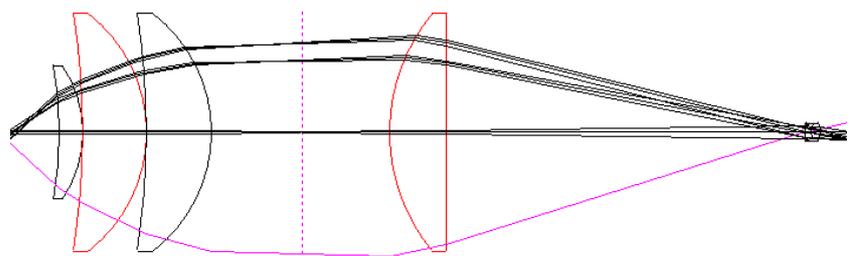


Abbildung 10: Strahlengang im Objektiv

<sup>3</sup> Die Messwerte wurden über örtliche Mittelwerte an den fünf Messpositionen ermittelt.

Die Ermittlung der Kontraste an Displays erfolgt dann durch Verrechnung von zwei Aufnahmen (Display hell bzw. dunkel), die mit solch einem Objektiv aufgenommen wurden.

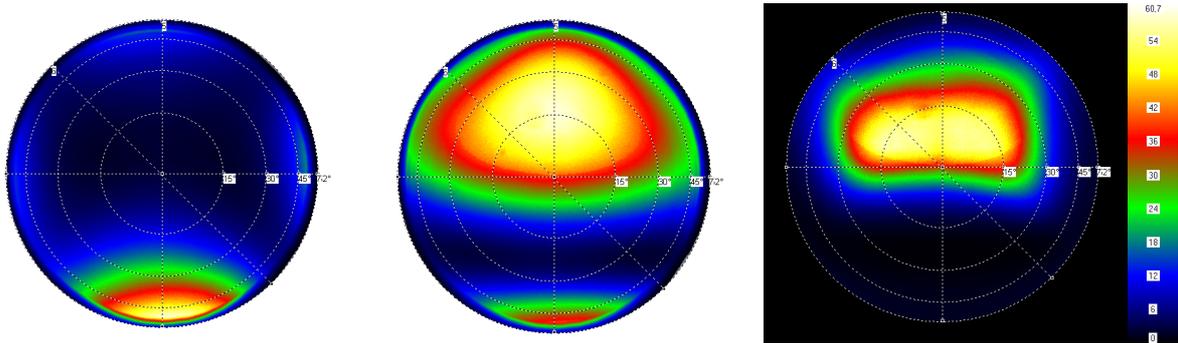


Abbildung 11: Erfassung des winkelabhängigen Kontrasts  
(v.l.n.r: Dunkelaufnahme, Hellaufnahme, Kontrast)

Wird das hyperzentrische Objektiv an der Farbkamera verwendet, so kann mit einer Bildaufnahme der Farbort des Displays bei unterschiedlichen Betrachtungswinkeln ermittelt werden.

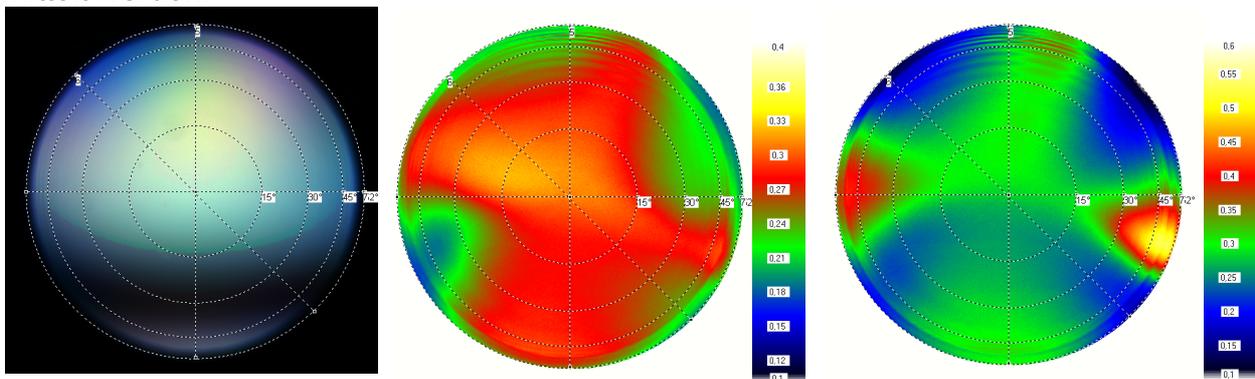


Abbildung 12: Winkelabhängiger Farbort  
(v.l.n.r: Hellaufnahme, Farbauszug der x- bzw. y-Komponente des Farbortes im Farbraum Lxy)

## 4.2 Lampenbewertung

Die Ausstrahlcharakteristik von Lampen und Leuchten kann z.B. mit Hilfe einer Bündelmessung indirekt bestimmt werden. Für eine Bündelmessung strahlt man mit der Lampe/Leuchte auf eine homogene Wand. Die Kamera wird seitlich der Lichtquelle positioniert und bewertet primär die Leuchtdichteverteilung auf dieser Wand.

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt in mehreren Schritten die an die jeweilige Applikation angepasst werden können:

1. Entzerrung des Bündelbildes mit Hilfe einer projektiven Entzerrung. Es entsteht ein Bild, das einer Kameraposition in der Lichtquelle entspricht, d.h. die Verzerrungen, die durch die schräge Ansicht der Wand entstehen, werden eliminiert. Für die Bestimmung der Umrechnungsparameter werden Marken an der Wand angebracht die jeweils einem bestimmten Ausstrahlwinkel der Lichtquelle entsprechen.
2. Das entzerrte Bild wird in ein Winkelbild umgerechnet. Dazu wird eine entsprechend parametrisierte Koordinatentransformation auf das entzerrte Bild angewendet, die dafür sorgt, dass die Pixel äquidistant in Theta und Phi-Winkel dargestellt werden können.

3. In diesem Bild können dann die Halbwertswinkel bestimmt werden bzw. andere Auswertungen erfolgen.

Die folgenden Beispiele stellen die Verhältnisse bei einer Bündelmessung für einen Halogenstrahler dar. Alle Darstellungen sind logarithmisch skaliert, wobei ein Dynamikumfang von 3 Dekaden auf den Anzeigebereich abgebildet wurde.

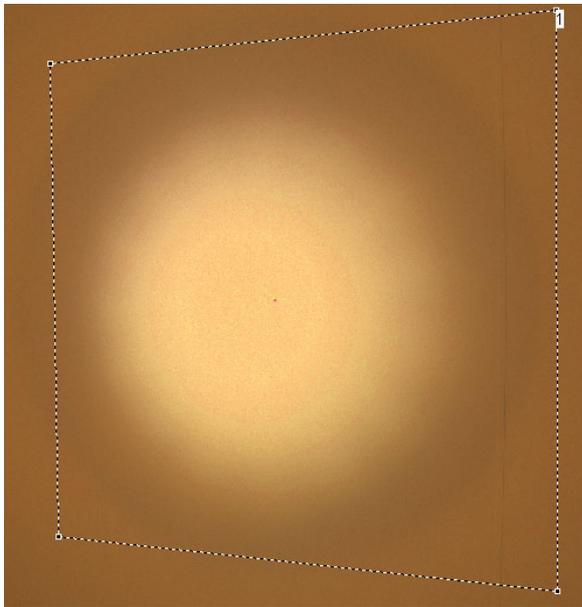


Abbildung 13: Farbbild eines Bündels

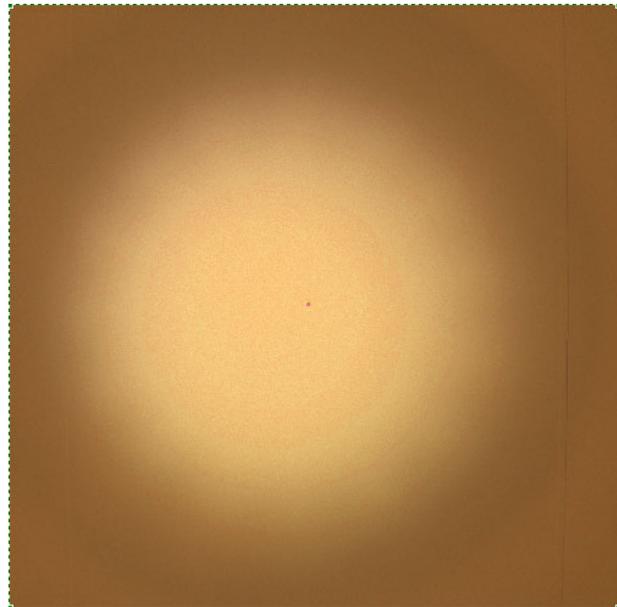


Abbildung 14: Farbbündel nach projektiver Entzerrung

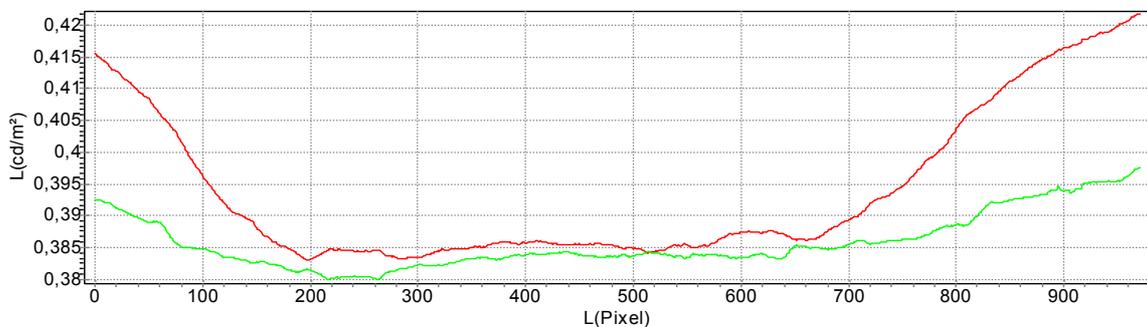


Abbildung 15: Darstellung der Farbkoordinaten (x Rot und y Grün) für einen Schnitt durch das Maximum der Bündelmessung

## 5 Zusammenfassung

Mit den dargestellten Messwerten und Anwendungen konnte gezeigt werden, dass die ortsauflöste Farbmessung einsetzbar ist und ein großes Anwendungspotential besitzt.

Literatur:

- [1] Krüger, U.; Schmidt, F.: Ortsauflöste Farbmessung – Aspekte eines Filtrerraddesigns. 8. Farbworkshop, 10.-11.10.2002, Ilmenau, S.37-44, 2002
- [2] TechnoTeam: Bildauflösende Leuchtdichtemessung mit Leuchtdichtemesskameras LMK96/98 (Videoanalysatoren). [http://www.technoteam.de/pdf/LMK\\_Erlaeuterung.pdf](http://www.technoteam.de/pdf/LMK_Erlaeuterung.pdf)