

Eigenschaften von digitalen 1-Chip-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 wie in radiometrische Einsatzgebiete vor. Das liegt insbesondere an der guten Beschreibbarkeit und Reproduzierbarkeit der Kameraeigenschaften.

Die bildaufgelöste Messung von Leuchtdichtedaten mit angepaßten digitalen CCD-Kameras ist inzwischen zum Stand der Technik geworden und wird in vielen Bereichen eingesetzt [1,2]. Die orts aufgelöste 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. dreikanaliges Farbsehen des Menschen) oder bei der Fernerkundung (z. B. sechs 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 Normalbe-trachter definiert! (DIN5033 Teil 1-9, [3])
- Informationen erfassen, die Objekteigenschaften repräsentieren, die in der spektralen Verteilung $L_{e\lambda}(x, y, \lambda)$ enthalten sind.

Letzteres erlaubt die Sensorgestaltung (z. B. Realisierung von Filtern $s_n(\lambda)$), angepaßt an das zu bearbeitende Problem.

Die ersten Stufen des menschlichen Sehens, die in der Retina des Auges und kurz danach stattfinden, sind recht gut aufgeklärt. Das Farbsehen kann allerdings nicht ohne Einbeziehung höherer Prozesse im Gehirn des Menschen erklärt werden, ist also nicht auf einen physikalischen Vorgang reduzierbar. Die Sensorelemente im Auge bestehen aus spektral unterschiedlich sensitiven Elementen (drei Zapfenarten (SML oder pdt genannt) und einer Stäbchenart). Die Zapfen sind für das photopische "Tagessehen" (höhere Leuchtdichten), die Stäbchen für das skoptische "Nachtsehen" (niedrigere Leuchtdichten) verantwortlich. Die evolutionäre Entwicklung des Sehsystems ist aufgaben- und umweltbezogen entstanden. So hat sich die Unterscheidung zwischen den Zapfenarten d und p erst in jüngerer Zeit vollzogen. Die meisten Säugetiere haben diese Unterscheidung nicht – sie sehen nur zweikanalig. Es wird im folgenden nur der physikalische Zusammenhang bis zu den Ausgangssignalen der Zapfen betrachtet.

Die Farbmimetrik, die Lehre von den Maßbeziehungen der Farben untereinander [3], 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 (z. B. Farbumstimmung), werden dabei nicht betrachtet.

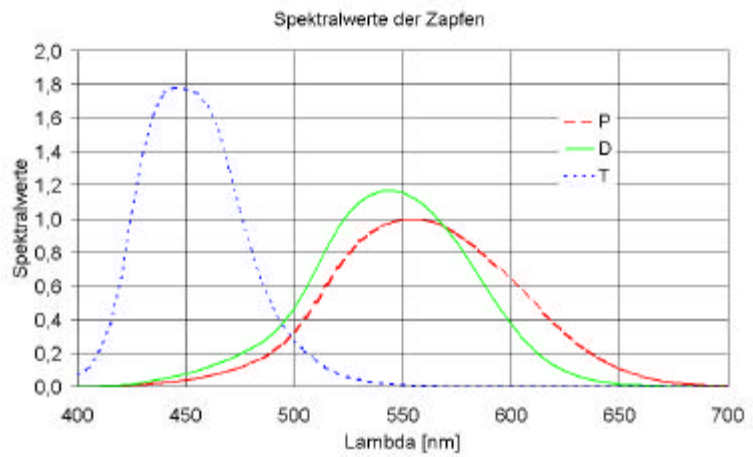


Bild 1: Augenempfindlichkeit des 2°-Normalbetrachters

2.2 Erfassung eines Farbwertes

Für die Erfassung der Farbvalenzen, d. h. für die Messung von Farbe, sind entsprechend der Lutherbedingungen [4] mindestens drei Sensoren notwendig, deren relative spektrale Empfindlichkeiten $s_i(I)$ eine Linearkombination der in Bild 1 gezeigten Augenempfindlichkeiten darstellen. Ist das der Fall, ist die richtige Berechnung der Farbvalenzen immer möglich. Fehler in der Anpassung der Sensorempfindlichkeiten führen zu Abweichungen in den Meßwerten, die jedoch für bestimmte Meßbedingungen korrigiert werden können (Lichteinflüsse beachten).

Wird der sichtbare Spektralbereich (ca. 380 bis 780 nm) mit mehr als drei linear unabhängigen Bewertungsfunktionen $s_i(I)$ erfaßt, ergeben sich besonders bei der Korrektur von nicht optimal angepaßten Sensorempfindlichkeiten durch Optimierung der Linearkombinationen verbesserte Möglichkeiten zur Berechnung der Farbvalenzen. Diese Aufspaltung in verschiedene Spektralbereiche kann bis zur Erfassung der Strahlungsleistung in vielen schmalbandigen Bereichen mit einem Spektrometer betrieben werden, wobei im Grenzfall $s_k(I) = \alpha(I - I_k)$ gegeben ist.

Die einzelnen Spektralbereiche können optisch, örtlich, zeitlich oder in einer Kombination aus den drei genannten Verfahren getrennt werden.

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

Optische Signaltrennung

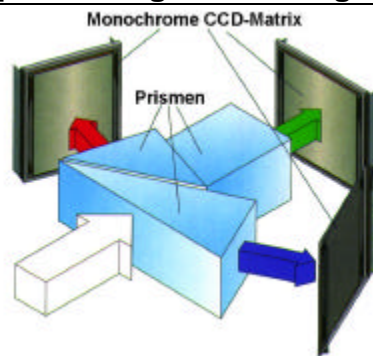


Bild 2: Strahlteilerwürfel einer 3-Chip-CCD-Kamera

Örtliche Signaltrennung

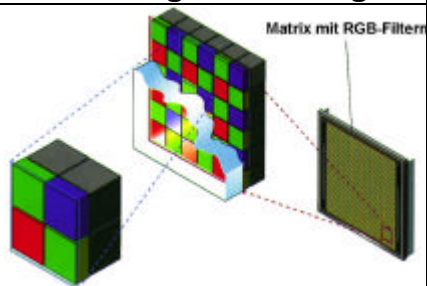


Bild 3: Anordnung der RGB-Primärfilter (ICX085AK)

Zeitliche Trennung

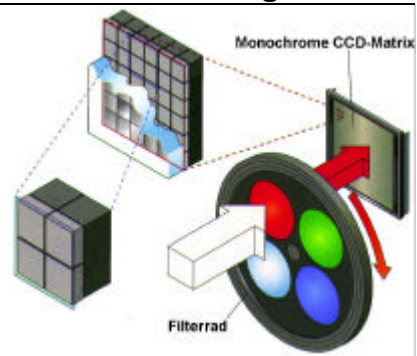


Bild 4: Anwendung eines Filterrades [8]

Eine interessante Version für die Kopplung von örtlicher und zeitlicher Signaltrennung stellt ein von Dr. Lenz beschriebenes Verfahren dar, das ein Einschnitt-Mikroscanning mit einer 1-Chip-CCD Matrix vorsieht, um die örtliche Auflösung zu erhöhen, und dabei auch bei bewegten Szenen noch scharfe Bilder erzielt [9].

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.

Ein langer und störungsanfälliger analoger Signalweg zwischen Kamera und Framegrabber begrenzt die Qualität der Bilddaten dabei erheblich. Für Anwendungen in der Meßtechnik ist zusätzlich die Übertragung von Synchroninformation (Pixeltakt) notwendig, damit die Zuordnung zwischen Bildpunkt im Speicher und Bildpunkt auf der Matrix erhalten bleibt. Es ist daher naheliegend, die Digitalisierung in der Kamera vorzunehmen. Ein kurzer analoger Signalweg von der Matrix zur Digitalisierung, die Möglichkeit der Gleichspannungskopplung zum Analog-Digital-Umsetzer (ADU), die pixelsynchrone Abtastung und die nicht mehr zwingend notwendige Einhaltung des Videoregimes sind nur einige Vorteile, durch die eine spürbare Verbesserung der Bildqualität erzielt wird. Mit dieser Qualitätsverbesserung können weitere Anwendungsgebiete erschlossen werden, die eine erhöhte Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Bilddaten erfordern.

Durch den direkten Bezug und die stabilen Eigenschaften können die Daten, die im Speicher des PCs erfaßt werden, so behandelt (korrigiert) werden, daß die Eingangsdaten der physikalischen Prozesse auf der CCD-Matrix zur Verfügung stehen. Es kann dann die Anzahl der auf der Pixelfläche auftreffenden Photonen pro Zeiteinheit, d. h. die Bestrahlungsstärke auf der CCD-Matrix, relativ genau bestimmt werden.

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 diesen Daten dann andere lichttechnische oder farbmetrische Größen ermittelt werden.

Für die Erfassung exakter Daten ist im wesentlichen die Korrektur folgender Parameter und Kennwerte notwendig [1]:

- Shading des Objektivs und der Mikrolinsen auf der CCD-Matrix (Shadingkorrektur)
- geometrische 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)
- Defektbildpunkte und deren Veränderung (Defektpixelkorrektur)

3.1 Signalerfassung mit 1Chip-CCD-Matrizen

Eine 1-Chip-CCD-Kamera erfasst drei oder vier spektrale Bereiche. Kameras mit drei Bereichen verwenden in der Regel RGB-Primärvalenzen zur Erfassung der Signale. Bei Kameras mit vier Filtertypen werden Komplementärfarbfiler bevorzugt [10,11]. Diese Filter können auf der Matrix in sehr unterschiedlicher Art und Weise angeordnet werden [12].

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 den Autoren verwendeten Matrizen vom Typ Sony ICX085AK [13] ist die Anordnung nach Bayer realisiert.

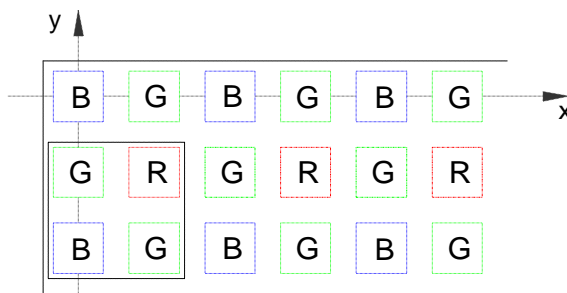


Bild 5: Anordnung der RGB-Primärfilter nach Bayer (Bayer-Struktur)

3.2 Realtive spektrale Empfindlichkeit von 1-Chip-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 Farbkamera wird daher in der Signalerfassung fast so behandelt wie eine SW-Kamera. Die Aufnahmeverfahren von Mehrbild-/HighDyn-Messung (Rauschminderung, Erhöhung des Dynamikumfanges) und die Korrekturalgorithmen für Dunkelsignal, Shading und Nichtlinearität werden für alle Pixel analog den Verfahren bei photometrischen Messungen durchgeführt [14]. Man erhält durch diese Mechanismen sehr präzise Schätzungen für folgende Integrale:

$$gw_i = k \cdot \int f(\mathbf{I}) \cdot \mathbf{t}_O(\mathbf{I}) \cdot \mathbf{t}_F(\mathbf{I}) \cdot x_i(\mathbf{I}) d\mathbf{I} \quad \text{mit } i = 0 \dots N_{\text{Kamera}} \quad (1)$$

Die Kamera liefert nach der Bildaufnahme und Korrektur die integralen Werte (korrigierte Grauwerte) gw_i . Mit N_{Kamera} wird die Anzahl der verwendeten Filter/Kanäle bezeichnet. Dies kann als „technische Betrachtung“ des physikalischen Farbreizes $f(\mathbf{I})$ angesehen werden. Die spektralen Empfindlichkeiten der Kanäle sollen mit $x_i(\mathbf{I})$ bezeichnet werden. Für die weitere Betrachtung im Sinne der Farbmeterik ist es notwendig, die relativen spektralen Empfindlichkeiten $x_i(\mathbf{I})$ zu bestimmen.

Aus unseren Erfahrungen bei der Anpassung von SW-Kameras an die Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges ($V(\mathbf{I})$ -Anpassung) wurde ersichtlich, daß man die Herstellerangaben bezüglich der relativen spektralen Empfindlichkeit der Sensoren nachmessen muß. Erstens sind die exemplarabhängigen Schwankungen auch in einer Charge nicht unerheblich und zweitens werden die Daten bei Sony immer einschließlich der Objektivcharakteristik angegeben, was eine Weiterverarbeitung erschwert.

Zur Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit wird die Kamera (Messung ohne Objektiv und IR-Sperrfilter, da die relativen spektralen Transmissionen des Objektivs $\mathbf{t}_O(\mathbf{I})$ bzw. ggf. eingesetzter Filter $\mathbf{t}_F(\mathbf{I})$ separat bestimmt werden können) mit Hilfe eines Monochromators im Vergleich mit einem Referenzelement spektral vermessen. In verschiedenen Schritten $\mathbf{I}_k = k \cdot \Delta\mathbf{I} + \mathbf{I}_{\min}$ wird die CCD-Matrix mit schmalbandigen Spektren $f(\mathbf{I}_k) = f_{\text{Mono}}(\mathbf{I} - \mathbf{I}_k)$ beaufschlagt, deren Bandbreite wesentlich kleiner ist als $\Delta\mathbf{I}$. Diesen schmalbandigen Spektren kann die Austasteigenschaft des Diracimpulses zugeschrieben werden, so daß mit Hilfe eines kalibrierten Referenzelements die Größen $x_i(\mathbf{I}_k)$ für alle i, k bestimmt werden können.

Wird die relative spektrale Empfindlichkeit der Referenzdiode mit $x_D(\mathbf{I})$ bezeichnet und der gemessene Wert der Diode mit $I_D(\mathbf{I}_k)$, erhält man für die relative spektrale Empfindlichkeit des Kanals i der CCD-Matrix:

$$x_i(\mathbf{I}_K) = \frac{g w_i(\mathbf{I}_k) \cdot x_D(\mathbf{I}_k)}{I_D(\mathbf{I}_k)} \text{ mit } i = 0 \dots N_{\text{Kamera}}; k = 0 \dots N_I \quad (2)$$

Umfangreiche Messungen haben ergeben, daß die Variationsbreite in der relativen spektralen Empfindlichkeit bei 1-Chip-Farbmatrizen wesentlich kleiner ist als bei den SW-Matrizen. Das liegt wahrscheinlich daran, daß hier die Transmission der Filterschichten die Gesamtempfindlichkeit wesentlich bestimmt und daß diese stabiler realisiert werden können als die relative spektrale Empfindlichkeit der zugrundeliegenden SW-Matrix.

Ein weiteres Problem, das bei den Messungen auftritt, sind Nichtlinearitäten der Farbkäle untereinander. Wenn ein Kanal in die Sättigung geht, werden die benachbarten Pixel mit anderen Farbfiltern nicht mehr linear angesteuert, so daß die so erfaßten Farbvalenzen nicht mehr korrigiert werden können. Das führt dazu, daß die sonst bei HighDyn-Messungen [14] verwendeten Algorithmen erheblich verändert werden müssen, wenn ein hoher Dynamikbereich in den zu erfassenden Szenen zu erwarten ist.

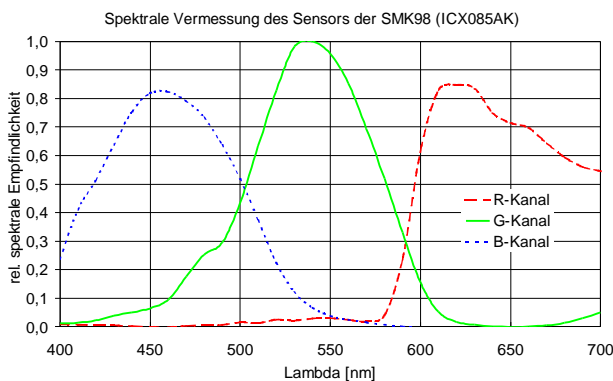


Bild 6: Relative spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Pixelklassen (ICX085AK)

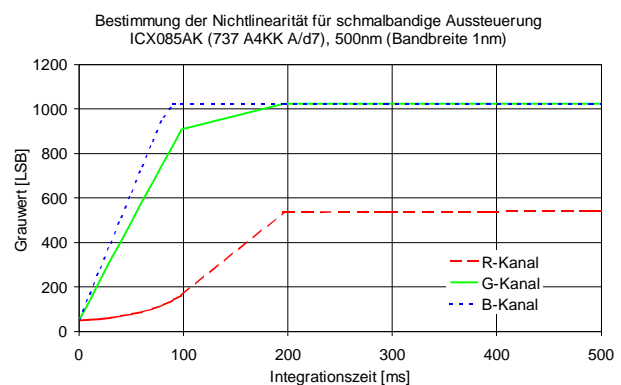


Bild 7: Bestimmung der Nichtlinearität für schmalbandige spektrale Strahldichten

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 Farbwerte erläutert werden. Für den physikalischen Farbreiz $f(\mathbf{I})$ und die Normspektralwertkurven $\bar{x}(\mathbf{I}), \bar{y}(\mathbf{I}), \bar{z}(\mathbf{I})$ gelten folgende Beziehungen:

$$X = k \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} f(\mathbf{I}) \cdot \bar{x}(\mathbf{I}) d\mathbf{I}, \quad Y = k \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} f(\mathbf{I}) \cdot \bar{y}(\mathbf{I}) d\mathbf{I}, \quad Z = k \cdot \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} f(\mathbf{I}) \cdot \bar{z}(\mathbf{I}) d\mathbf{I} \quad (3)$$

Für selbstleuchtende Objekte mit $f(\mathbf{I}) = S(\mathbf{I})$ kann der Normierungsfaktor k nicht bestimmt werden, wenn $S(\mathbf{I})$ nur in relativen Einheiten bekannt ist. Hier werden im allgemeinen die Farbwertanteile x, y, z verwendet, wobei als Bezugsgröße ggf. noch die Leuchtdichte oder der Lichtstrom angegeben werden kann. Für Körperfarben gilt $f(\mathbf{I}) = S(\mathbf{I}) \cdot \mathbf{b}(\mathbf{I})$, wobei für den Strahldichtefaktor $\mathbf{b}(\mathbf{I})$ sowohl der spektrale Trans-

missions- als auch der spektrale Remissionsgrad eingesetzt werden können. In diesem Fall läßt sich der Normierungsfaktor k wie folgt bestimmen:

$$k = \frac{100}{\int_{I_{\min}}^{I_{\max}} S(I) \cdot \bar{y}(I) dI} \quad (4)$$

Es wird also auf eine ideal weiße Fläche mit $b(I)=1$ normiert und für diesen Fall $Y = 100$ gesetzt.

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

$$\vec{t}_{Dst} = \mathbf{B} \cdot \vec{t}_{Src} \quad (5)$$

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.

Für die hier betrachteten Anwendungen ist es z. B. interessant, eine Abbildung aus dem durch die Sensorempfindlichkeiten der CCD-Matrix gebildeten Farbraum $kRGB$ in einen Standardfarbraum (z.B. RGB, sRGB [15]) zu ermitteln. 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 [16] 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 Möglichkeiten wieder darzustellen. Zielstellungen für die Beschreibung der Kameraeigenschaften sind die Erstellung derartiger Profile und die Nutzung von kameraspezifischen Farbraumtransformationen.

Für weitergehende Ausführungen sind z.B. die Standardwerke [4, 3, 17] 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 (5) zu finden. Die Berechnung der Transformationsmatrix sei kurz erläutert:

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 [18].

Für die Erfassung der Farbvalenzen von N Proben mit der Kamera ($\vec{s} \dots N_I \times N$ -Matrix der spektralen Reflektanzen der Proben) erhält man:

$$\vec{t}_{Src} = (\mathbf{L}_{Src} \cdot \mathbf{A}_{Src})^T \cdot \vec{s} \quad (6)$$

Die Farbvalenzen im Zielfarbraum (XYZ, RGB, usw.) für die gleichen Proben ergeben sich über:

$$\vec{t}_{Dst} = (\mathbf{L}_{Dst} \cdot \mathbf{A}_{Dst})^T \cdot \vec{s} \quad (7)$$

Mit $\mathbf{L}_{Src}, \mathbf{L}_{Dst}$ wird über eine $N_I \times N_I$ -Diagonalmatrix die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung beschrieben. \mathbf{A}_{Src} beschreibt über eine $N_I \times K_{Src}$ -Matrix die relative spektrale Empfindlichkeit der K_{Src} Farbkanäle des CCD-Sensors, \mathbf{A}_{Dst} beschreibt die Spektralwerte des Zielsystems mit einer $N_I \times K_{Dst}$ -Matrix.

Über die Minimierung der quadratischen Fehlersumme wird eine Transformationsmatrix berechnet:

$$\mathbf{B}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{B}} E \left\{ \left\| \vec{t}_{Dst} - \mathbf{B} \cdot \vec{t}_{Src} \right\|^2 \right\} \quad (8)$$

Für lineare Farbräume kann eine im Sinne des Kriteriums aus Gleichung (8) optimale lineare Transformation ermittelt werden. Die Ergebnisse, die man mit den so berechneten Matrizen \mathbf{B}_{opt} erzielt, sind recht gut und insbesondere sehr einfach auf verschiedene Farbräume und spektrale Empfindlichkeiten/Beleuchtungssituationen anzupassen.

Wird für die Anordnung (Matrix vom Typ ICX085AK mit Infrarot-Sperrfilter, Reflektanzen aus IT8.2 Chart, Beleuchtung D65) die Optimierung durchgeführt, ergeben sich für die Zielfarbräume RGB bzw. XYZ die in Bild 8 und Bild 9 dargestellten Verhältnisse. Man erkennt, daß bestimmte Verläufe sehr gut approximiert werden, andere dagegen nur annähernd.

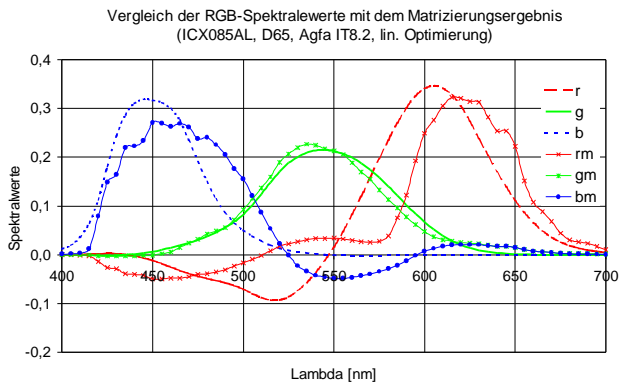


Bild 8: Vergleich der Soll- und Istspektralwerte nach linearer Matrizierung (Matrix->RGB)

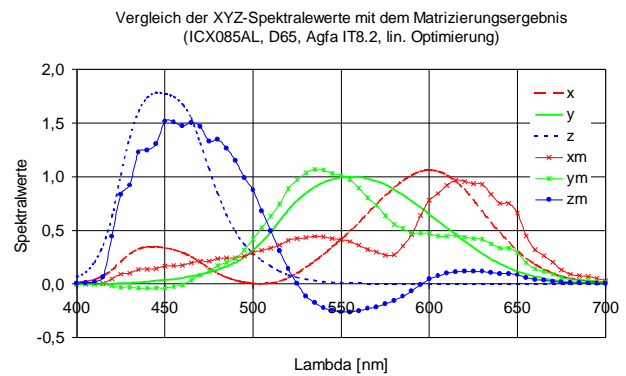


Bild 9: Vergleich der Soll- und Istspektralwerte nach linearer Matrizierung (Matrix->XYZ)

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. Diese Transformationen erfordern zu ihrer Berechnung allerdings einen erheblich höheren Aufwand und sind relativ anfällig gegen Schwankungen der Kameraparameter und Eingangsdaten, da hier die integrale Fehlerbewertung nicht mehr greift.

5 Monitore

Der Monitor ist, besonders im heutigen Multimediazeitalter, ein wichtiges Ausgabegerät für die Darstellung von Farbbildern [19]. 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 Wiedergabe von Realweltszenen, aufsetzen können.

5.1 Normen für Monitore

Die Primärvalenzen von Monitoren sind in relativ engen Grenzen international genormt. Für die Darstellungsqualität spielen insbesondere die Umsetzung der RGB-Daten im Speicher in die entsprechende Aussteuerung auf dem Monitor, das Übersprecherhalten, die Konvergenzeinstellung und die Oberflächenbeschichtung (Reflexion) eine Rolle.

Vor Messungen an Monitoren muß sichergestellt sein, daß diese richtig eingestellt und die Einstellungen auch reproduzierbar sind. Dazu sind die Kontrast- und Helligkeitseinstellungen so vorzunehmen, daß die Gradationskennlinien der Norm entsprechen. Die breitbandigen Primärvalenzen des CRT-Monitors (besonders bei Grün und Blau) bewirken eine merkliche Einschränkung der darstellbaren Farben. Das macht sich besonders bei gesättigten Farben bemerkbar.

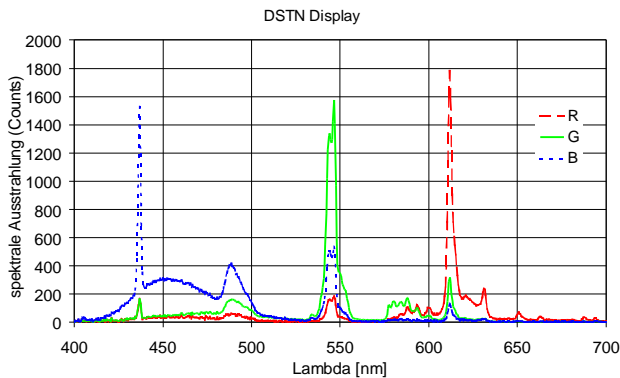


Bild 10: Spektrale Strahlendichte eines DSTN-Displays

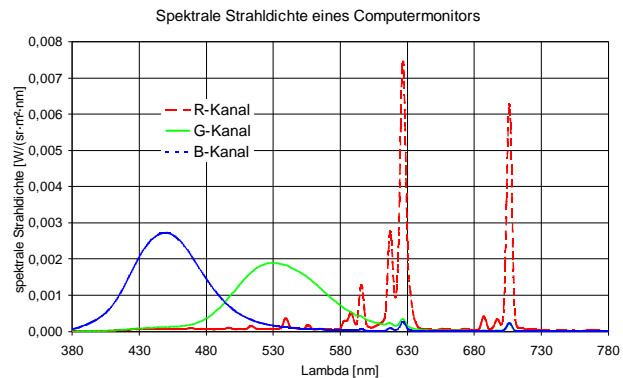


Bild 11: Spektrale Strahlendichte eines CRT-Monitors

5.2 Abtastverhältnisse

Für die Erfassung von Monitorbildern mit CCD-Kameras ist zu beachten, daß der Monitor die darzustellenden Daten nur an diskreten Stellen und in bestimmten Zeitintervallen zur Verfügung stellt und daß die Kamera mit der CCD-Matrix ein zeitlich integrierendes und örtlich abtastendes System darstellt.

Der Monitor hat eine Maske, auf der jede der drei Grundfarben R,G,B in einem bestimmten Raster $\Delta x_M, \Delta y_M$ dargestellt wird. Bei einem CRT-Monitor werden die Leuchtphosphore der Monitorpunkte (Ausdehnung $\Delta x_{ph}, \Delta y_{ph}$) durch einen Elektronenstrahl mit der Bildwiederholfrequenz f_M angesteuert und kurzzeitig (Δt_{ph}) zum Leuchten angeregt. Die Zeitdauer reicht von $\Delta t_{ph} = 1/f_M$ bei LCD-Displays, die fast nicht moduliert sind, bis zu Laserprojektoren, bei denen sich Δt_{ph} im Picosekundenbereich bewegt. Bei CRT-Monitoren liegt die Nachleuchtdauer der Phosphore dazwischen.

Um die folgenden Vorgänge möglichst übersichtlich zu beschreiben, werden ein einfaches Monitormodell, eine ideale optische Abbildung und eine sehr einfache Erfassung durch die CCD-Kamera angenommen.

Für das Signal eines einzelnen Monitorpunktes $se_M(x, y, t)$ kann im Orts-/Zeit-Bereich Gleichung (9) bzw. im Orts-/Zeitfrequenzbereich Gleichung (10) im einfachsten Fall

$$se_M(x, y, t) = \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x_{ph}}, \frac{y}{\Delta y_{ph}}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{\Delta t_{ph}}\right) \quad (9)$$

$$SE_M(k_x, k_y, f) = \text{si}(\mathbf{p} \cdot \mathbf{k}_x \cdot \Delta x_{ph}, \mathbf{p} \cdot \mathbf{k}_y \cdot \Delta y_{ph}) \cdot \text{si}(\mathbf{p} \cdot f \cdot \Delta t_{ph}) \quad (10)$$

geschrieben werden. Mehrere Punkte (der Farbkanal wird nicht unterschieden) bilden in Verbindung mit der Bildwiederholfrequenz dann ein Bild. (Die Effekte der endlichen Bildausdehnung bleiben unberücksichtigt.)

$$s_M(x, y, t) = P \{se_m(x, y, t)\}_{\Delta x_M, \Delta y_M, \Delta t_M} \quad (11)$$

$$S_M(k_x, k_y, f) = A \{SE_m(k_x, k_y, f)\}_{\frac{1}{\Delta x_M}, \frac{1}{\Delta y_M}, \frac{1}{\Delta t_M}} \quad (12)$$

Gelangt dieses Signal mit Hilfe einer optischen Abbildung (Abbildungsmaßstab b') auf die CCD-Matrix, erhält man die Grauwerte bzw. deren Spektrum über folgende Zusammenhänge:

$$g_w = A \left\{ \left[S_M(\mathbf{b}' \cdot x, \mathbf{b}' \cdot y, t) ** \text{rect} \left(\frac{x}{\Delta x_{CCD}}, \frac{y}{\Delta y_{CCD}} \right) \right] * \text{rect} \left(\frac{t}{\Delta t_{Int}} \right) \right\}_{\Delta x_K, \Delta y_K} \quad (13)$$

$$GW = P \left\{ \left[S_M \left(\frac{k_x}{\mathbf{b}'}, \frac{k_y}{\mathbf{b}'}, t \right) \cdot \text{si}(\mathbf{p} \cdot k_x \cdot \Delta x_{CCD}, \mathbf{p} \cdot k_y \cdot \Delta y_{CCD}) \right] \cdot \text{si}(\mathbf{p} \cdot f \cdot \Delta t_{Int}) \right\}_{\frac{1}{\Delta x_K}, \frac{1}{\Delta y_K}} \quad (14)$$

Das auf die CCD-Matrix abgebildete Monitorsignal wird mit der Pixelapertur gefaltet und während der Integrationszeit integriert. Dabei ist besonders bei 1-Chip-CCD-Matrizen zu beachten, daß $\Delta x_K, \Delta y_K$, die Periode des Gitters, in dem die Daten erfaßt werden, wesentlich größer ist als die Breite der Pixelapertur $\Delta x_{CCD}, \Delta y_{CCD}$, da die Pixel der anderen Farbauszüge zwischen den Pixeln der gleichen Farbe liegen.

Betrachtet man die Gleichungen im Frequenzbereich (14) und nimmt die maximal auftretende Ortsfrequenz des Monitors mit \hat{f}_M an, so ergeben sich folgende Relationen für zwei wesentliche Einsatzfälle der Monitorbegutachtung:

$$\mathbf{b}'_{Mikro} > 2 \cdot \Delta x_K \cdot \hat{f}_M \quad (15)$$

$$\mathbf{b}'_{Makro} < \frac{\Delta x_{CCD}}{\Delta x_M} \quad (16)$$

Beim Betrachten von Monitoren sollte man sich bei der Beurteilung der Feinstruktur (Konvergenz, Kanalübersprechen) sicher im Bereich $\mathbf{b}' > \mathbf{b}'_{Mikro}$ befinden, in dem ein Punkt auf dem Monitor von mehreren Pixeln auf der CCD-Matrix (auch des gleiches Farbkanals) erfaßt wird (Mikrobereich). Geht es dagegen um die Beurteilung globaler Eigenschaften (Gleichförmigkeit, Farbdarstellung), so ist sicherzustellen, daß ein Pixel auf der CCD-Matrix vom Licht vieler Monitorpunkte angesteuert wird ($\mathbf{b}' < \mathbf{b}'_{Makro}$ Makrobereich). Im Makrobereich wird nur der Gleichwert des Monitorsignals ausgewertet. Dazwischen kann es zu großen Aliasingproblemen kommen. Der Grenzbereich zwischen diesen beiden Bereichen sollte sehr groß gewählt werden, da manchmal schon kleine geometrische Verschiebungen in der Meßanordnung zu sehr großen Meßfehlern führen können. Des weiteren können bei der Beurteilung von CRT-Monitoren noch Abtastprobleme in der Zeitdimension auftreten. Diese werden durch den zeilenweisen Aufbau des Bildes verursacht, wenn die Bilddatenerfassung nicht synchronisiert erfolgt (d. h. jedes Pixel erfaßt die Daten genau eines Strahldurchlaufes) oder die Anzahl der Strahldurchläufe bei nicht-synchronisierter Arbeitsweise zu klein ist (Problem der Abtastung modulierter Größen).

Wird die Integrationszeit entsprechend der Wiederholzeit für einen Bildaufbau gewählt ($\Delta t_{Int} = \Delta t_M$), so entstehen keine Erfassungsprobleme, wobei das in der Praxis schwer zu bewerkstelligen ist. Wird auf bestimmte Ereignisse im Bildaufbau synchronisiert (z. B. Vertikalsynchronsignal), so kann $\Delta t_{Int} \approx \Delta t_M$ gewählt werden. Dabei kommt es auf die Nachleuchtzeit und den Synchronisationszeitpunkt an, welche Genauigkeit eingehalten werden muß, um bei der Auswertung der Bilddaten keine Fehler zu machen. Kann man das Bild nicht synchronisieren, so muß die Integrationszeit mit $\Delta t_{Int} \gg \Delta t_M$ gewählt werden, wobei immer ein Restfehler übrig bleibt, der bei der Wiederholung der Messung abgeschätzt werden kann oder aus systemtheoretischen Überlegungen abzuleiten ist.

5.3 Beispielbilder eines Computermonitors

Mit Hilfe einer Mehrkanal-Spektralmeßkamera SMK98 wurden einfache Testbilder (Bild 12 und Bild 13) aufgenommen, um die oben beschriebenen Effekte darzustellen.

Die Detailstruktur wurde mit einem Mikroobjektiv vom Typ TT077 ($\beta' = 0.77$) erfaßt. In Bild 14 und Bild 15 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 Computermontoraufnahme vergrößert.)

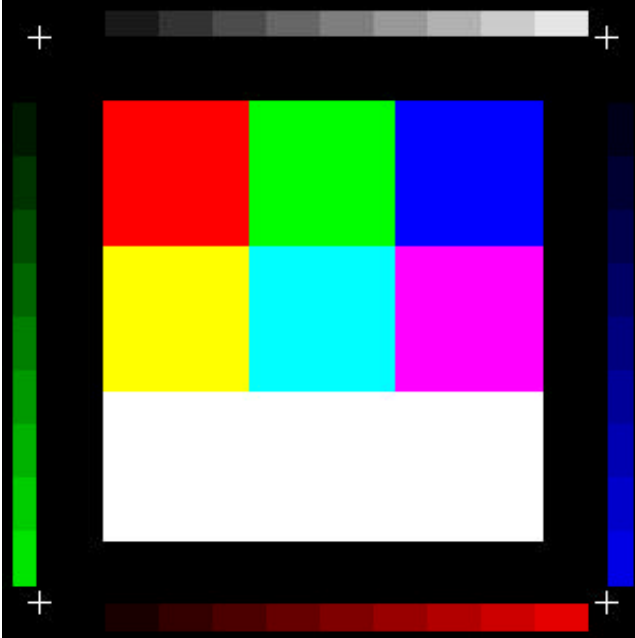


Bild 12: Testbild für Makroaufnahmen

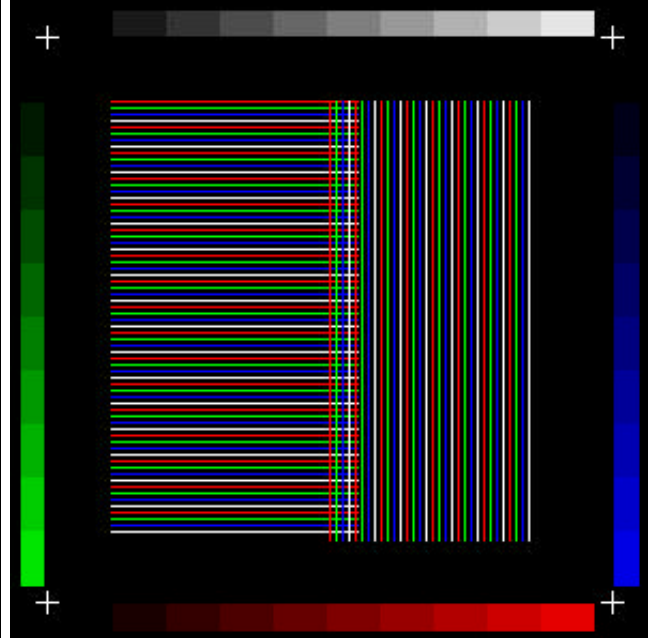


Bild 13: Testbild für Mikroaufnahmen

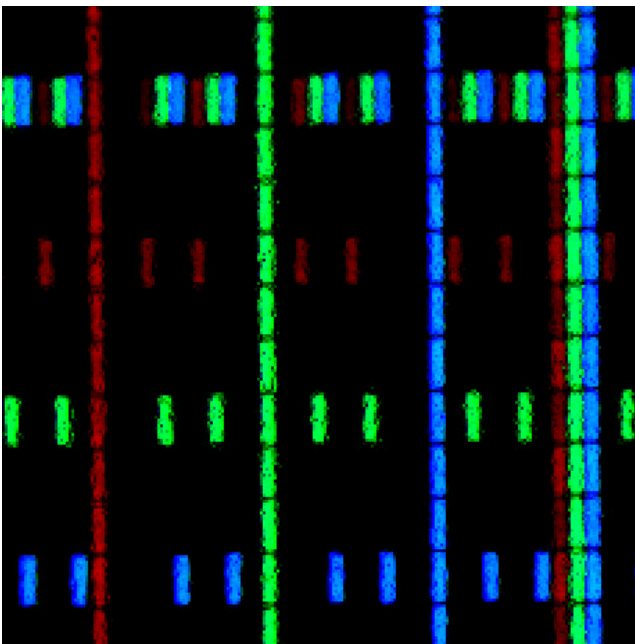


Bild 14: Pixelstruktur eines DSTN-Displays, aufgenommen mit Hilfe eines Mikroobjektivs

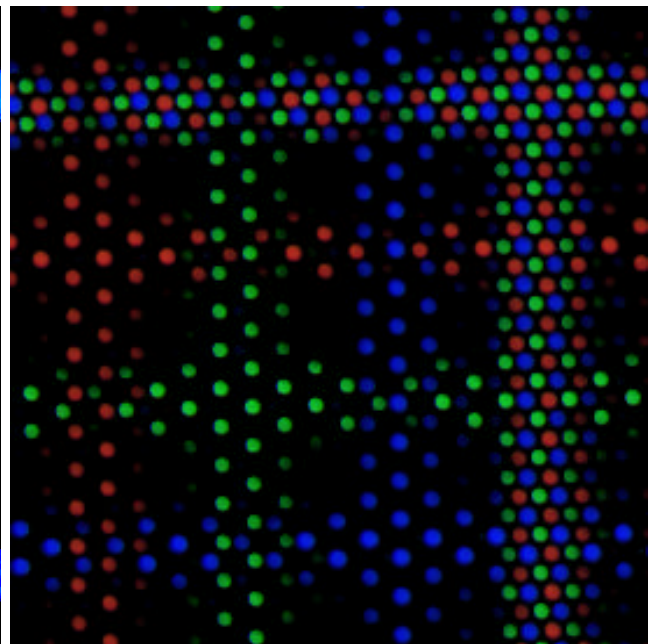


Bild 15: Pixelstruktur eines Computermonitors, aufgenommen mit Hilfe eines Mikroobjektivs

Die Gleichförmigkeit lässt sich mit der Leuchtdichtemesskamera LMK98 beurteilen. Mit diesem System können ortsaufgelöst Leuchtdichten erfasst werden. Durch die große Bandbreite der spektralen Zusammensetzung ist hier die $V(\lambda)$ -Anpassung sehr wichtig. Durch die bei der Vollfilterung begrenzten Möglichkeiten und durch die starken Chargenschwankungen werden f_1' -Kennwerte im Bereich 2.5 bis 4% erreicht. Wie Bild 16 zu entnehmen ist, reicht dies aber aus, um mit hoher Genauigkeit im gesamten durch den

Monitor darstellbaren Bereich zu messen. Wird eine SMK98 verwendet und die Matrizierung auf die Monitordarstellung angepaßt, ergeben sich die in Bild 17 dargestellten Meßfehler.

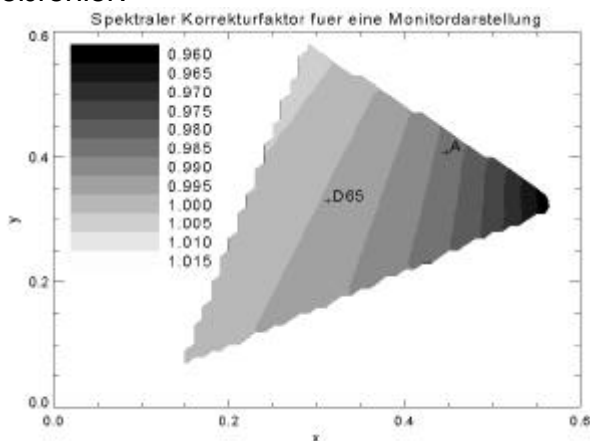


Bild 16: Notwendiger Korrekturfaktor, durch die spektrale Ausstrahlung bei Monitormessungen

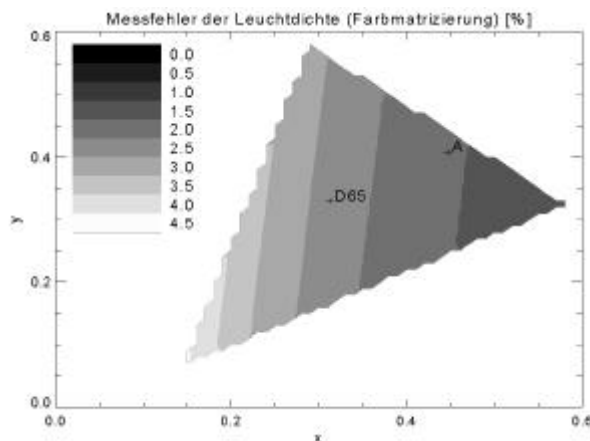


Bild 17: Meßfehler, durch die spektrale Bewertung bei optimaler Matrizierung

6 Anwendung

Für die Erfassung von Bildvorlagen unter bekannten Bedingungen (z. B. Druckvorlagen bei Tageslichtart D65) kann man mit Hilfe der oben abgebildeten relativen spektralen Empfindlichkeiten (Bild 6) und entsprechend optimierten Matrizierungen (siehe Gleichung (8)) Farbwiedergabeindizes (DIN6169 Teil 6) im Bereich von 85 erreichen. Das reicht für eine Darstellung allgemeiner Szenen aus, wobei zu bemerken ist, daß stets an die Beleuchtung angepaßt werden muß und daß die Abweichungen der Farbvalenzen bei sehr schmalbandigen Spektralreizen trotz entsprechender angepaßter Optimierungen relativ hoch bleiben.

6.1 Ortsaufgelöste Farbvergleiche

Die ortsaufgelöste 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.

6.2 HighDyn-Farbbilder

Die Farberfassung kann natürlich auch im Dynamikbereich hochauflösend sein. Das dazugehörige Vorgehen soll anhand der Erfassung des Spektrums einer HQI-Lampe dargestellt werden. Dieses Beispiel dient nur der Demonstration, da man Spektren mit Hilfe eines Spektrometervorsatzes im allgemeinen einer SW-Matrix erfaßt. Die Daten der HighDyn-Aufnahme werden ohne die Ortsentzerrung in RGB-Daten umgewandelt. Das heißt, die x-Achse ist nichtlinear verzerrt (Prismenspektrometer).



Bild 18: 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)

Bild 18 zeigt die Daten in verschiedenen Ansichten. Dabei werden die Daten so skaliert, daß die Farbart weitgehend erhalten bleibt und nur die Luminance auf mehrere Dekaden logarithmisch skaliert wird.

Bild 19 zeigt die Mikrostruktur eines TFT-Displays (senkrechte und waagerechte Linien, siehe Bild 13) in verschiedenen Ansichten, die für bestimmte Analyse oder Einstellaufgaben geeignet sind.

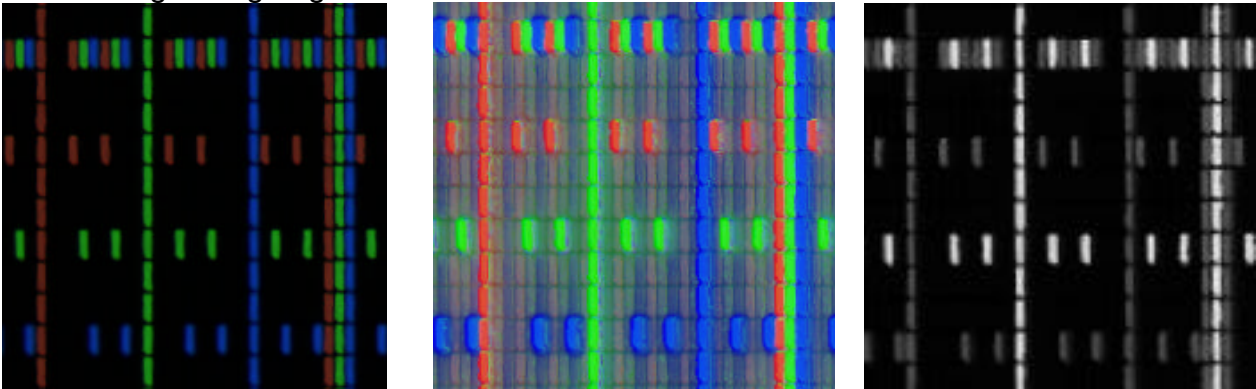


Bild 19: Mikrostruktur eines TFT-Displays (links linear skaliert, Mitte logarithmisch skaliert über 4 Dekaden, rechts Luminance (linear))

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:

- [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] 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)
- [3] Richter, M.: Einführung in die Farbmeterik, Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 1981, 2. Auflage
- [4] Luther, R.: Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik. Zeitschrift für techn Physik, Nr. 12, S.540-558, 1927
- [5] MAZeT: Ortsauflösende Farberkennung. Systeme 9/98, S. 74-77, (1998)
- [6] VS-RGB-GP: LIQUID CRYSTAL TUNABLE FILTER, <http://www.cri-inc.com>
- [7] Rieve, P.; Böhm, M.: Elektrisch steuerbare Farbsensoren. Proc. Bildverarbeitung '97, Forschen, Entwickeln, Anwenden; Herg.: R.-J. Ahlers, 26-28.11.1997, Esslingen, (1997)
- [8] Grafiken aus AGFA: Einführung in die digitale Fotografie, <http://www.agfastudio.com>
- [9] Lenz, R.: Digitale Farbkamera für die elektronische Fotografie. Patentschrift DE19702837C1, PD: 27.1.1997, (1997)
- [10] Schlichting, B.: Ein neues Konzept der Primärdatengewinnung bei Single-Chip-CCD-Farbkameras. 40. Internationales wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, Band 1, S. 557-562, 1995
- [11] Schmidt, F. ; Morgeneier, D., Schlichting, B.; Krüger, U.: Farbmeterische Bewertung von Mosaikfiltermatrizen für Einchip-CCD-Sensoren, 42. Intern. Wiss. Kolloq. D. TU Ilmenau, 22.-25.9.97
- [12] Krüger, U.: Ansätze für systemtheoretische Untersuchungen von Farbaufnahmesystemen mit CCD-Sensoren. Belegarbeit, Technische Universität Ilmenau, 1994
- [13] Sony: Datenblätter CCD-Komponenten. ICX085AK; über www.sony.com
- [14] 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)
- [15] Stokes, M.; Chandrasekar, S.: Standard Default Color Space for the Internet – sRGB, Version 1.10, 5. 11. 1996, <http://www.color.org/contrib/srgb.html>
- [16] ICC Profile Format Specification, International Color Consortium, Version 3.4, <http://www.color.org>
- [17] Wyszecki, G.; Stiles, W.S.: Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae, Second Edition, Wiley, New York, 1982
- [18] 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
- [19] Sharma, G.; Vrhel, M.J.; Trussell, H. J.: Color imaging for Multimedia. Proc. IEEE, vol. 86, no. 6, pp. 1088-1108, Jun. 1998