

Einsatz von Standard-CCD-Matrizen für fotometrische Messungen – Anwendung und Design von Kameras mit hoher Auflösung und Genauigkeit

Franz Schmidt, Udo Krüger¹

Zusammenfassung. Durch die Erfassung der Eigenschaften digitaler Standard-CCD-Kameras mit hoher Quantisierungsauflösung und durch den Einsatz entsprechender Korrekturalgorithmen lassen sich zahlreiche Aufgabenstellungen bei wissenschaftlich technischen Untersuchungen abdecken, bei denen bisher teure Spezialkameras verwendet werden mußten. Es werden Untersuchungsmethoden für digitale CCD-Kameras vorgestellt und deren Einsatzbereich für Anwendungen abgeschätzt, bei denen eine hohe orts aufgelöste fotometrische Auflösung gefordert wird.

1 Einführung

In zahlreichen Anwendungsbereichen der Bildverarbeitung, u.a. in der Astronomie, in der Mikroskopie und in der Lichtmeßtechnik werden Spezialkameras eingesetzt, um hohe orts aufgelöste fotometrische Auflösungen zu erzielen. Der enorme technologische Fortschritt der letzten Jahre hat zu Spezialsystemen geführt, die durch Einsatz von Kühlsystemen, schneller und hochgenauer Schaltungstechnik, erhöhten Orts- und Quantisierungsaufösungen, Oberflächenvergütungen und Bildverstärkern in Anwendungsbereiche vordringen, für die der Einsatz von CCD-Technik bisher undenkbar war. (u.a. [PRI94])

Neben diesen wissenschaftlichen CCD haben heute auch Standard-CCD (Videotechnik, Multimedia) einen technologischen Stand erreicht, um sie in hochwertigen Bilderfassungssystemen (z.B. bild aufgelöstes Messen von Licht) einsetzen zu können.

Die notwendige Stabilität der Parameter der Bildaufnahmesysteme kann durch

- **Stabilisierung der Kameras** (Thermostatisierung),
- **Verringerung störender Parameter** (z.B. Verringerung des Dunkelsignals durch Kühlung) oder
- **Korrektur** der erfaßten Bildsignale erfolgen. Dazu ist aber die exakte Kenntnis aller Eigenschaften der eingesetzten Bauelemente, bevorzugt der CCD erforderlich.

2 Übergang von der Analog- zur Digitalkamera

Die bisher hauptsächlich eingesetzte Kameraschnittstelle zu Auswertesystemen ist das analoge Videosignal in TV-Norm, das für die Anwendungen der Bildverarbeitung im Auswertesystem digitalisiert wird.

Sowohl in der Multimediatechnik als auch in der industriellen Bildverarbeitung werden zunehmend Digitalkameras eingesetzt. Die Bilddatenübertragung erfolgt in der Multimediatechnik auf seriellen standardisierten Bussystemen (USB, fire-wire), in der industriellen Bildverarbeitung vielfach noch auf parallelen Datenwege. Die Datenübernahme in die Verarbeitungssysteme (PC, Embedded systems) kann aufgrund der Busbandbreiten (z.B. PCI-Bus) ohne Bildzwischenspeicher erfolgen.

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.

¹ TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ehrenbergstraße 11, D-98693 Ilmenau

3 Erhöhung der Quantisierungsauflösung

In der digitalen Bildverarbeitung werden im allgemeinen 8-Bit-Bilddaten verwendet. Die Autoren setzen z.B. für Anwendungen in der Leuchtdichtemeßtechnik Kameras vom Typ Kappa CF8/4DX mit 8 Bit Quantisierungsauflösung ein. Durch die Verbesserung der CCD-Matrizen und der Kameraschaltungstechnik ist bei der genannten Kamera das Quantisierungsrauschen des ADU die begrenzende Rauschkomponente. Die weiteren Rauschkomponenten (Photonenrauschen, Elektronikrauschen, ...) sind in diesem Fall wesentlich kleiner. Das hat zur Folge, daß sich die Auswertegenauigkeit durch örtliche oder zeitliche Mittelwertbildung nicht mehr erhöhen läßt, da das Rauschen über die Quantisierungsstufen nicht als gleichverteilt angenommen werden kann und das Digitalsignal damit eine andere Statistik aufweist als das Rauschsignal vom CCD-Chip.

Abb. 1 zeigt z.B. das Histogramm eines über viele Dunkelbilder gemittelten Datensatzes für die Integrationszeit von 8 ms (siehe Abb. 13). In den Bilddaten ist die örtliche Ungleichförmigkeit DSNU, das Dunkelsignalrauschen und das Digitalisierungsrauschen enthalten. Das Dunkelsignal kann korrigiert werden (siehe 4.1.2.), solange der Erwartungswert des Dunkelsignals für jeden einzelnen Bildpunkt in einer „Belehrungsphase“ exakt bestimmt und

während der Messung erwartungswerttreu (mittelwertfrei) subtrahiert werden kann. Genau hier liegt aber das Problem: Das Rauschen der Kamera ist so gering, daß nach der Analog-Digital-Wandlung dieser Mittelwert nur noch fehlerhaft bestimmt werden kann. Man sehe folgende Prinzipzeichnung:

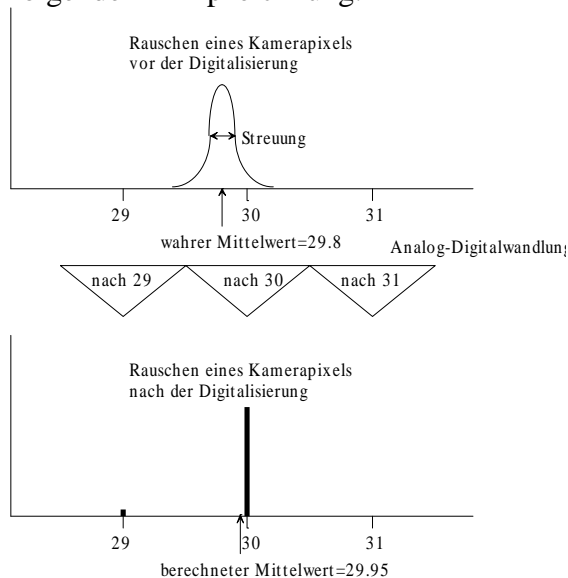


Abb. 2: Dunkelsignalrauschen und Mittelwert vor und nach Digitalisierung

ansetzen und hat keine Chance, den im ADU gemachten Fehler zu korrigieren, da die Information über die wahre Lage des Pixelgrauwerts einfach nicht mehr zugänglich ist.

Neben der Betrachtung des ADU als idealem Bauelement mit seinem Einfluß auf das Signal durch das gleichverteilte Digitalisierungsrauschen von $[-1/2 \text{ LSB}, \dots, +1/2 \text{ LSB}]$ sind auch seine nichtidealen Eigenschaften wichtig.

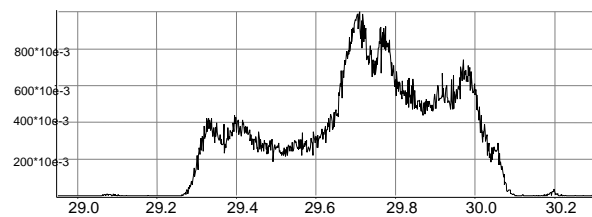


Abb. 1: Histogramm des gemittelten Dunkelbildes (Das Histogramm erstreckt sich etwa über einen Grauwert bei einer 8-bit-Digitalisierung)

Im oberen Teil wird die Grauwertverteilung gezeigt, die eine konstante Beleuchtungsstärke in einem Bildpunkt erzeugt (Mittelwert plus Streuung durch Poisson- und Elektronikrauschen). In unserem Fall beträgt die Streuung ca. 0.2 Grauwerte.

Vom Analog-Digital-Wandler wird jeweils ein kleiner Bereich auf einen einzigen digitalen Grauwert abgebildet.

Im unteren Teil wird die Grauwertverteilung nach der Wandlung gezeigt. Im betreffenden Fall werden überwiegend Grauwerte vom Wert 30 gebildet. Eine Mittelung über diese digitalen Werte liefert ein anderes Ergebnis als es der Mittelwert der analogen Grauwerte war.

Ein Dunkelstromkorrekturverfahren kann im Bild erst nach der Analog-Digital-Wandlung

Die differentielle Nichtlinearität (DNL) ist ein Maß für die unterschiedliche Breite der einzelnen Code-Stufen. Die DNL führt zu einer integralen Nichtlinearität (INL) der Wandlerkennlinie, die aus der DNL berechnet werden kann.

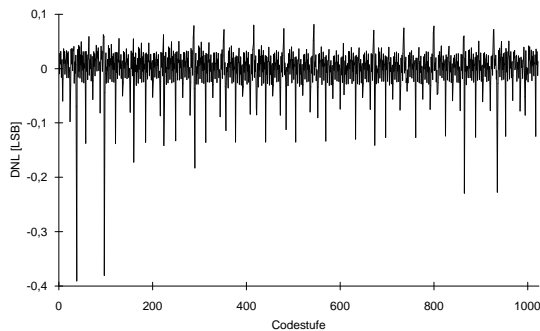


Abb. 3: Differentielle Nichtlinearität des A/D-Wandlers (ca. 560.000.000 Abtastwerte)

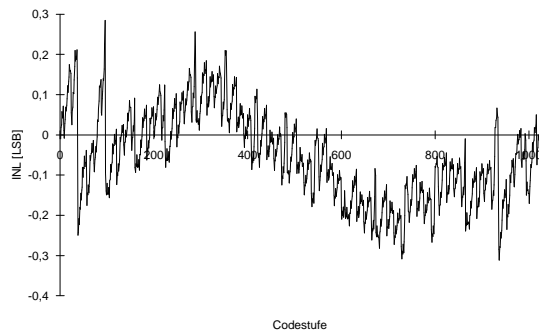


Abb. 4: Integrale Nichtlinearität des A/D-Wandlers

In Abb. 3 und Abb. 4 sind die differentielle und die integrale Nichtlinearität für einen 10-Bit-A/D-Wandler dargestellt. Deutlich sichtbar ist die Periodizität der Nichtlinearitäten, was auf die Pipeline-Struktur des ADU, aber auch auf eine instabile Betriebsspannung und Rückkopplungen des digitalen Ausgangs auf den Wandlereingang zurückzuführen sein kann. Tests haben gezeigt, daß insbesondere in Spannungsbereichen, in denen mehrere Digitalausgänge umschalten, verschiedene ADU zum Schwingen der Schaltung neigen.

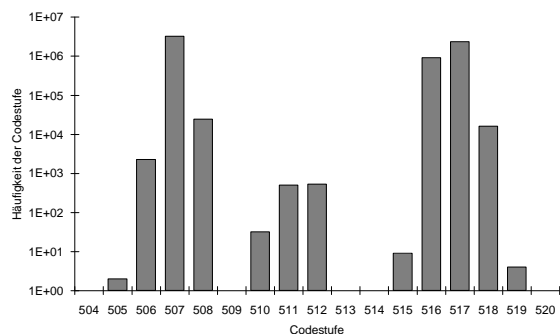


Abb. 5: Histogramm für einen kritischen Spannungszustand

Abb. 5 zeigt dieses Verhalten für eine Gleichspannung (direkt am A/D-Wandler) für den digitalen Wert 512 eines 10-Bit-ADU. (Diese Zustände treten im normalen Kamerabetrieb nicht auf, da hier das Rauschen der Eingangselektronik zu wesentlich breiter gestreuten Eingangssignalen führt.)

Die sehr geringen Rauschleistungen der 8 Bit Version und die angeführten Probleme beim Einfluß der A/D-Umsetzung auf die Signalstatistik legten eine Erhöhung der Quantisierungsauflösung auf 10 Bit auch bei Anwendung von Standard-CCD-Chips nahe.

Die Untersuchungsergebnisse der 10 Bit-Version der oben genannten Kamera, die im weiteren vorgestellt werden, zeigen, daß die Erhöhung der Auflösung voll ausnutzbar ist und daß ggf. mit weiter verbesserter Schaltungstechnik für bestimmte Anwendungen eine 12-Bit-Version erfolgreich einsetzbar wäre.

4 Eigenschaften der untersuchten Standard-CCD-Matrizen

Die im folgenden erläuterten Untersuchungen beschreiben Effekte, die zur Begrenzung der fotometrischen Auflösung führen. Hier sind insbesondere die DSNU (dark signal nonuniformity), die PRNU (photo response nonuniformity), die verschiedenen Rauschkomponenten (Photonenrauschen, Ausleserauschen, ...), das Shading der Matrix und die Nichtlinearität zu nennen. Auf einige Aspekte wird im weiteren genauer eingegangen.

Soll ein Kamerasystem für genaue fotometrische Messungen eingesetzt werden, müssen zuerst die grundlegenden Systemeigenschaften ermittelt werden.

4.1 Dunkelsignaleigenschaften

Im folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften des Dunkelsignals beschrieben. Neben der Ausprägung des Wertes spielen für die Korrekturalgorithmen auch die örtliche und die zeitliche Statistik eine wesentliche Rolle.

4.1.1 Defektpixelbild (WarmPixel)

Bevor die DSNU und das Dunkelsignal selbst bestimmt werden können, müssen auffällige Pixel ermittelt werden, die ein stark erhöhtes Dunkelsignal aufweisen und damit die Statistik verfälschen. Diese Pixel werden „WarmPixel“ oder Defektpixel genannt. Die Bestimmung dieser Bildpunkte kann durch Erwärmung der Matrix und Aufnahme eines Bildes bei normalen Integrationszeiten erfolgen oder durch die Erfassung eines Bildes bei Langzeitintegration (mehrere Minuten). In den so aufgenommenen Bildern heben sich die Grauwerte dieser Bildpunkte deutlich vom Rest ab, so daß eine Erfassung sehr einfach möglich ist. Die so ermittelten Bildpunkte werden bei allen weiteren Berechnungen nicht verwendet. Für die Standardmatrizen von Sony werden mit diesem Verfahren ca. 0,3 bis 0,6 % der Bildpunkte als Defektpixel markiert.



Abb. 6: Defektpixelbild (alle als defekt markierten Punkte wurden schwarz dargestellt)

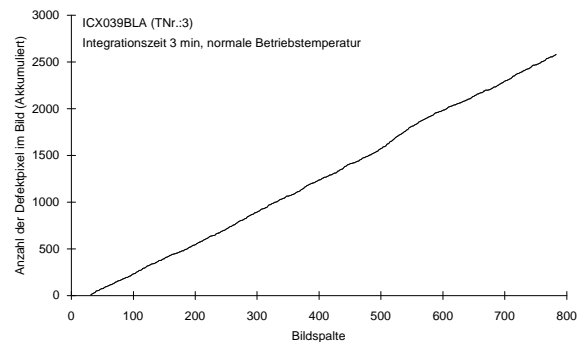


Abb. 7: Anzahl der Defektpixel für eine Matrix, akkumuliert über die Bildspalten

Aus Abb. 7 ist zu erkennen, daß die Defektpixel über die Spalten relativ gleich verteilt sind.

4.1.2 Dunkelsignal

Für die Beurteilung des Dunkelsignals und der Dunkelsignalgenerationsrate wird das Dunkelsignal ohne Referenzwerte bzw. nur mit einmaliger Anbindung betrachtet (siehe 4.1.4). Es können so Aussagen über die Abhängigkeit des Dunkelsignals von der Integrationszeit gewonnen werden, die bei der Dunkelsignalkorrektur für Aufnahmen mit Langzeitintegration eine wesentliche Rolle spielen. Zu beachten ist weiterhin, daß das Dunkelsignal auch von der Betriebstemperatur in der Kamera abhängt.

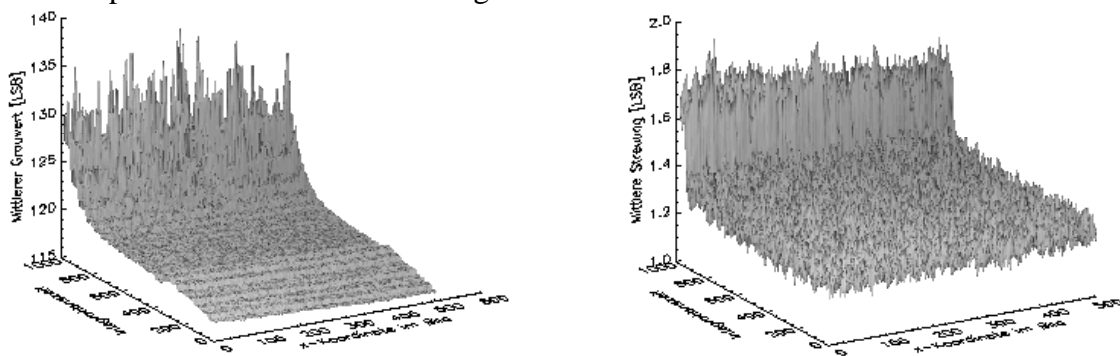


Abb. 8: Dunkelsignal bei verschiedenen Integrationszeiten (Mittelwert und Streuung (zeitlich ohne Referenz)) ohne Eliminierung der Defektpixel

In Abb. 8 werden Ausschnitte aus Dunkelbildern (links) und deren zeitliche Streuung (rechts) für verschiedene Integrationszeiten (0,1 ms bis 80 s) von vorne nach hinten aneinandergereiht. Aus jedem Bild wurde ein Ausschnitt von 50 Zeilen verwendet. Die Integrationszeit wurde von Abschnitt zu Abschnitt verdoppelt. Die Entwicklung der Dunkelsignalparameter kann anhand dieser Grafiken sehr gut beurteilt werden.

Bei einer Substratspannung von 5 V kann mit einer Dunkelsignalgenerationsrate von ca. 0,1 LSB/s ($5 e^-/s$) gerechnet werden. Für Integrationszeiten kleiner 40 ms müssen noch die Effekte aus 4.1.5 beachtet werden.

4.1.3 Dunkelsignalungleichförmigkeit (DSNU)

Bei der DSNU (und auch bei der später betrachteten PRNU) wird zwischen einer nieder- und einer hochfrequenten Komponente (Ortsfrequenzen) unterschieden. Auf die Ursachen und Korrekturmöglichkeiten der niederfrequenten DSNU-Anteile soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

Die DSNU kann als örtliche Streuung im Dunkelsignal aufgefaßt werden, wobei durch zeitliche Mittelwertbildung das zeitliche Rauschen eliminiert wird.

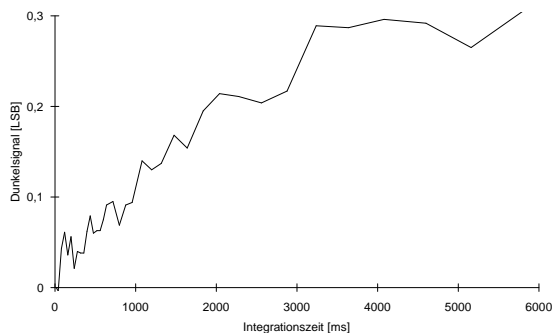


Abb. 9: Veränderung des Dunkelsignals (Bezugspunkt 0 bei 40ms) in Abhängigkeit von der Integrationszeit

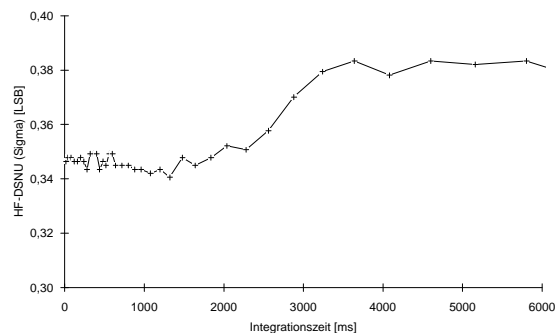


Abb. 10: Veränderung der DSNU in Abhängigkeit von der Integrationszeit

Die dargestellten Verläufe des Dunkelsignals zeigen, daß das Dunkelsignal mit entsprechenden Korrekturalgorithmen auf ca. 0.1 LSB ($5 e^-$) genau ermittelt und für weitere Berechnungen berücksichtigt werden kann (Abb. 9 und Abb. 10).

4.1.4 Dunkelsignalreferenz

Neben der DSNU, mit der die Unterschiede im Dunkelsignal zwischen den Pixeln beschrieben werden (sogenannte HF-Komponente der DSNU), wird zur Kompensation des Temperaturganges und anderer zeitlich niederfrequenter Einflüsse das zur Auswertung verwendete Bildsignal an den Mittelwert einer abgedeckten Spalte (Abb. 11) angebunden, d.h., es wird nur die Differenz des aus dem Pixel ausgelesenen Grauwertes zum Mittelwert der Referenzspalte ausgewertet.

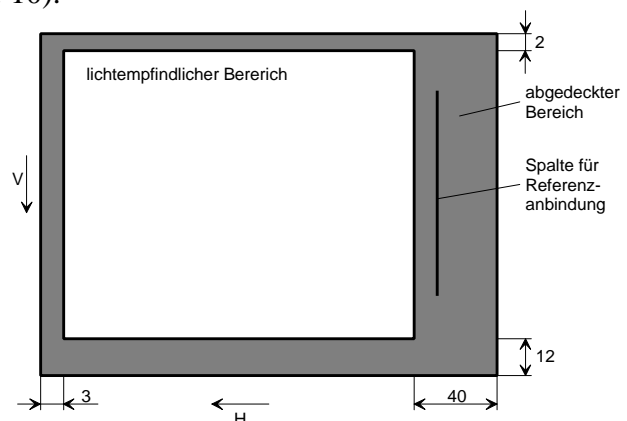


Abb. 11: Pixelanordnung auf einer Matrix [SONYA]

Die Mittelwertbildung muß unter Ausschluß der Defektpixel über eine Spalte erfolgen, die sich thermisch wie die nichtabgedeckten Pixel verhält und deren Abdeckung bei Lichteinwirkung sehr wirksam ist. Diese Referenzspalte muß für jede verwendete Matrix durch umfangreiche Messungen bestimmt werden. Dafür eignen sich insbesondere abgedeckte Spalten nach dem Bildende. Es hat sich allerdings gezeigt, daß die Abdeckung der Pixel nicht immer

ausreichend für die Referenzanbindung ist und daher die Matrizen für Meßzwecke u.a. über dieses

Kriterium ausgesucht werden müssen. Die Referenzanbindung auf eine Spalte am Bildende ist auch deshalb notwendig, weil Kameras, die mit Zeilenklemmung arbeiten, unter anderem hardwareseitig auf Bildspalten vor dem Bildanfang klemmen. Die Zeilenklemmung führt im digitalisierten Bild zu nicht mehr korrigierbaren Fehlern.

Bei weiterentwickelten Kameras werden die notwendigen Referenzwerte in der Kamera über Digital-

Analog-Umsetzer (DAC) vom Auswertesystem einstellbar gestaltet, da nur so der volle Dynamikbereich der Verstärker über den gesamten Arbeitstemperaturbereich ausnutzbar ist. Damit treten keine Zeilenklemmfehler mehr auf (Abb. 12).

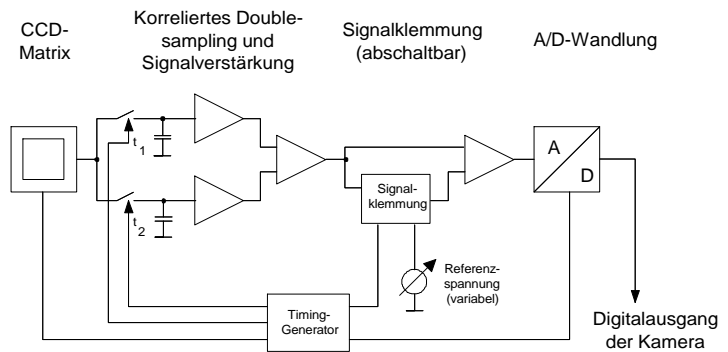


Abb. 12: Prinzipschaltbild der Signalverarbeitung zwischen CCD-Matrix und ADU in einer Digitalkamera

4.1.5 Dunkelsignal bei Kurzzeitintegration

Im Shuttermode, d.h. bei Kurzzeitintegration ($T_{\text{int}} = 100 \mu\text{s}$ bis 16,6 ms), findet die Integration kurz vor dem Auslesen der Ladungen statt. In der Zeit davor werden nach jeder Zeile über einen Shutterimpuls die akkumulierten Ladungen über das Substrat abgesaugt (Timinggenerator CXD 1255). Dieser Vorgang stellt eine außerordentliche Belastung für die Stromversorgung der Kamera dar und führt dazu, daß sich die Potentiale in der Kamera etwas verändern. Als Resultat entsteht im Dunkelsignal eine Stufe von ca. 1 LSB (Abb. 13 - 15).

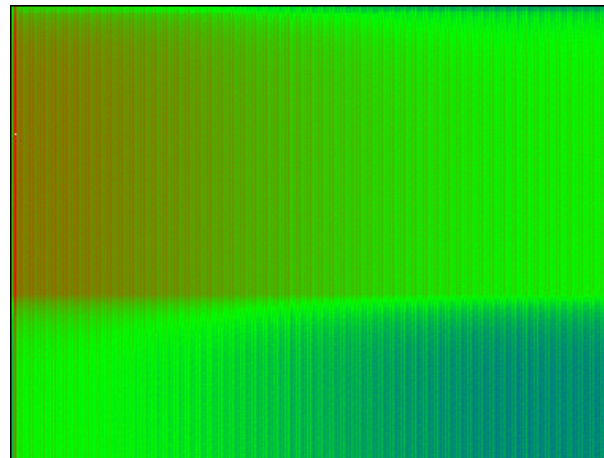


Abb. 13: Dunkelbild mit Stufe (Grauwertunterschied 1 LSB)

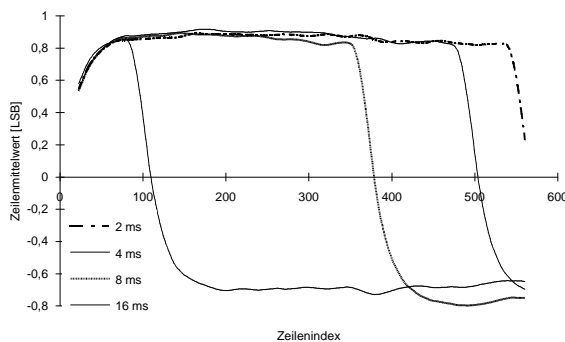


Abb. 14: Projektionen des Bildes aus (Abb. 13) in Zeilenrichtung für verschiedene Shutterzeiten

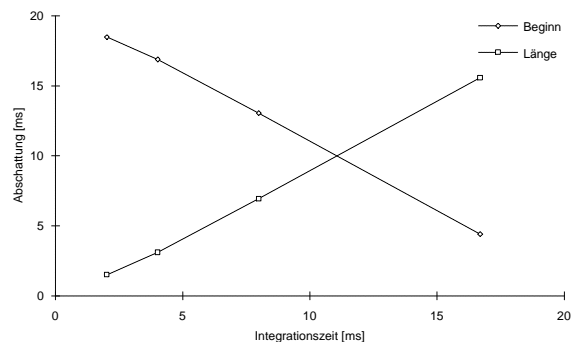


Abb. 15: Abschattungslängen und Integrationszeit

4.2 Systemübertragungsfaktor

Nachdem die Dunkelsignaleigenschaften bestimmt wurden und die Liste der Defektpixel vorliegt, kann eine weitere wesentliche Eigenschaft des Kamerasystems bestimmt werden - der Systemübertragungsfaktor k . Dieser Faktor beschreibt die Anzahl Elektronen auf der Matrix,

die durch ein Digit (auch mit DN - digital number oder LSB - least significant bit bezeichnet) repräsentiert werden. Dieser Faktor gestattet in Verbindung mit den eingestellten ADU-Schwellwerten bzw. durch Bezug auf Standardschwellwerte eine einheitliche Bezugsbasis aller Berechnungen und eine eindeutige radiometrische Anbindung des Systems. Damit lassen sich die Eigenschaften verschiedener Systeme vergleichen.

Zur Bestimmung des Systemübertragungsfaktors k wird die Photonen-Transfer-Methode angewendet [JANE94,SCHM97,KRÜ98].

Den Systemübertragungsfaktors k kann man in Verbindung mit einer Linearitätsmessung, bei der man die Integrationszeit variiert, ermitteln. Für die verschiedenen bei der Variation der Integrationszeit entstehenden Streuungen wird dann eine Regressionsrechnung durchgeführt. Mit dem Ergebnis (Faktor k – Abb. 16, Abb. 17) kann dann die Sättigungselektronenzahl bestimmt und alle weiteren Berechnungen können in e^- angegeben werden.

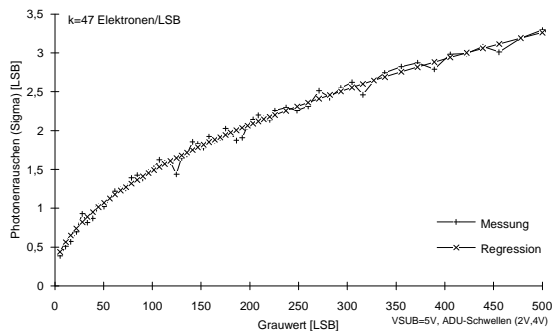


Abb. 16: Meßwerte und Regressionsfunktion zur Bestimmung des Systemübertragungsfaktors k

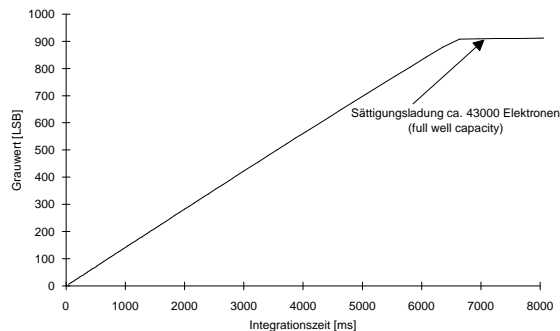


Abb. 17: Bestimmung der Sättigungsladung mit einer Linearitätsmessung durch Integrationszeitsteuerung ($V_{Sub} = 5V$)

4.3 Hellsignaleigenschaften

4.3.1 Hellsignalungleichförmigkeit (PRNU)

Die PRNU ist ein Maß für die unterschiedliche Empfindlichkeit der Pixel einer Matrix. Wie bei der DSNU kann auch bei der PRNU zwischen einem hochfrequenten und einem niederfrequenten Anteil, der örtlichen Streuung und dem Shading, unterschieden werden.

Die PRNU kann als örtliche Gesamtstreuung in einem Fenster ($M \times N$ Bildpunkte) aufgefaßt werden, wobei die verschiedenen Rauschursachen nicht unterschieden werden.

Bei der Bestimmung der PRNU muß eine Beleuchtungsanordnung zu Verfügung stehen, die eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung des Sensors garantiert. Da dies praktisch nur mit großem Aufwand zu realisieren ist (z.B. Ulbrichtsche Kugel), wird die HF-Komponente der PRNU in kleineren Feldern bestimmt.

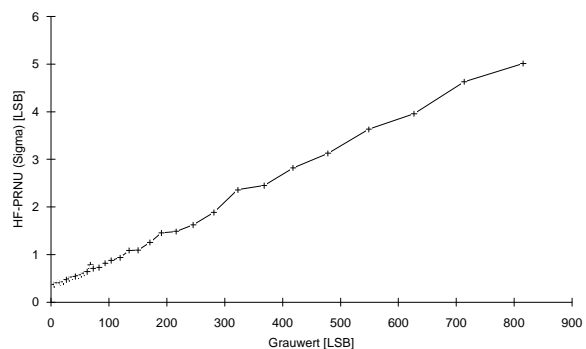


Abb. 18: HF-Komponente der PRNU für verschiedene Integrationszeiten

4.3.2 Nichtlinearität

Die mögliche fotometrische Genauigkeit wird wesentlich durch die Nichtlinearität der gesamten Anordnung (CCD, Kameraelektronik, A/D-Wandlung) bestimmt. Die CCD-Matrix ist auf Grund ihres Funktionsprinzips ein lineares Bauelement. Durch geeignete Auslegung der weiteren Komponenten kann eine lineare Übertragungskennlinie erreicht werden.

Die Bestimmung der Kennlinie kann prinzipiell auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

1. Variation des Lichtes und Bestimmung der Grauwertveränderung bei konstanter Integrationszeit
2. Variation der Integrationszeit bei konstantem Licht

Die Variante 1 ist sehr schwer zu realisieren, da das Licht, das von der CCD-Matrix erfaßt wird, mit einem anderen Meßgerät bestimmt werden muß, dessen Meßfehler die Genauigkeit begrenzt. Des weiteren darf das Licht nur über eine Blende verändert werden, da bei der Veränderung der Spannung an der Lampe sich die spektrale Verteilung des Lichtes ändert.

Mit Hilfe der Variante 2 läßt sich die Kennlinie, unter der Voraussetzung bekannter Integrationszeiten, sehr genau bestimmen. Man stellt mit Hilfe einer geeigneten Beleuchtungseinrichtung das auf die Matrix treffende Licht so ein, daß für die gewünschte Startintegrationszeit der Dunkelstrom nur leicht überschritten wird. Dann wird die Integrationszeit in kleinen Stufen erhöht, bis die Matrix in die Sättigung geht. Das Licht wird dabei nicht verändert. Für jede Einstellung wird der mittlere Grauwert in einem geeigneten Bildbereich bestimmt.

Zur Bestimmung der Kennlinie wird aus den so erhaltenen Meßwerten eine Regressionsgerade gebildet (Grauwert über Integrationszeit). Die Messungen ergaben einen Linearitätsfehler (mittlere quadratische Abweichung) von 0,2% (ca. 2 LSB) bei einem Aussteuerbereich von 850 LSB. Der maximale Fehler am Ende des Aussteuerbereiches beträgt dabei 6 LSB.

Bei bekannter Übertragungskennlinie kann die verbleibende Nichtlinearität über eine Look-Up-Table (LUT) korrigiert werden, so daß der Restfehler noch erheblich kleiner wird. Wesentlichen Einfluß auf die Kennlinie haben die Betriebsbedingungen der Matrix. Hier ist insbesondere die Substratspannung zu nennen. Der vom Hersteller Sony in den Datenblättern angegebene Wert ist für Anwendungen, die eine lineare Kennlinie benötigen, nicht geeignet. Messungen an einer Matrix, für die Sony eine Substratspannung von

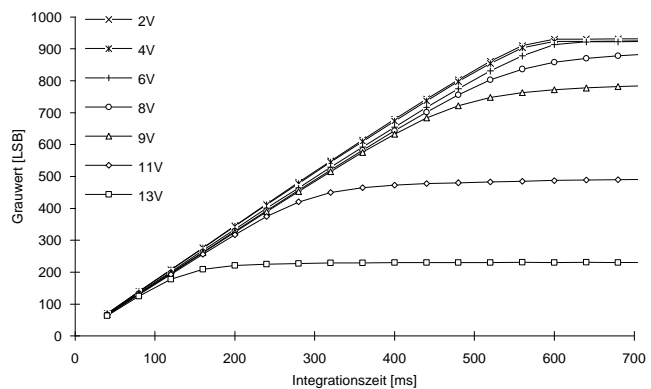


Abb. 19: Übertragungskennlinie für verschiedene Substratspannungen

11 V vorgibt, ergaben die in Abb. 19 dargestellten Kennlinien.

Es ist deutlich zu erkennen, daß bei der kleinsten möglichen Substratspannung die beste Ausgangskennlinie erzielt werden kann. Die Ursache für dieses Verhalten konnte noch nicht geklärt werden.

Die vorgestellten Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der DSNU und der PRNU ergeben unter normalen Arbeitsbedingungen der Kamera (thermisches Gleichgewicht ohne Kühlung bei 20°C Umgebungstemperatur) exemplarisch die in Tabelle 1 genannten Werte²:

Dunkelsignal		Hellsignal (bei Grauwert 500)	
zeitliches Rauschen	$\sigma = 70 e^-$	zeitliches Rauschen	$\sigma = 150 e^-$
Ungleichförmigkeit	$\sigma = 16,5 e^-$	Ungleichförmigkeit	$\sigma = 150 e^-$
	(bei Integrationszeiten < 2 s, 128x128 Pixel-Fenster)		
Generationsrate	$5 e^-/s$		

Tabelle 1

² Alle Daten werden in Elektronen angegeben (Substratspannung 5 V, ADU-Schwellen (2 V, 4 V)). Für den digitalen Signalraum entspricht 1 LSB (10 Bit Quantisierungsauflösung) 1 mV Ausgangsspannung an der Matrix (etwa 47 Elektronen). Dabei ist die Signalverstärkung (Gain) auf Minimum eingestellt.

5 Spektrale Eigenschaften

Für viele Einsatzfälle ist die Kenntnis der spektralen Empfindlichkeit der eingesetzten Sensoren notwendig (um sie mit vorgesetzten Filtern zu korrigieren (z.B. zur Lichtmessung), oder in die Ermittlung abgeleiteter Signalwerte einzubeziehen (z.B. Einsatz in Spektrometern)). Die Erfassung der spektralen Charakteristika der CCD-Bauelemente ist nicht ganz unproblematisch, erfordert neben hochwertiger Meßtechnik auch eine sorgfältige Ver-

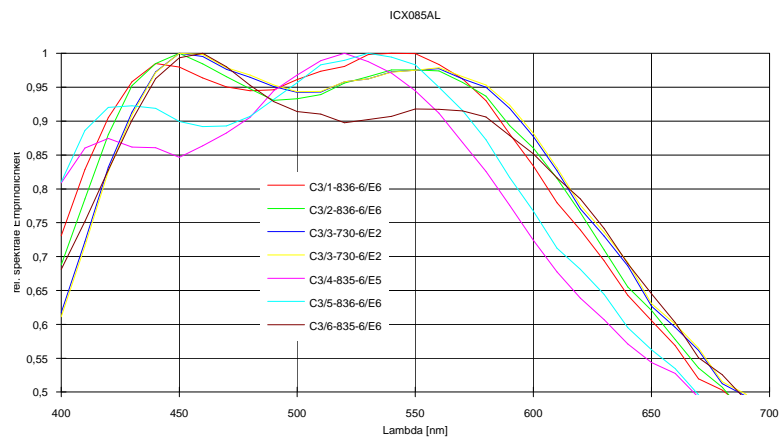


Abb. 20: Spektrale Empfindlichkeiten unterschiedlicher Exemplare von CCD-Matrizen eines Typs ICX 085 AL

suchsplanung und -durchführung. Unsere Messungen haben ergeben, daß die spektralen Empfindlichkeiten von CCD-Matrizen, selbst aus dem gleichen Produktionszeitraum erhebliche

Unterschiede aufweisen können (Abb. 20). Auch bei mit Mikrofiltern angepaßten CCD-Matrizen (Einchip-Farbmatrizen) ergeben sich beachtliche Unterschiede (Abb. 21). Für die Video- und Multimedia-technik sind die Unterschiede sicher nicht gravierend aber für alle hochwertigen Systeme zu beachten.

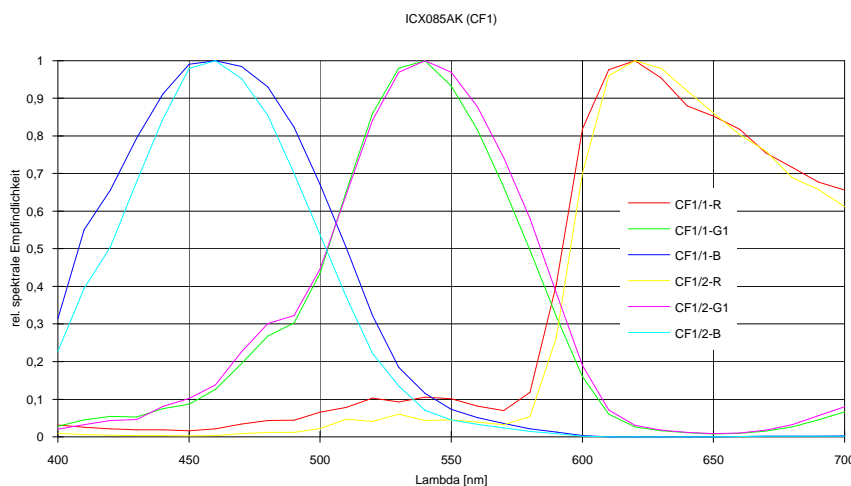


Abb. 21: Streuung der spektralen Empfindlichkeiten von Einchipfarbmatrizen (zwei Exemplare vom gleichen Typ ICX 085 AK)

6 Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, daß sich auch mit Standard-CCD-Matrizen in Verbindung mit entsprechender Kameraelektronik und dem Wissen über bestimmte Effekte, die hier nur auszugsweise erläutert werden konnten, sehr hohe fotometrische Auflösungen erzielen lassen.

Neben einer sehr sorgfältigen Kameraeinstellung und der Überwachung der Betriebsbedingungen sind die Meß- und Korrekturalgorithmen von entscheidender Bedeutung. Die Erfassung der auftretenden Effekte ist dabei die Voraussetzung für die Entwicklung geeigneter Algorithmen.

Damit sind Kamerasysteme möglich, die mit Standard-CCD-Matrizen bei der Vermessung statischer Objekte orts aufgelöste fotometrische Dynamikumfang³ von 1:10⁵ bis 1:10⁶ realisieren, wobei die Ortsauflösung nur um den Faktor 2 bis 4 gegenüber der Originalauflösung reduziert wird, d.h. es stehen mit einer Messung 25000 bis 100000 fotometrische Meßwerte zur Verfügung.

Durch die Firma TechnoTeam werden auf der Basis der Kameras CF8/4DX (Sensor ICX039 in 8-Bit- bzw. 10-Bit-Version) und DX3 (Sensor ICX085 10-Bit)(Hersteller Kappa messtechnik GmbH) die Systeme LMK96 / LMK98 (Leuchtdichtemeßkameras) angeboten. Bei diesen Systemen werden unter anderem die hier beschriebenen Effekte korrigiert, so daß sehr genaue orts aufgelöste fotometrische bzw. radiometrische Messungen möglich sind. Auf der Basis einer eigenen Kameraentwicklung von TechnoTeam (DigiCam – 8 Bit) stehen sehr kleine digitale Kameras mit verschiedenen Interfacekomponenten zur Verfügung, die in Industrieapplikationen bzw. in Applikationen der Lichtmeßtechnik mit geringerem Dynamikumfang eingesetzt werden können.

Durch die Weiterentwicklungen von Kamera und Algorithmen werden in Zukunft die Stabilität und die absolute Genauigkeit der Ergebnisse weiter verbessert werden können. Weitere Informationen findet der interessierte Leser unter <http://www.technoteam.de> bzw. <http://www.kappa.de>.

Literaturquellen:

- [ANALA] Analog Devices: Datenblätter. AD876; über www.analog.com
- [JANE94] Janesick, J.R.: Charge-Coupled Devices, Cameras, and Applications. University of California, Los Angeles University Extension Department of Engineering, Information Systems, and Technical Management, Short Course Program, Oct. 31-Nov. 2., 1994
- [KREß89] Kreß, D.: Angewandte Systemtheorie. Verlag Technik Berlin, 1989
- [KRÜ98] Krüger, U.; Schlichting, B.; Schmidt, F.; Weyh, St.: Digitale CCD-Kameras mit hoher Quantisierungsauflösung – Analyse und Design; Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 1998
- [PRIC94] N.N.: High Performance CCD Cameras. Princeton Instruments Inc., Quakerbridge Road, Trenton, N.J., USA, 1994
- [SCHM93] Schmidt, U.: Ein Beitrag zur Systemtheoretischen Bewertung von CCD-Bildaufnahmesystemen. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diss., 1993
- [SCHM97] Schmidt, U.: Einige ausgewählte Möglichkeiten zur Bewertung von CCD-Systemen. Vortrag, Framos CCD-Forum, München, 1997
- [SONYA] Sony: Datenblätter CCD-Komponenten. ICX039BLA/BNA/DLA/DNA; CXA1310; CXD1255 ; über www.sony.com
- [WEYH97] Weyh, S.: Untersuchung zum Verhalten an einer 10-bit-Digitalkamera., Technische Universität Ilmenau, Studienjahresarbeit, 1997

³ Die hier genannten Werte beschreiben die Grenzen der elektronischen Komponenten und der Auswertung. In der Praxis werden der photometrische Dynamikumfang und die Auflösung in der Regel auch bei Einsatz von entsprechenden Spezialobjektiven durch das Streulicht in den optischen Komponenten begrenzt.