

# Farbmetrische Bewertung von Mosaikfiltermatrizen für Einchip-CCD-Sensoren

## 1 Einleitung

Die einfache, schnelle und preiswerte Erfassung orts aufgelöster und farbmetrisch gut angepaßter Bilddaten spielt in vielen Bereichen von Industrie und Wissenschaft eine zunehmende Rolle. Die Autoren sind den Ideen aus dem Vortrag /SCHL95/ beim 40.IWK nachgegangen und haben die Möglichkeiten für den Einsatz von Einchip-Farbmatrizen mit Komplementär-Mosaikfilterstruktur (im folgenden als 1Chip-Matrizen bezeichnet) untersucht.

Im folgenden werden nach einer kurzen Erläuterung der Grundlagen (Matrizen und Farbmetrik) die Methoden bei der Anpassung der Farbvalenzen an die RGB-Primärvalenzen erläutert.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Matrizen

1Chip-Matrizen werden in ihrem Haupteinsatzgebiet der Camcordertechnik im Field-Mode betrieben. Damit ist es möglich, für TV kompatible Anwendungen die ersten Operationen zur Erzeugung eines YUV-Signals schon auf der Matrix auszuführen. Durch die Verwendung des Frame-Modes kann demgegenüber direkt Einfluß auf die Berechnung der Farbwerte genommen werden, da keine On-Chip Verknüpfungen stattfinden und die Primärdaten unverändert für jeden Bildpunkt zur Verfügung stehen. Das Ziel der Untersuchungen bestand darin, durch geeignete Transformationen den Primärfarbraum (Mg, Cy, Ye, Gr) in einen DIN 5033 entsprechenden Farbraum zu transformieren. Die Untersuchungen wurden mit einer 10bit Digitalkamera der Fa. Kappa, die mit einer CCD-Matrix vom Typ ICX039BNA /SONY95/ bestückt war, durch-

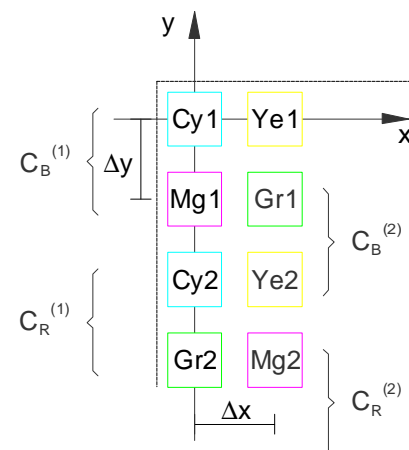


Abb. 1: Makrozelle einer Mosaikfiltermatrix

Durch die komplizierte Filterstruktur auf der Matrix wird zur Rekonstruktion der Primärvalenzen bzw. zur Beschreibung der Primärdatengewinnung ein Modell benötigt, mit dessen Hilfe die Eigenschaften der abgetasteten Bilddaten beschrieben werden können.

Der Ausgangspunkt ist eine Bildfunktion  $f(x, y)$ , die die aufzunehmende Szene repräsentiert und aus dieser durch optische Abbildung (Maßstab, MTF, ...), Fensterung durch endliche Ausdehnung der Matrix und die Bewertung mit der Pixelapertur hervorgegangen ist.

Die Abgetastete  $f_a(x, y)$  der Bildfunktion  $f(x, y)$  kann mit Hilfe folgender Operation allgemein beschrieben werden /KRÜG94/:

$$f_a(x, y) = A_2 \{ A_1 \{ f(x, y) \} * f_h(x, y) \} \quad (1)$$

Die Bildfunktion  $f(x, y)$  wird mit Hilfe des Abtastgitters  $A_1$  abgetastet. Diese erste Abtastung beschreibt die Anordnung der Filterstruktur auf der Matrix. Das Ergebnis dieser Abtastung wird mit einer Interpolationsfunktion  $f_h(x, y)$  gefaltet. Die Interpolation bewirkt die Bereitstellung der Farbwerte an den Stellen, an denen der entsprechende Farbwert im Abtastgitter  $A_1$  nicht abgetastet wurde, aber für die Berechnung des Ausgangssignals benötigt wird. Mit Hilfe des

zweiten Abtastgitters  $A_2$  wird jedem Pixel der Ausgangsmatrix ein Farbwert (in jeder Farbebene) zugeordnet. Wird die Matrix wie oben beschrieben im Frame-Mode betrieben, so kann sowohl das Abtastgitter  $A_2$  als auch die Interpolationsfunktion  $f_h(x, y)$  anwendungsspezifisch optimiert werden.

## 2.2 Farbmotrik

Nach dem ersten Graßmannschen Gesetz kann eine Farbvalenz mit drei voneinander unabhängigen, ansonsten aber beliebig wählbaren Farbgrößen beschrieben werden. Dabei kann ein und dieselbe Farbwahrnehmung aus unendlich vielen Kombinationen von Spektralverteilungen erzeugt werden [u.a. FRAN95]. Die Farbvalenz selber kennzeichnet die Wirkung eines Farbreizes auf das Auge. Ein Farbreiz ist die Farbempfindung, die eine Strahlungsverteilung zwischen 380 nm und 780 nm beim Menschen hervorruft. Für das Farbsehen des Menschen sind die drei Zapfenarten des Auges  $p(\lambda)$ ,  $d(\lambda)$ ,  $t(\lambda)$  verantwortlich.

Das Zustandekommen der Farbempfindung wurde von H. v. Helmholtz unter Benutzung der von Th. Youngs aufgestellten Hypothese als Dreikomponenten-Theorie des Farbsehens zuerst exakt formuliert [RICH81].

$$\mathbf{F} = \mathbf{P}\mathbf{P} + \mathbf{D}\mathbf{D} + \mathbf{T}\mathbf{T} \quad (2)$$

mit

$$P = k \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} j_{\mathbf{P}} \bar{p}(I) dI, \quad D = k \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} j_{\mathbf{D}} \bar{d}(I) dI, \quad T = k \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} j_{\mathbf{T}} \bar{t}(I) dI$$

wobei  $\mathbf{P}, \mathbf{D}, \mathbf{T}$  die Erregungskomponenten,  $P, D, T$  die Erregungsstärken,  $\phi_\lambda$  der Farbreiz,  $k$  ein Proportionalitätsfaktor und  $\mathbf{F}$  die Farbvalenz sind. Die Größen  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$  stellen die Grenzwellenlängen des menschlichen Sehvermögens dar. Aufbauend auf diesen Zusammenhängen wurden verschiedene Farbräume definiert (u.a. RGB, XYZ, Lab, HSI).

Die Normfarbvalenzen des XYZ Systems wurden 1931 von der CIE für den "Normalbeobachter" festgelegt. Sie sind in der DIN 5033 (Teil 2) in Abhängigkeit von der Wellenlänge festgelegt und dienen als Grundlage für farbmotrische Berechnungen und Messungen. Die RGB-Werte lassen sich direkt über eine lineare Transformationsmatrix aus den XYZ-Werten berechnen und sind somit ebenfalls durch diesen Standard bestimmt.

Die Primärdaten der 1Chip-Matrix liegen in einem vierdimensionalen Farbraum (Cy, Ye, Mg, Gr) vor. Wenn eine Angabe in einem Standardfarbraum erforderlich ist, müssen die Farbvalenzen in diesen Farbraum transformiert werden.

Die Farbmessung dient der zahlenmäßigen Bestimmung einer Farbvalenz mit drei voneinander unabhängigen Maßzahlen. Diese Farbmaßzahlen beziehen sich auf den farbmotrischen Normalbeobachter. Die drei möglichen Verfahren der Farbmessung sind das Gleichheitsverfahren, das Spektralverfahren und das Dreibereichsverfahren. Bei der Verwendung einer CCD-Matrix zur Farbmessung wird das Dreibereichsverfahren (Mehrbereichsverfahren) angewendet.

Beim Dreibereichsverfahren werden die drei Farbwerte (R, G, B) unmittelbar durch die photometrische Messung ermittelt. Deshalb müssen die Filter und die spektrale Empfindlichkeit des Strahlungsempfängers an die spektrale Bewertungsfunktion, also die  $\bar{r}(I), \bar{g}(I), \bar{b}(I)$  -Werte, angepaßt sein. Das heißt, sie müssen den "Luther-Bedingungen" genügen:

$$t_G(I) = \frac{c_G \bar{g}(I)}{S_E}, \quad t_R(I) = \frac{c_R \bar{r}(I)}{S_E}, \quad t_B(I) = \frac{c_B \bar{b}(I)}{S_E} \quad (3)$$

Hierbei sind  $\tau_x$  der Transmissionsgrad des Filters,  $c_R, c_G$  und  $c_B$  die Gerätekonstanten und  $S_E$  die spektrale Empfindlichkeit des Empfängers ohne Filter.

Bei CCD-Matrizen mit Mosaikfilterstruktur oder bei anderen nicht direkt angepaßten Sensoren sind die Filterwerte vorgegeben, d.h., man muß mittels einer Transformationsvorschrift diese in

die einzelnen Bewertungsfunktionen umrechnen bzw. diese Transformation annähern. Um ein approximierten Transformationsvorschrift zu bekommen, wurde der Betrag des integralen Fehlers über dem normierten Wellenlängenbereich verwendet. Durch die Eigenschaften des CCD-Sensors erhält man Ausgangswerte, die über die Zeit und den gesamten Wellenlängenbereich integriert werden. Es interessiert deshalb, wie stark diese erzielten Ausgangswerte  $F(\lambda)$  von den geforderten standardisierten Farbkurven  $N(\lambda)$  abweichen. Die Berechnung dieses Fehlers (auch f1-Fehler genannt) bezieht sich auf die in der DIN 5032 Teil 6 dargestellte allgemeine Kennzeichnung der Güte des  $v(\lambda)$ -Angleiches. Der Fehler IF ist dabei der Vektor der integralen Fehler für Rot, Grün und Blau und wird in Prozent angegeben.

$$\mathbf{IF} = \frac{\int_{I_{\min}}^{I_{\max}} |\mathbf{N}(I) - \mathbf{F}(I)| dI}{\int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \mathbf{F}(I) dI} \cdot 100\% \quad (4)$$

Die Berechnungsvorschrift für den Vektor  $\mathbf{F}(I)$  lautet:

$$\mathbf{F}(I) = \begin{bmatrix} \overline{r}(I) \\ \overline{g}(I) \\ \overline{b}(I) \end{bmatrix} = \mathbf{M}_T \cdot \begin{bmatrix} \overline{cy}(I) \\ \overline{mg}(I) \\ \overline{gn}(I) \\ \overline{ye}(I) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\overline{cy}, \overline{mg}, \overline{gn}, \overline{ye}$  kennzeichnen die auf der gegebenen CCD-Matrix befindlichen Filterempfindlichkeiten.  $\mathbf{M}_T$  stellt die Transformationsmatrix oder allgemeiner die Transformationsvorschrift dar.

### 3 Spektrale Vermessung

Die Transformation eines Primärfarbraumes, der durch die Sensoren gegeben ist, in einen Zielfarbraum wird in der Regel über Testfarbensätze mit Hilfe einer an den Zielfarbraum angepaßten Fehlerbedingung optimiert /KEMP92, LENZ97/. Unsere Zielstellung bestand nun darin, auf der Basis physikalischer Meßdaten (rel. spektrale Empfindlichkeiten der Pixelklassen, Definitionen der Normfarbwerte) die Transformationen unter entsprechenden Randbedingungen und Fehlerkriterien zu optimieren.

Die Basis dafür waren genaue Vermessungen der relativen spektralen Empfindlichkeiten der Filterelemente. Dazu werden die, der zu untersuchenden Matrix über einen Monochromator angebotenen, spektralen Strahldichten (5nm Bandbreite) mit Hilfe einer HighDyn-Messung<sup>1</sup> für den Wellenlängenbereich 380 bis 780 nm in 10nm Schritten erfaßt und mit den Meßwerten einer Referenzdiode normiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt und

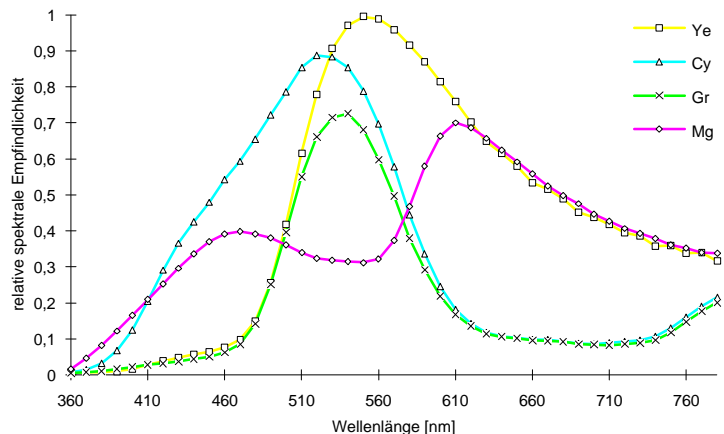


Abb. 2: Relative spektrale Empfindlichkeiten der einzelnen Pixelklassen einer Einchip-Komplementär-Mosaikfiltermatrix (ICX039BNA)

<sup>1</sup> Bei einer HighDyn-Messung wird die Szene mehrfach und mit verschiedenen Integrationszeiten aufgenommen. Die Analyse dieser Bilder gestattet in Verbindung mit einer aufwendigen DSNU- und PRNU-Korrektur die Angabe der Meßwerte mit hoher Auflösung in einem Meßbereich mit sehr hohem Dynamikumumfang.

decken sich nicht ganz mit den Werten aus den Sony-Datenblättern /SONY95/. Weiterhin konnte festgestellt werden, daß sich die Empfindlichkeiten Gr1, Gr2 und Mg1, Mg2 (siehe Abb. 1) in der Makrozelle geringfügig voneinander unterscheiden.

Vor unseren Messungen ist Herrn Heinzmann (Uni Heidelberg) bei der Anwendung der oben genannten Kamera aufgefallen, daß bei Variation der Integrationszeit bei schmalbandigen Spektraldichten Nichtlinearitäten in der Ausgangskennlinie (Grauwert = f(Integrationszeit)) auftreten. Wir haben bei unseren Messungen dieses Problem genauer untersucht und haben zwei Typen von Kennlinien erfassen können.

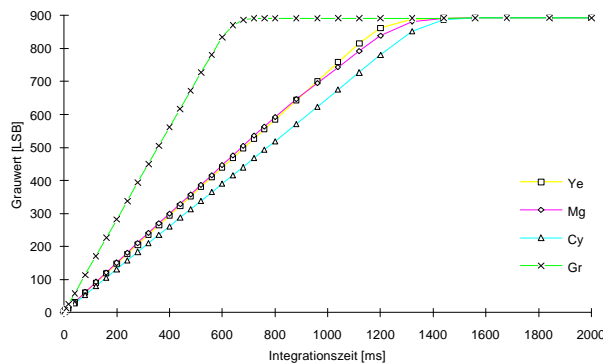


Abb. 3: Integrationszeitverlauf Typ I ( $\lambda = 500 \text{ nm}$ )

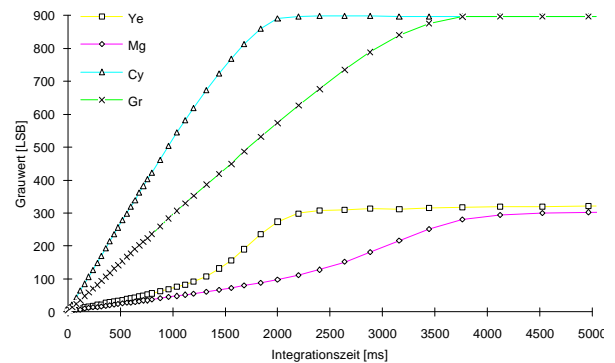


Abb. 4: Integrationszeitverlauf Typ II ( $\lambda = 390 \text{ nm}$ )

Diese Effekte resultieren aus den stellenweise sehr großen Empfindlichkeitsunterschieden horizontal benachbarter Sensorelemente (Cy, Ye - Mg, Gr). Verursacht werden die Nichtlinearitäten wahrscheinlich durch die korrelierte Doppelabtastung (CDS) des Matrixausgangssignals. Der vor der CDS-Stufe befindliche Tiefpaß wirkt sich bei starken Signalunterschieden, und den daraus resultierenden hohen horizontalen Ortsfrequenzen, wie ein Hochpaß aus /SCHM97/.

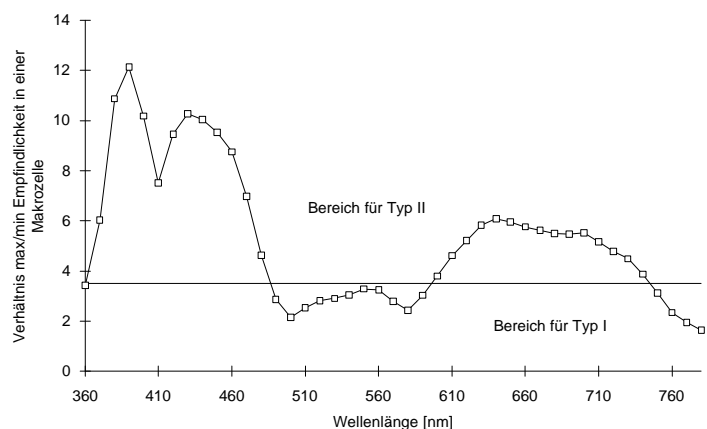


Abb. 5: Auftreten der verschiedenen Typen der Integrationszeitverläufe bei schmalbandiger spektraler Strahldichte

Diese Effekte können entweder algorithmisch korrigiert werden oder müssen durch geeignete schaltungstechnische Maßnahmen verhindert werden.

## 4 Ermittlung der Transformationsbeziehungen

Ausgehend von der exakten Vermessung der relativen spektralen Empfindlichkeit der einzelnen Sensorelemente wurde mit Hilfe verschiedener Fehlerkriterien die Transformationsbeziehung optimiert.

### 4.1 Lineare Transformation

Für die lineare Transformation des Primärfarbraumes in den RGB-Farbraum kann Gleichung ( 6 ) angegeben werden.

$$\mathbf{F}'_{\text{RGB}} = \mathbf{M}_T \cdot \mathbf{F}_{\text{CMGY}} \quad (6)$$

Dabei ist  $\mathbf{F}'_{\text{RGB}}$  der mit der Transformationsmatrix berechnete wellenlängenabhängige RGB-Farbvektor und  $\mathbf{F}'_{\text{CMGY}}$  der wellenlängenabhängige Komplementärfarbenvektor. Die Transformationsmatrix  $\mathbf{M}_T$  stellt eine 3x4 Matrix dar.

Für Gleichung (6) muß eine optimale Transformationsmatrix gefunden werden, bei der die Differenz zwischen  $\mathbf{F}'_{\text{RGB}}$  und dem standardisierten RGB-Farbvektor  $\mathbf{F}_{\text{RGB}}$  minimiert wird. Diese Aufgabe führt zur Anwendung der Ausgleichsrechnung von  $i$  voneinander unabhängigen Werten der jeweiligen Filterkurve des  $\mathbf{F}'_{\text{RGB}}$ -Vektors und von  $i$  unabhängigen Werten der jeweiligen Standardfarbe des  $\mathbf{F}_{\text{RGB}}$ -Vektors, mit dem Ziel der Bestimmung aller Matrixkoeffizienten. Eine Möglichkeit ist die Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Ein Fehlerkriterium kann in diesem Fall folgendermaßen beschrieben werden:

$$\mathbf{QF}(R, G, B) = \sum_{I_i} \left( \mathbf{F}_{\text{RGB}}(I_i) - \mathbf{M}_T \cdot \mathbf{F}_{\text{CMGY}}(I_i) \right)^2 \quad (7)$$

Diese Gleichung stellt die Grundlage für alle nachfolgenden Optimierungsaufgaben dar und muß minimiert werden. Dazu wird sie nach den einzelnen Koeffizienten abgeleitet, die Ableitung gleich Null gesetzt und nach den abgeleiteten Koeffizienten aufgelöst.

Als Ergebnis dieser Aufgabenstellung erhält man die folgende Transformationsmatrix:

$$\mathbf{M}_T := \begin{pmatrix} 0.826 & -0.987 & -2.268 & 1.379 \\ 0.138 & -0.155 & -0.0028 & 0.145 \\ 0.573 & -0.148 & -0.883 & 0.197 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Für das Fehlerkriterium nach Gleichung (4) ergeben sich Werte von 49%, 6% und 72% (für Rot, Grün, Blau). Diese Werte reichen für farbmtrische Messungen nicht aus. Daher wurde nach anderen Ansätzen gesucht. Neben verschiedenen Wichtungsfunktionen für die Fehlerfunktion wurde auch ein Polynomansatz höherer Ordnung als Transformationsvorschrift untersucht.

Die Wichtungsfunktionen führten zu keiner signifikanten Verbesserung der integralen Fehler für allgemeine Anwendungsfälle und werden daher nur für bestimmte Einsatzfälle von Vorteil sein.

Der untersuchte Ansatz mit einem Polynom 3. Ordnung reduzierte zwar die integralen Fehler erheblich (6%, 1.5%, 19%), kann jedoch nur unter sehr eingeschränkten Randbedingungen eingesetzt werden.

## 4.2 Filtervorsatz

Die unbefriedigenden Ergebnisse der vorgestellten Optimierungen erforderten einen neuen Ansatz. Durch die Verwendung eines Vorsatzfilters kann man auf die Empfindlichkeitsverläufe der vier Sensortypen (Cy, Mg, Gn, Ye) so einwirken, daß sie eine bessere Approximation an die RGB-Kurven realisieren. Mit dieser Anordnung muß Gleichung (6) wie folgt verändert werden:

$$\mathbf{F}'_{\text{RGB}} = G(I) \cdot \mathbf{M}_T \cdot \mathbf{F}_{\text{CMGY}} \quad (9)$$

Das Optimalitätskriterium nach Gleichung (7) führt dann zu folgender Gleichung:

$$\mathbf{QF}(R, G, B) = \sum_{I_i} \left( \mathbf{F}_{\text{RGB}}(I_i) - G(I_i) \cdot \mathbf{M}_T \cdot \mathbf{F}_{\text{CMGY}}(I_i) \right)^2 \quad (10)$$

Die Optimierung der Parameter (Filterkurve und Matrixkoeffizienten) kann mit geeigneten Startwerten iterativ erfolgen. Das Ergebnis dieser Optimierung ist in der nebenstehenden Grafik dargestellt. Die mit einem derartigen Filter theoretisch erreichbaren integralen Fehler sind vergleichsweise recht klein (3.5%, 9%, 4.5%) reichen jedoch nicht an die Werte von derzeit verwendeten Einzelsensoren heran. Die Berechnung und Herstellung eines derartigen Filters erscheint problematisch und erzeugt wahrscheinlich noch weitere Fehler, da die optimierte Transmissionskurve nur angenähert werden kann.

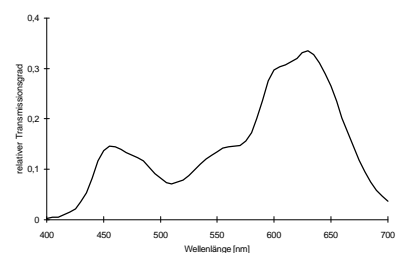


Abb. 6: Transmissionsgrad eines Vorsatzfilters

## 5 Zusammenfassung

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, daß bei der **Farbmessung** mit 1Chip-Matrizen mit relativ großen Fehlern zu rechnen ist, wenn die Farbwerte im RGB-Farbraum benötigt werden. Zu beachten ist bei diesen Anwendungen insbesondere, daß die Transformationsmatrizen negative Koeffizienten enthalten, die das im Bild befindliche Rauschen verstärken. Weiterhin kommt noch hinzu, daß im Bild auftretende hohe Ortsfrequenzen sich sehr störend auf Farbkanten auswirken können /KRÜG94/.

Diese Probleme erfordern daher einen hohen Aufwand bei der Bilderfassung. Die Einflüsse der zeitlichen und örtlichen Rauschkomponenten (PRNU, DSNU, ...) müssen weitgehend reduziert werden und die maximalen Ortsfrequenzen für die farbmessend zu vermessenden Bereiche sollten stark eingeschränkt werden.

Für die Farbdarstellung sind die hier vorgeschlagenen Verfahren nicht optimal geeignet, da hier der Zielfarbraum (bzw. zumindest das Optimierungskriterium) im Lab-Farbraum liegen muß. Dieser Farbraum ist nichtlinear bezüglich der Eingangsdaten und erfordert daher einen noch größeren Aufwand bei der Optimierung der Transformationsvorschriften. Hierbei ist auch vorstellbar, den Farbraum in bestimmte Bereiche aufzuteilen, in denen separate Transformationen durchgeführt werden.

HighDyn-Messung und unter Beachtung der im Abschnitt 3 erläuterten Effekte sehr gut für die **Farbklassifikation** im vierdimensionalen Primärfarbraum (Mg, Cy, Ye, Gr) eingesetzt werden. Hier kann durch angepaßte Interpolationsfunktionen eine sehr hohe Ortsauflösung erzielt werden. Durch die gute spektrale Überlappung der Sensorempfindlichkeiten erhält man in jedem Wellenlängenbereich mindestens von zwei der vier Sensorelemente Ergebnisse mit guten Signal/Rauschabständen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil RGB-Sensoren, die auch in Mosaikfilterstruktur hergestellt werden.

Die Autoren bedanken sich bei den Mitarbeitern des Lichttechnischen Institutes der TU Ilmenau für die Unterstützung bei der Vermessung der rel. spektralen Empfindlichkeit der Kamera.

### Literaturquellen:

- /FRAN95/ Franke, K.-H.: Vorlesungsskript: Grundlagen der Farbbildverarbeitung  
/KEMP92/ Kempe, H.: Entwicklung von Verfahren und Softwaremodulen zur Kalibrierung von Farbaufnahmesystemen unter Berücksichtigung der Beleuchtungsbedingungen, Diplomarbeit, TU Ilmenau, 1992  
systemtheoretische Untersuchungen von Farbaufnahmesystemen mit CCD-Sensoren, TU Ilmenau, Fakultät Elektrotechnik, Belegarbeit, 1994  
/LENZ97/ Lenz: Farbmessung für CCD-Kameras. Vortrag, Framos CCD-Forum, München, 1997  
/MORG97/ Morgeneier, D.: Untersuchungen zur Erhöhung der Farbaufklärung von Ein-Chip-CCD-Farbkameras, Belegarbeit, TU Ilmenau, 1997  
/RICH81/ Richter, M.: Einführung in die Farbmessung, Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 1981, 2. Auflage  
/SCHL95/ Schlichting, B.: Ein neues Konzept der Primärdatengewinnung bei Single-Chip-CCD-Farbkameras. 40. Internationales wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, Band 1, S. 557-562, 1995  
/SCHM97/ Schmidt, U.: Einige ausgewählte Möglichkeiten zur Bewertung von CCD-Systemen. Vortrag, Framos CCD-Forum, München, 1997  
/SONY95/ SONY: Datenblatt von SONY CCD-Bildsensor für PAL-Farbkameras, TYP ICX039BNA, 1995  
/STEV95/ Stefanow, E.:  $V(\lambda)$ -Anpassung eines bildauflösenden Lichtempfängers, Dissertation TU Ilmenau 1995

### Autoren:

Schmidt, Franz, PD Dr.-Ing. habil.	Schlichting, Bernd, Dr.-Ing.	Krüger, Udo, Dipl.-Ing.
Morgeneier, Dirk	KAPPA messtechnik GmbH	TechnoTeam Bildverarbeitung
Technische Universität Ilmenau	Kleines Feld 6	GmbH
Fak. E/I, ATE	37130 Gleichen	Ehrenbergstraße 11
Am Ehrenberg, PF 327	Tel: 05508/ 974-0	98693 Ilmenau
98684 Ilmenau	Fax: 05508/ 974-100	Tel.: 03677/ 668480
Tel.: 03677/692607		Fax.: 03677/ 668472
Fax.: 03677/691152		