

Eigenschaften von digitalen 1Chip-CCD-Kameras bei der Anwendung zur Farbbeurteilung und Farbdarstellung

F. Schmidt, U. Krüger
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
Ehrenbergstraße 11
D-98693 Ilmenau
e-Mail: franz.schmidt@technoteam.de, udo.krueger@technoteam.de
URL: <http://www.technoteam.de>

1 Einleitung

Der Einsatz digitaler CCD-Kameras erlangt in Industrie und Forschung eine immer größere Bedeutung. Diese Systeme dringen dabei gleichermaßen in photogrammetrische und radiometrische Einsatzgebiete vor.

Die bildaufgelöste Messung von Leuchtdichtedaten mit Hilfe angepasster digitaler CCD-Kameras ist inzwischen zum Stand der Technik geworden und wird in vielen Bereichen eingesetzt /SCHM98/,/FISC98/. Die ortsauflöste Messung der Farbe (bzw. genauer der Farbvalenzen) von Körperfarben und selbstleuchtenden Objekten ist daher eine weitere Herausforderung für den Einsatz der CCD-Technik in der Lichtmeßtechnik.

2 Farbe als Informationsträger

2.1 Entstehung der Farbinformationen

Die Information in einer Szene kann neben der örtlichen Verteilung der Strahlungsleistung $L_e(x, y)$ auch in deren spektraler Verteilung $L_{e\lambda}(x, y, \lambda)$ enthalten sein. Typische Beispiele findet man im mehrkanaligen Sehen biologischer Sehsysteme (z.B. 3-kanaliges Farbsehen des Menschen) oder bei der Fernerkundung (z.B. 6 Kanäle im Visuellen und nahen Infrarot, im Infraroten oder im Mikrowellenbereich).

Die Aufgaben der spektral abhängigen Informationserfassung können in zwei wesentliche Klassen eingeteilt werden:

- Farbinformationen erfassen, die dem menschlichen Sehsystem adäquat sind oder dem menschlichen Sehsystem adäquat wieder dargestellt werden sollen (Farbfernsehen, Reproduktionen (Drucktechnik), Farbmessungen z.B. für die Farbenindustrie)

Der Begriff Farbe ist nur in Zusammenhang mit dem menschlichen Normalbetrachter definiert! \Rightarrow DIN5033 Teil 1-9, /RICH81/

- Informationen erfassen, die Objekteigenschaften repräsentieren, die in der spektralen Verteilung $L_{e\lambda}(x, y, \lambda)$ enthalten sind.

Die Farbmétrie, die Lehre von den Maßbeziehungen der Farben untereinander /RICH81/, als ein Teilgebiet der Farbenlehre setzt im wesentlichen auf der physikalischen Analyse der spektralen Strahlungsverteilung auf und soll im folgenden im Vordergrund stehen. Die komplizierten Verknüpfungen, die zu den verarbeiteten Sinneseindrücken führen, und für Farbempfindungen verantwortlich sind (Farbumstimmung), werden dabei nicht betrachtet.

2.2 Erfassung eines Farbwertes

Für die Erfassung der Farbvalenzen, d.h. der Messung von Farbe, kann man zwei grundlegende Verfahren unterscheiden:

- Dreibereichsverfahren

Die relativen spektralen Empfindlichkeiten der Sensoren $s_i(\lambda)$ müssen eine Linearkombination der Augenempfindlichkeiten (Abb. 3) realisieren. /LUTH27/

- Mehrbereichsverfahren
Der sichtbare Spektralbereich (ca. 380 bis 780 nm) wird mit mehr als drei linear unabhängigen Bewertungsfunktionen $s_i(\lambda)$ erfaßt.

Die Trennung der einzelnen Spektralbereiche kann optisch, örtlich, zeitlich oder in einer Kombination aus den drei genannten Verfahren erfolgen.

Optische Signaltrennung	Örtliche Signaltrennung	Zeitliche Trennung
Das Spektrum wird durch optische Maßnahmen so aufgeteilt, daß verschiedene Empfänger das Signal gleichzeitig erfassen können. <ul style="list-style-type: none"> - Strahlteilerwürfel mit dichroitischen Spiegelflächen (Abb. 5) - Prisma - Gitter 	Verschieden angepaßte Empfänger werden nebeneinander angeordnet, so daß die Signalerfassung nur angenähert an einem Ort stattfindet. <ul style="list-style-type: none"> - 1Chip CCD-Matrizen (Abb. 6) - Dreibereichssensoren - Applikationsspezifische Sensoren /MAZeT/ 	Die Erfassung der Daten für die einzelnen Sensoren erfolgt zeitlich nacheinander. <ul style="list-style-type: none"> - Filterrad (Abb. 7) - LC verstimmbare Filter /CRI99/ - Elektrisch veränderbare Sensorempfindlichkeiten /RIEV97/ - Bewegte Gitter, Prismen, Spiegel

Eine interessante Version für die Kopplung von örtlicher und zeitlicher Signaltrennung stellt ein von Dr. Lenz vorgestelltes Verfahren dar, das ein Einschnitt-Mikroscanning mit einer 1Chip-CCD Matrix vorsieht, um die örtliche Auflösung zu erhöhen und dabei auch bei bewegten Szenen noch scharfe Bilder erzielt /LENZ97/.

3 Digitale CCD-Kameras

Die bisher hauptsächlich eingesetzte Kameraschnittstelle zu Auswertesystemen ist das analoge Videosignal in Fernsehnorm, das für die Anwendungen der Bildverarbeitung im Auswertesystem digitalisiert wird. Die Entwicklung tendiert aber zum Einsatz digitaler Kameras, bei denen das Signal direkt in der Kamera digitalisiert wird. Mit dieser Technik kann eine Qualitätsverbesserung des Bildes erzielt werden, womit weitere Anwendungsgebiete erschlossen werden können, die eine erhöhte Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Bilddaten erfordern.

Im Zusammenhang mit der optischen Abbildung durch das Objektiv und bekannten Randbedingungen (spektrale Anpassung der CCD-Matrix, spektrale Eigenschaften der Beleuchtung, Geometrie der Szene) können aus den Grauwerten dann andere lichttechnische oder farbmetrische Größen ermittelt werden.

Es sind im wesentlichen folgende Korrekturverfahren notwendig /SCHM98/:

- Shading des Objektivs und der Mikrolinsen auf der CCD-Matrix (Shadingkorrektur)
- Korrektur der geometrischen Verzeichnung des Objektivs und ggf. Umrechnung der Pixelkoordinaten in Winkelkoordinaten (Verzeichnungskorrektur)
- Ungleichförmigkeit der Pixelempfindlichkeit (PRNU-Korrektur)
- Ungleichförmigkeit des Dunkelsignals (DSNU-Korrektur)
- Temperaturabhängigkeit des Dunkelsignals (Referenzanbindung)
- Nichtlinearität der Auslese- und Verstärkerschaltungen (Linearitätskorrektur)
- Korrektur von Defektbildpunkten und deren Veränderung (Defektpixelkorrektur)

3.1 Signalerfassung mit 1Chip-CCD-Matrizen

Eine 1Chip CCD-Kamera erfaßt 3 oder 4 spektrale Bereiche. Kameras mit 3 Bereichen verwenden in der Regel RGB-Primärvalenzen zur Erfassung der Signale. Bei Kameras mit 4 Filtertypen werden Komplementärfarbfiler bevorzugt /SCHL95/, /SCHM97/. Diese Filter können auf der Matrix in sehr verschiedener Art und Weise angeordnet werden /KRÜG94/. Die Matrizen mit Komplementärfarbfiler sind so angelegt, daß sich daraus sehr einfach ein YCrCb-Signal berechnen läßt, das für die Generation eines TV kompatiblen Farbbildes

benötigt wird. Die RGB-Matrizen zielen eher auf die Signalverarbeitung und Darstellung auf einem Computermonitor. In den von uns verwendeten Matrizen vom Typ Sony ICX085AK /SONY/ ist die Anordnung nach Bayer realisiert (Abb. 4).

3.2 Realtive spektrale Empfindlichkeit von 1Chip-CCD Matrizen

Um eine applikationsbezogene Farbraumtransformation ermitteln zu können, ist es sinnvoll, die Daten im Originalzustand aus der Kamera auszulesen, d.h. ohne Matrizierung, Signalverbesserung und automatischen Weißabgleich. Die 1Chip-Farbkamera wird in der Signalerfassung so behandelt wie eine SW-Kamera. Die Aufnahmeverfahren von Mehrbild- / HighDyn-Messung (Rauschminderung, Erhöhung des Dynamikumfangs) und die Korrekturalgorithmen für Dunkelsignal, Shading und Nichtlinearität werden für alle Pixel analog den Verfahren bei photometrischen Messungen durchgeführt /SCHM99/. Man erhält durch diese Mechanismen sehr präzise Schätzungen für folgende Integrale:

$$g w_i = k \cdot \int f(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \tau_F(\lambda) \cdot x_i(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{mit } i = 0 \dots N_{\text{Kamera}} \quad (1)$$

Die Kamera liefert nach der Bildaufnahme und Korrektur die integralen Werte (korrigierte Grauwerte) $g w_i$. Mit N_{Kamera} wird die Anzahl der verwendeten Filter/Kanäle bezeichnet. Zur Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit $x_i(\lambda)$ der einzelnen Kanäle wird die Kamera (Messung ohne Objektiv und IR-Sperrfilter) mit Hilfe eines Monochromators im Vergleich mit einem Referenzelement spektral vermessen. Bei der Auswertung der Messungen treten Nichtlinearitäten der Farbkanäle untereinander auf (Abb. 12). Dieses Problem führt unter speziellen Randbedingungen zu Fehlern, so daß die erfaßten Farbvalenzen nicht richtig berechnet werden können.

4 Farbraumtransformationen

4.1 Grundlagen

Auf der Basis der Zapfenempfindlichkeiten und ggf. auch unter Einbeziehung der weiteren Verarbeitungsvorgänge im Gehirn kann man verschiedene Farbräume aufbauen, die im linearen Fall jeweils durch drei linear unabhängige Basisvektoren beschrieben werden können. Am Beispiel der Normfarbwerte X,Y,Z (CIE1931) soll die Berechnung der Farbvalenzen erläutert werden. Für den physikalischen Farbreiz $f(\lambda)$ und die Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ gelten folgende Beziehungen:

$$X = k \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda; \quad Y = k \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda; \quad Z = k \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

Je nach Anwendung können auch andere Farbräume interessant sein (RGB, HSI, L*a*b* etc.). Eine Farbraumtransformation ist eine Abbildung der Punkte eines Farbraumes in einen anderen. Für den Übergang zwischen einigen Farbräumen können einfache lineare Transformationen der Form:

$$\vec{t}_{Dst} = \mathbf{B} \cdot \vec{t}_{Src} \quad (3)$$

genutzt werden, wobei mit \vec{t}_{Dst} , \vec{t}_{Src} die Farbvalenzen im Ziel- bzw. Quellfarbraum und mit \mathbf{B} die Transformationsmatrix bezeichnet werden. Diese Operation nennt man Matrizierung. Im allgemeinen sind diese Transformationen nichtlinear und auch nur für bestimmte Randbedingungen gültig.

In der letzten Zeit hat sich für die Arbeit am Computer ein Farbmanagementsystem auf Basis von ICC-Profilen /ICC97/ etabliert, bei dem die Daten einzelner Eingabegeräte mit Hilfe einer Umrechnungsvorschrift in einen geräteunabhängigen Farbraum (CIELAB) umgerechnet werden. Die Ausgabegeräte werden durch gleichartige Profile in die Lage versetzt, die Daten dieses geräteunabhängigen Farbraums in den Grenzen ihrer Möglichkei-

ten wieder darzustellen. Eine Zielstellung für die Beschreibung der Kameraeigenschaften ist die Erstellung derartiger Profile und die Nutzung von kameraspezifischen Farbraumtransformationen.

Für weitergehende Ausführungen sind z.B. die Standardwerke /LUTH27/, /RICH81/ oder /WYSZ82/ zu empfehlen.

4.2 Berechnung der Transformationsvorschriften

Aus der Kenntnis der relativen spektralen Empfindlichkeiten der einzelnen Sensorelemente und der Aufnahme- bzw. Wiedergaberandbedingungen kann man erstens Profile erstellen und zweitens versuchen, eine möglichst gut angepaßte Transformationsmatrix \mathbf{B} für Gleichung (3) zu finden. Werden die relativen spektralen Daten der CCD-Matrix und die Beleuchtung als Vektoren bzw. Matrizen aufgefaßt, kann man die Berechnung der Farbvalenzen relativ einfach formulieren /SHAR96/. Die Erfassung der Farbvalenzen von N Proben ($\vec{s} \dots N_\lambda \times N$ Matrix der spektralen Reflektanzen der Proben) mit der Kamera kann über die Gleichung

$$\vec{t}_{Src} = (\mathbf{L}_{Src} \cdot \mathbf{A}_{Src})^T \cdot \vec{s} \quad (4)$$

beschrieben werden. Die Farbvalenzen im Zielfarbraum für die gleichen Proben erhält man mit

$$\vec{t}_{Dst} = (\mathbf{L}_{Dst} \cdot \mathbf{A}_{Dst})^T \cdot \vec{s} \quad (5)$$

Mit \mathbf{L}_{Src} , \mathbf{L}_{Dst} wird über eine $N_\lambda \times N_\lambda$ Diagonalmatrix die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung beschrieben. \mathbf{A}_{Src} beschreibt über eine $N_\lambda \times K_{Src}$ Matrix die relative spektrale Empfindlichkeit der K_{Src} Farbkanäle des CCD-Sensors, \mathbf{A}_{Dst} beschreibt die Spektralwerte des Zielsystems mit einer $N_\lambda \times K_{Dst}$ Matrix. Über die Minimierung der quadratischen Fehlersumme kann die Transformationsmatrix \mathbf{B}_{opt} berechnet werden.

$$\mathbf{B}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{B}} E \left\{ \left\| \vec{t}_{Dst} - \mathbf{B} \cdot \vec{t}_{Src} \right\|^2 \right\} \quad (6)$$

Für lineare Farbräume kann eine im Sinne des Kriteriums aus Gleichung (6) optimale lineare Transformation ermittelt werden. Die Ergebnisse, die man mit den so berechneten Matrizen \mathbf{B}_{opt} erzielen kann, sind recht gut und einfach auf verschiedene Farbräume und spektrale Empfindlichkeiten/ Beleuchtungssituationen anzupassen. Noch bessere Ergebnisse erhält man, wenn die Optimierung in einem nahezu gleichabständigen Farbraum (z.B. CIELAB) durchgeführt oder die Matrizierung auf eine 3D-LUT-Operation erweitert wird, so daß auch nichtlineare Zusammenhänge berücksichtigt werden können.

5 Monitore

Der Monitor ist, besonders im heutigen Multimediazeitalter, ein wichtiges Ausgabegerät für die Darstellung von Farbbildern. /SHAR98/. Hierbei ist sowohl die schnelle Darstellung von Livebildern als auch die möglichst genaue Reproduktion von Bildern (Kunst und Design) von Bedeutung.

Die Optimierung der Darstellung von Kamerasignalen (Bildern) auf Monitoren ist daher ein wichtiges Aufgabengebiet für die bildaufgelöste Farbbewertung. Die Aufgabenstellung, ein mit einer CCD-Kamera erfaßtes Monitorbild auf diesem selbst möglichst exakt wieder darzustellen, ist eine grundlegende Zielstellung für die Datenbehandlung einer CCD-Kamera auf der weitere Aufgaben, z.B. die Darstellung von Realweltszenen, aufsetzen können.

5.1 Normen für Monitore

Die Primärvalenzen von Monitoren sind in relativ engen Grenzen international genormt. Für die Darstellungsqualität spielt die Umsetzung der RGB-Daten im Speicher in die ent-

sprechende Aussteuerung auf dem Monitor, das Übersprechverhalten, die Konvergenzeinstellung und die Oberflächenbeschichtung (Reflexion) eine Rolle.

Die breitbandigen Primärvalenzen des CRT-Monitors Abb. 9 (besonders bei Grün und Blau) bewirken eine merkliche Einschränkung der darstellbaren Farben. Das macht sich besonders bei gesättigten Farben bemerkbar. Im Vergleich dazu sind in Abb. 8 die Primärvalenzen eines DSTN-Display dargestellt.

5.2 Beispielbilder eines Computermonitors

Mit Hilfe einer Mehrkanal-Spektralmeßkamera SMK98 wurde ein einfaches horizontales/vertikales Streifenmuster aufgenommen. Die Detailstruktur wurde mit einem Mikroobjektiv vom Typ TT077 ($\beta'=0.77$) erfaßt. In Abb. 13 und Abb. 14 ist deutlich zu erkennen, daß der Computermonitor im Gegensatz zum DSTN-Display die Linien viel mehr verschmiert. Dies passiert sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Die Vergrößerung des verwendeten Mikroobjektivs ist bei der DSTN-Aufnahme schon an der Grenze. Das kann man sehr gut an den Farbsäumen erkennen, die sich an den Rändern der einzelnen Pixel ausbilden. (Die Aufnahme wurde um den Faktor 2 gegenüber der Computermonitornaufnahme vergrößert.)

Die Beurteilung der Gleichförmigkeit kann mit Hilfe der Leuchtdichtemeßkamera LMK98 oder einer entsprechenden Matrizierung der Daten einer SMK98 vorgenommen werden. Mit diesen Systemen können orts aufgelöst Leuchtdichten erfaßt werden. Durch die große Bandbreite der spektralen Zusammensetzung ist hier die $V(\lambda)$ -Anpassung bzw. die applikationsspezifische Matrizierung sehr wichtig. Durch die bei der Vollfilterung begrenzten Möglichkeiten und durch die starken Chargenschwankungen werden f_1' -Kennwerte im Bereich 2.5-4% bei der $V(\lambda)$ -Anpassung der LMK98 erreicht. Wie der Abb. 1 zu entnehmen ist, reicht dies aber aus, um mit hoher Genauigkeit im gesamten durch den Monitor darstellbaren Farbbereich Leuchtdichten zu messen. Wird eine SMK98 verwendet und die Matrizierung auf die Monitordarstellung angepaßt, ergeben sich die in Abb. 2 dargestellten Meßfehler für die Leuchtdichtewerte.

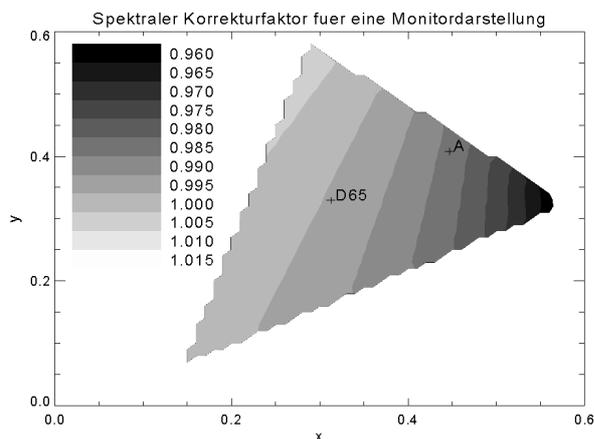


Abb. 1: Notwendiger Korrekturfaktor, durch die spektrale Ausstrahlung bei Monitormessungen

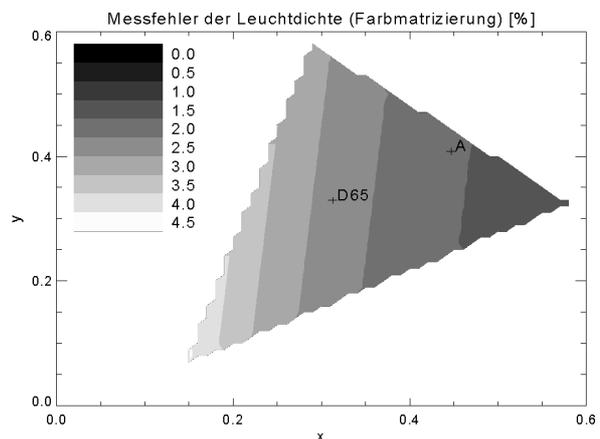


Abb. 2: Meßfehler, durch die spektrale Bewertung bei optimaler Matrizierung

6 Anwendung

Für die Erfassung von Bildvorlagen unter bekannten Bedingungen (z.B. Druckvorlagen bei Tageslichtart D65) kann man mit Hilfe der relativen spektralen Empfindlichkeiten (Abb. 11) und entsprechend optimierten Matrizierungen (Gleichung (6)) eine befriedigende bis gute Farbdarstellung erreichen. Eine Anpassung an die Beleuchtung ist erforderlich. Die Abweichungen der Farbvalenzen bei sehr schmalbandigen Spektralreizen bleiben trotz entsprechender angepaßter Optimierungen relativ hoch.

Die orts aufgelöste Beurteilung von Farbabweichungen ist ein bevorzugtes Einsatzgebiet. Bei feststehenden und gut zu beschreibenden Bedingungen können über angepaßte Transformationen Farbvalenzen von Mustern und Proben verglichen werden. Dies ist besonders in der Produktionskontrolle notwendig, um die Schwankungen der Farbvalenzen zu erfassen. Diese Messung ersetzt aber nicht die Erfassung der spektralen Zusammenhänge, die über ein Spektrometer erfolgen muß.

Die Farberfassung kann natürlich auch im Dynamikbereich hochauflösend sein. Das dazugehörige Vorgehen soll anhand der Erfassung des Spektrums einer HQI-Lampe dargestellt werden. Die Daten der HighDyn-Aufnahme (Spektrometervorsatz in Verbindung mit einer 1Chip-CCD-Farbmatrix) werden ohne die Ortsentzerrung in RGB-Daten umgewandelt. Die Darstellung aus Abb. 10 zeigt die Daten in verschiedenen Ansichten. Dabei werden die Daten so skaliert, daß die Farbart weitgehend erhalten bleibt und nur die Luminanz auf mehrere Dekaden logarithmisch skaliert wird. In Abb. 15 sind weitere Beispiele zu finden.

7 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.

Literatur:

- /AGFA/ Grafiken aus AGFA: Einführung in die digitale Fotografie
/CRI99/ VS-RGB-GP: LIQUID CRYSTAL TUNABLE FILTER, <http://www.cri-inc.com>
/FISC98/ Fischbach, I.; Krüger, U.: Erfassung photometrisch richtiger Daten mit CCD-Kameras, 43. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 21.-24.09.1998, Band 1, S. 658-664, Ilmenau, (1998)
/ICC97/ ICC Profile Format Specification, International Color Consortium, Version 3.4, <http://www.color.org>
/KRÜG94/ Krüger, U.: Anätze für systemtheoretische Untersuchungen von Farbaufnahmesystemen mit CCD-Sensoren. Belegarbeit, Technische Universität Ilmenau, 1994
/LENZ97/ Lenz, R.: Digitale Farbkamera für die elektronische Fotografie. Patentschrift DE19702837C1, PD: 27.1.1997, (1997)
/LUTH27/ Luther, R.: Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik. Zeitschrift für techn Physik, Nr. 12, S.540-558, 1927
/MAZeT/ MAZeT: Ortsauflösende Farberkennung. Systeme 9/98, S. 74-77, (1998)
/RICH81/ Richter, M.: Einführung in die Farbmatrik, Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 1981, 2. Auflage
/RIEV97/ Rieve, P.; Böhm, M.: Elektrisch steuerbare Farbsensoren. Proc. Bildverarbeitung '97, Forschen, Entwickeln, Anwenden; Herg.: R.-J. Ahlers, 26-28.11.1997, Esslingen, (1997)
/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, F.; Morgeneier, D., Schlichting, B.; Krüger, U.: Farbmtrische Bewertung von Mosaikfiltermatrizen für Einchip-CCD-Sensoren, 42. Intern. Wiss. Kolloq. D. TU Ilmenau, 22.-25.9.97
/SCHM98/ Schmidt, F.; Weyh, S.; Schlichting, B.; Krüger, U.: Digitale CCD-Kameras mit hoher Quantisierungsauflösung – Analyse&Design, 45. Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 1998, S.139-166, 1998
/SCHM99/ Schmidt, F.; Krüger, U.: Einsatz von Standard CCD-Matrizen für photometrische Meßzwecke – Analyse und Design von Kameras mit hoher Auflösung und Genauigkeit. FRAMOS CCD Forum '99, 10.-11.06.99, München, (1999)
/SHAR96/ Sharma, G.; Trussell, H. J.: Color scanner performance trade-offs. in Proc. SPIE: Color imaging: device-independent color, color hard copy, and graphic arts, Jan. 1996, vol. 2658, pp. 270-278
/SHAR98/ Sharma, G.; Vrhel, M.J.; Trussell, H. J.: Color imaging for Multimedia. Proc. IEEE, vol. 86, no. 6, pp. 1088-1108, Jun. 1998
/SONY/ Sony: Datenblätter CCD-Komponenten. ICX085AK; über www.sony.com
/WYSZ82/ Wyszecki, G.; Stiles, W.S.: Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae, Second Edition, Wiley, New York, 1982

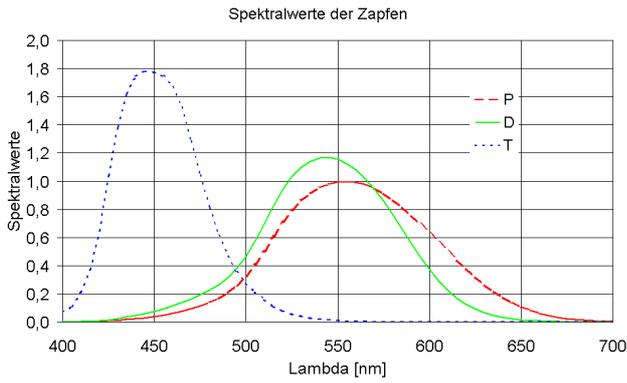


Abb. 3: Augenempfindlichkeit des 2°-Normalbe-trachters

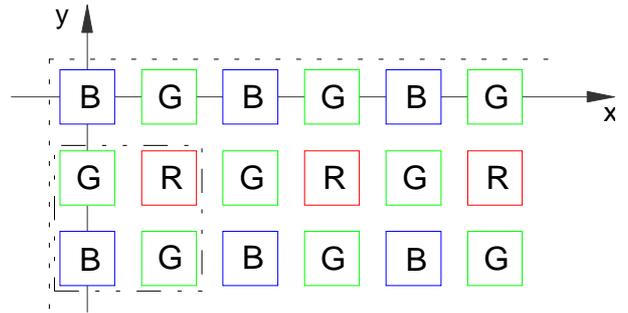


Abb. 4: Anordnung der RGB-Primärfilter nach Bayer (Bayer-Struktur)

Optische Signaltrennung

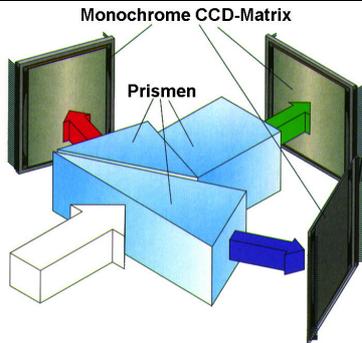


Abb. 5: Strahlteilerwürfel einer 3Chip CCD-Kamera

Örtliche Signaltrennung

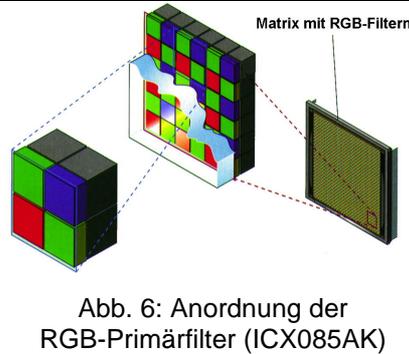


Abb. 6: Anordnung der RGB-Primärfilter (ICX085AK)

Zeitliche Trennung

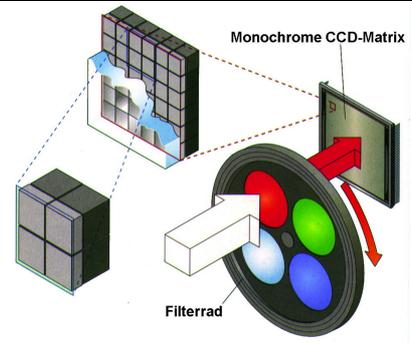


Abb. 7: Anwendung eines Filterrades /AGFA/

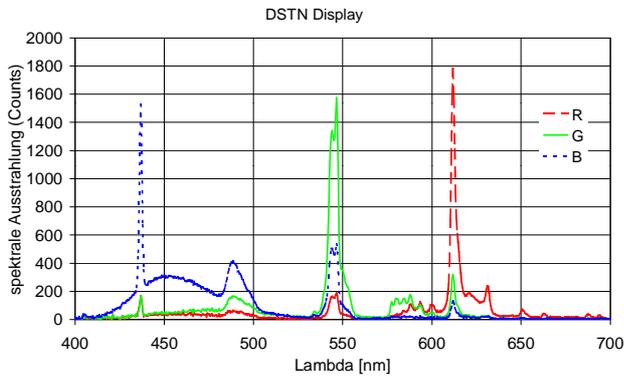


Abb. 8: Spektrale Strahlendichte eines DSTN-Displays

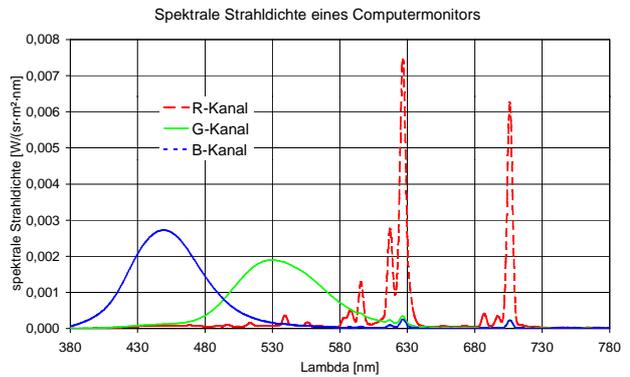


Abb. 9: Spektrale Strahlendichte eines CRT-Monitors

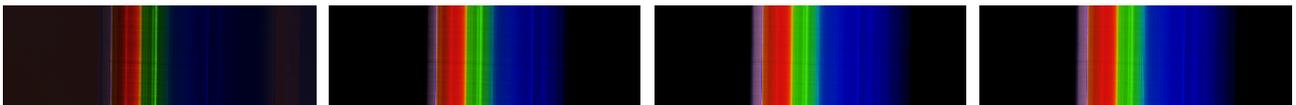


Abb. 10: Aufnahme des Spektrums einer HQI-Lampe mit einem Spektrometervorsatz an einer SMK98-Kamera (Darstellung linear, Log 2 Dekaden, Log 3 Dekaden und Log 4 Dekaden)

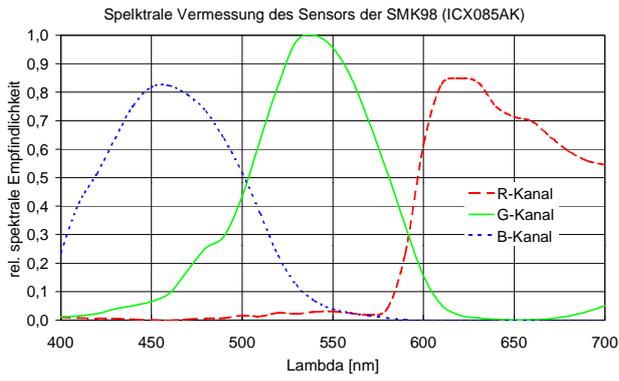


Abb. 11: Relative spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Pixelklassen (ICX085AK)

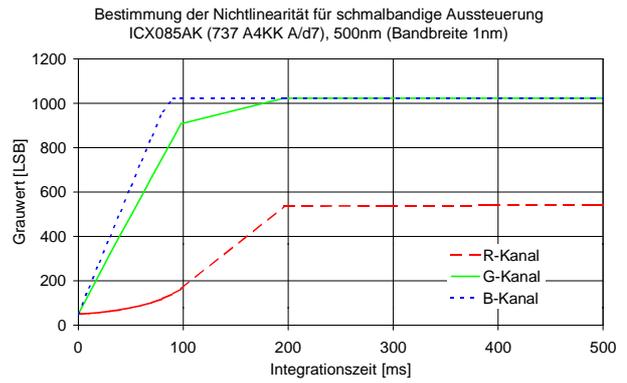


Abb. 12: Bestimmung der Nichtlinearität für schmalbandige spektrale Strahldichten

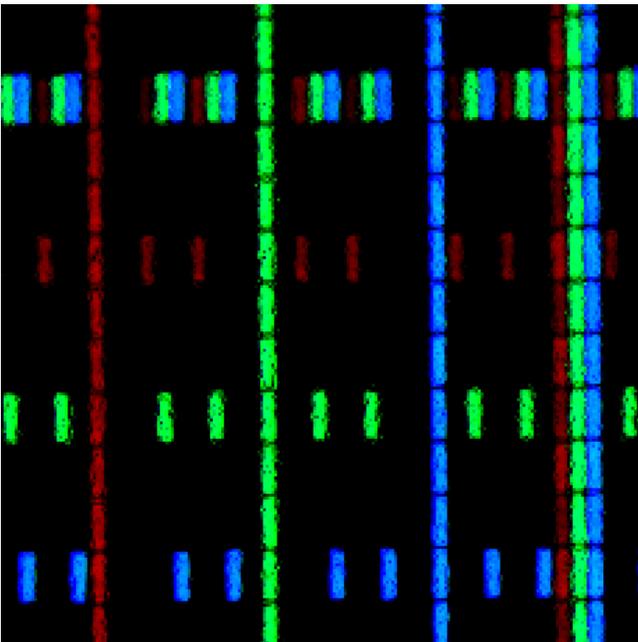


Abb. 13: Pixelstruktur eines DSTN-Displays erfaßt mit Hilfe eines Mikroobjektivs

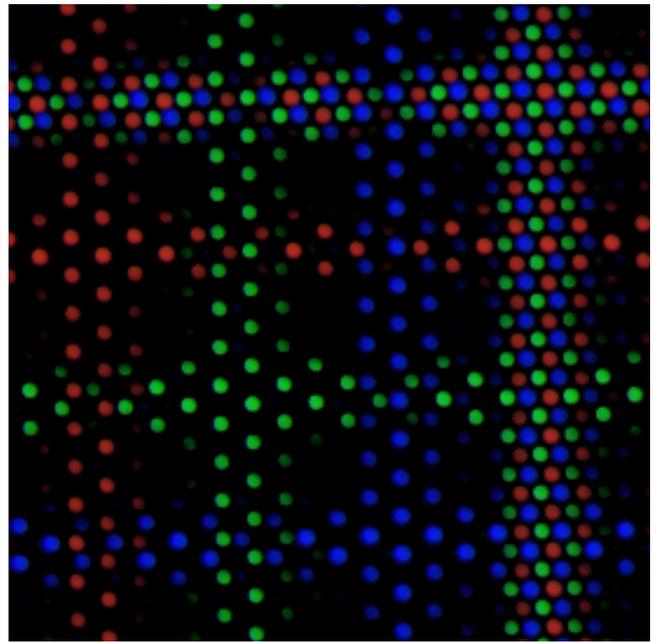


Abb. 14: Pixelstruktur eines Computermonitors erfaßt mit Hilfe eines Mikroobjektivs

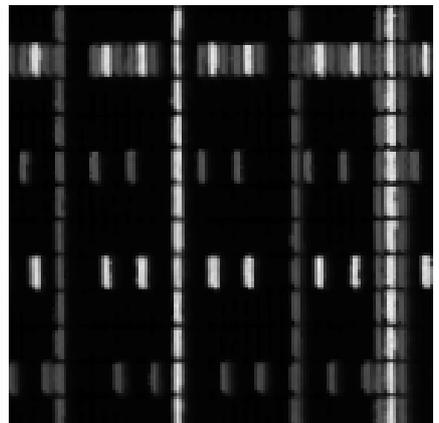
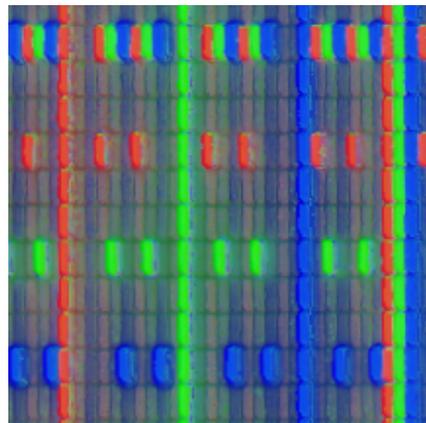
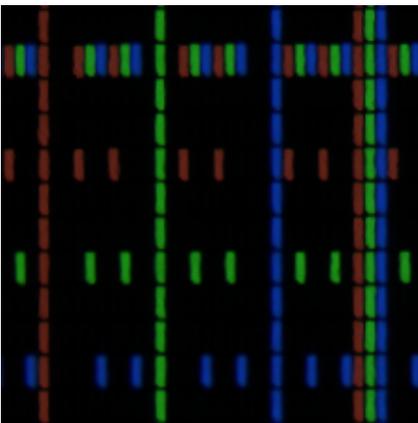


Abb. 15: Mikrostruktur eines TFT-Displays (links linear skaliert, Mitte log. Skaliert über 4 Dekaden, rechts Luminanz (linear))