

Digitale CCD-Kameras mit hoher Quantisierungsauflösung Analyse & Design

Franz Schmidt, Stephan Weyh, Bernd Schlichting¹, Udo Krüger²

Technische Universität Ilmenau, Fakultät E/I, ATE, PF 100565, D-98684 Ilmenau

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 photometrische 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 photometrische 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])

Die Zielstellung der Autoren besteht darin, die großen Fortschritte in der Qualität von Standard-CCD-Technik im TV-Bereich bzw. in letzter Zeit auch im Bereich erhöhter Auflösungen durch progressive Scan-Matrizen auszunutzen, um preiswerte Systemlösungen für viele Spezialanwendungen anbieten zu können. Dabei ist insbesondere an Anwendungen gedacht, die sehr hohe photometrische Auflösungen erfordern, die nur zum Teil mit geringerer Ortsauflösung einhergehen.

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. 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

¹ Kappa messtechnik GmbH, Kleines Feld 6, D-37130 Gleichen

² TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ehrenbergstraße 11, D-98693 Ilmenau

erzielt wird. Mit dieser Qualitätsverbesserung können weitere Anwendungsgebiete erschlossen werden, die eine erhöhte Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Bilddaten erfordern.

Die Ausführung der Digitalkamera kann mit und ohne Bildspeicher erfolgen. Beim Einsatz eines Speichers in der Kamera können die Erfassungskomponenten für das digitale Bildsignal im Auswertesystem sehr einfach gestaltet werden, und es kann das aktuell gespeicherte Bild auch bei Langzeitintegration (Integrationszeiten > 40 ms) in Videonorm visualisiert werden.

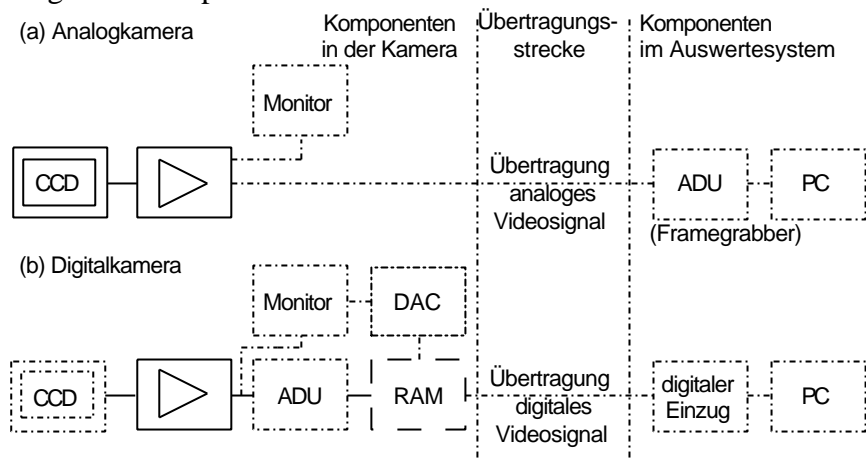


Abb. 1: Anordnung der Komponenten in einem System mit (a) analoger Signalübertragung bzw. (b) mit digitaler Signalübertragung

Nachteilig wirken sich der erhöhte Leistungsbedarf der Kamera und die damit verbundene Wärmeentwicklung aus. Mit der heute verfügbaren PC-Technik kann der Speicher in der Kamera und die online Visualisierung für die meisten Anwendungen entfallen, da der PC diese Aufgaben mit übernehmen kann.

3 Erhöhung der Quantisierungsauflösung

In der digitalen Bildverarbeitung werden im allgemeinen 8Bit-Bilddaten verwendet. Die Autoren setzen z.B. für Anwendungen in der Leuchtdichtemeßtechnik eine Kamera vom Typ Kappa CF8/1DX 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.

Im folgenden soll der Einfluß des ADU auf die erzielbare Genauigkeit bei Mittelwertbildungen untersucht werden.

Zur Messung des Grauwertes g an der Position (x, y) im Bild liegen nach der Digitalisierung mit 8 Bit nur 256 unterschiedliche Werte vor. Die geforderte photometrische Genauigkeit und Auflösung für eine zu messende Leuchtdichte kann damit nicht erreicht werden. Zur Erhöhung dieser Auflösung werden örtliche und/oder zeitliche Mittelwerte über die Grauwerte $g(t, x_B, y_B)$ gebildet, wobei der Index B die Koordinaten eines Bereiches um die Ausgangskordinaten beschreibt.

Die ermittelten Grauwerte können als Realisierung eines Zufallsprozesses angesehen werden, der bei seiner Entstehung durch Generierung von Ladungen auf dem CCD-Chip dem statistischen Gesetz der seltenen Ereignisse gehorcht (Poissonverteilung). Die Amplitudenverteilungsdichte entspricht in guter Näherung der einer normalverteilten Zufallsgröße mit $G \in N(\mathbf{m}, \mathbf{s})$. Für die Amplitudenverteilungsdichte $w(g)$ kann damit geschrieben werden:

$$w(g) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot p \cdot s}} e^{-\frac{(g-m)^2}{2 \cdot s^2}} \quad (1)$$

Für die Messung wird eine Schätzung von μ mit einem möglichst kleinen Konfidenzintervall gefordert. Im allgemeinen kann dies durch Mittelwertbildung erreicht werden. Der Mittelwert über verschiedene Bilder bzw. über die Pixel in der Umgebung B des zu messenden Wertes kann als Realisierung einer Zufallsgröße mit der Verteilung $\bar{G} \in N(\mathbf{m}, \mathbf{s} / \sqrt{N})$ angesehen werden, wobei N die Anzahl der Bilder oder Pixel angibt, über die gemittelt wird. (Ergodizität kann im allgemeinen vorausgesetzt werden). Theoretisch könnte die Meßwertaufösung durch eine entsprechende Erhöhung von N fast beliebig gesteigert werden, vorausgesetzt, es liegen entsprechend gleichförmige bzw. unbewegte Objekte vor.

Die Realisierung des Zufallsprozesses liegt aber nur abgetastet und quantisiert in digitaler Form vor, so daß der Prozeß der Analog-Digital-Umsetzung (A/D-Umsetzung) für die Bestimmung des Meßwertes mit berücksichtigt werden muß. Die A/D-Umsetzung kann für große N unter der Voraussetzung eines idealen ADU als Abtastung der Amplitudenverteilungsdichte $w(g)$ mit einer im gesamten Bereich äqui-

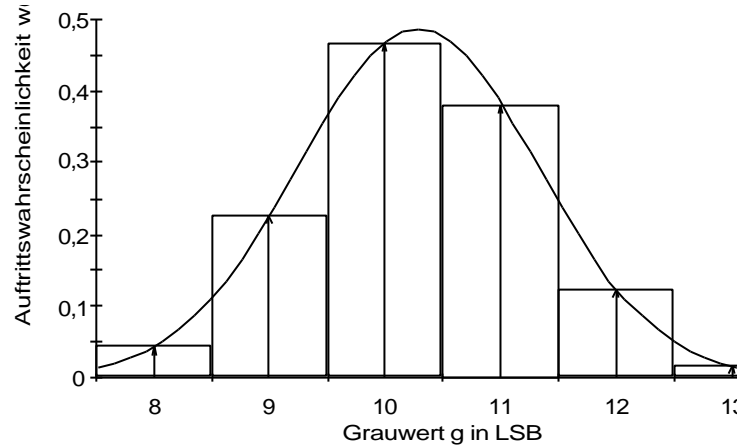


Abb. 2: Abtastung der Amplitudenverteilungsdichte durch ADU

distanten Codebreitenstufe Δg beschrieben werden. Der aus den digitalisierten Daten bestimmbare Mittelwert \mathbf{m} berechnet sich demnach aus

$$\mathbf{m} = \sum_g g \cdot A \left\{ w(g) * \text{rect}(\Delta g) \right\}_{\Delta g} \quad (2)$$

Darin sind $A\{\cdot\}_{\Delta x}$ der Abtastoperator mit der Schrittweite Δx , $*$ die Faltung und $\text{rect}(\Delta g)$ die Rechteckfunktion der Breite Δg (Abb. 2).

Die Abtastung kann im korrespondierenden Frequenzbereich durch die Periodifizierung des Spektrums beschrieben werden [u.a. KREß89]. Für die Fouriertransformierte der abgetasteten Amplitudenverteilungsdichte erhält man

$$W_A(k_g) = P \left\{ W(k_g) \cdot \text{Si}(p \cdot \Delta g \cdot k_g) \right\}_{\frac{1}{\Delta g}} \quad (3)$$

Mit $P\{\cdot\}_{\frac{1}{\Delta x}}$ wird der Operator für die Periodifizierung mit der Frequenzperiode $1/\Delta x$ bezeichnet. Wird die Periodifizierung ausgeschrieben und die Amplitudenverteilungsdichte aus (1) eingesetzt, erhält man folgende Beschreibung im Spektralbereich:

$$W_A(k_g) = \sum_n e^{-2 \cdot p^2 \cdot (s \cdot (k_g - n / \Delta y))^2} \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot p \cdot m \cdot (k_g - n / \Delta y)} \cdot \text{Si}(p \cdot \Delta y \cdot (k_g - n / \Delta y)) \quad (4)$$

Mit Hilfe dieser Beschreibung kann man das Spektrum im Basisbandbereich $k_g \in [-1/(2 \cdot \Delta g), 1/(2 \cdot \Delta g)]$ berechnen und in den Bereich der Amplitudenverteilungsdichte zurücktransformieren. Diese Transformation ist nur für spezielle Kombinationen von \mathbf{m}, \mathbf{s} und Δg geschlossen ausführbar. In der Praxis ist \mathbf{s} als Systemeigenschaft in der Nähe des zu bestimmenden

Grauwertes bekannt. Um den maximalen Fehler, der durch die Digitalisierung bei der Bestimmung des Grauwertes auftreten kann, abzuschätzen, wird die Amplitudenverteilungsdichte für verschiedene Werte von m , die dicht gerastert einen Bereich der Breite Δg überdecken, bei verschiedenen Werten von s in (4) eingesetzt und zurücktransformiert. Mit Hilfe von (2) wird dann der aus den Digitaldaten ermittelbare Erwartungswert berechnet.

Aus Abb. 3 kann entnommen werden, daß schon sehr geringe Streuungen von $> 0,5$ LSB

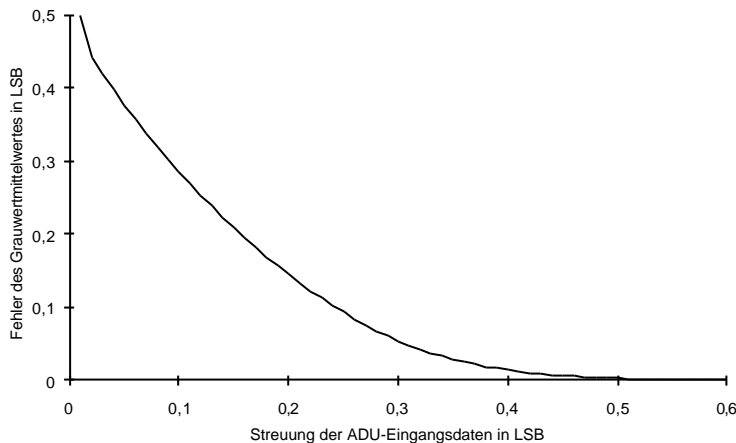


Abb. 3: Maximale durch Quantisierung mögliche Abweichung des Mittelwertes vom wahren Mittelwert in Abhängigkeit von der Streuung des Eingangssignals vor der Digitalisierung

Bereich 0,1 bis 0,15 LSB übrig, die wahrscheinlich aus korrelierten Signalanteilen resultiert. Der in Abb. 3 dargestellte Fehler vergrößert sich noch durch die Eigenschaften realer ADU. Hier ist insbesondere die differentielle Nichtlinearität zu nennen, die dazu führt, daß die Breite der einzelnen Codestufen nicht konstant ist und somit die Abweichungen der berechneten Mittelwerte noch größer werden können. Für etwas genauere Abschätzungen der Mittelwertfehler ist Δg in (2) mit der Breite der größten Codestufe im Intervall anzusetzen.

Die differentielle Nichtlinearität (DNL) ist ein Maß für die unterschiedliche Breite der einzelnen Code-Stufen und kann aus deren Häufigkeit berechnet werden, wenn am Wandleringang ein gleichverteiltes Eingangssignal (z.B. Dreieckssignal) anliegt:

$$DNL_i = \frac{h_i \cdot 2^w}{z} - 1 \quad (5)$$

(Mit h Häufigkeit der Codestufe i , w Auflösung des ADU in Bit, z Anzahl der Abtastwerte, i i -te Codestufe)

Die DNL führt zu einer integralen Nichtlinearität (INL) der Wandlerkennlinie, die aus der DNL berechnet werden kann:

$$INL_i = \sum_{k=1}^i DNL_k \quad (6)$$

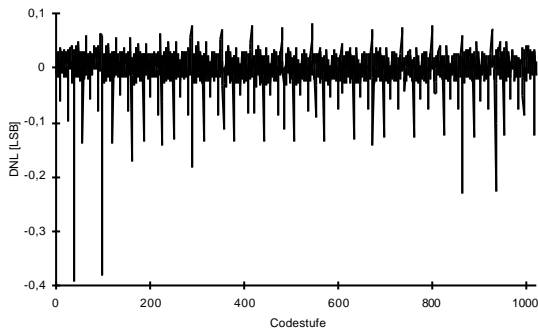


Abb. 4: Differentielle Nichtlinearität des A/D-Wandlers (ca. 560.000.000 Abtastwerte)

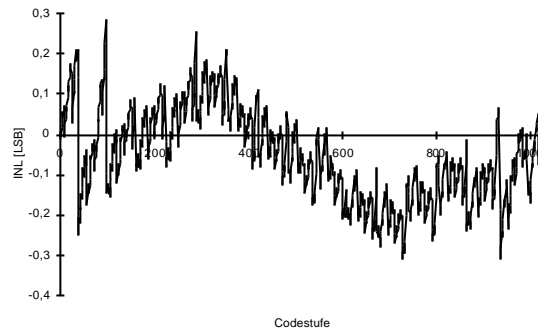


Abb. 5: Integrale Nichtlinearität des A/D-Wandlers

In Abb. 4 und Abb. 5 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, ein Schwingen der Schaltung auftreten kann.

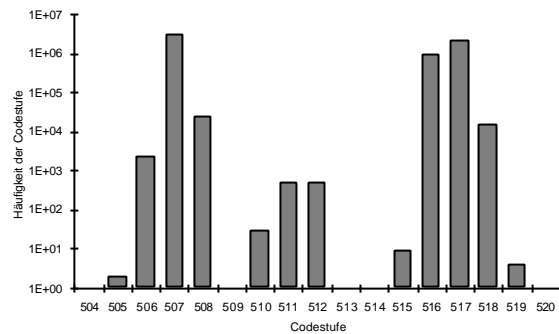


Abb. 6: Histogramm für einen kritischen Spannungszustand

Abb. 6 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.

In der Kamera werden Sony-CCD-Matrizen vom Typ ICX039BLA bzw. BNA mit dem Analogprozessor CXA1310 und dem über einen LCA (logik cell array) in der Funktion erweiterten Timinggenerator CXD1255 verwendet. Zur A/D-Umsetzung wurde ein ADU der Firma Analog Devices (AD876) verwendet. [ANALA]

4 Eigenschaften der untersuchten Standard-CCD-Matrizen

Die im folgenden erläuterten Untersuchungen beschreiben Effekte, die zur Begrenzung der photometrischen 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 photometrische 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.

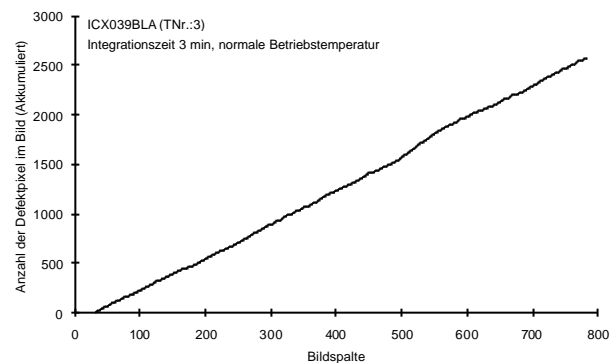
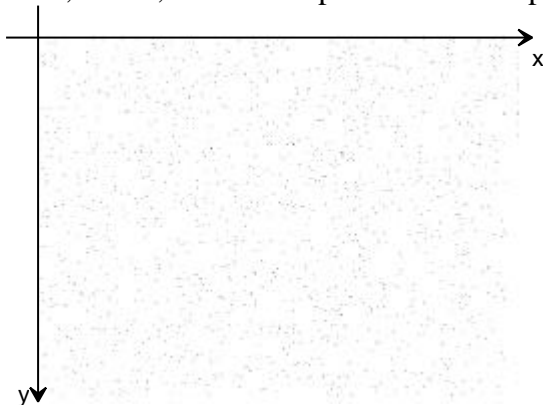


Abb. 7: Defektbild (alle als defekt markierten Punkte wurden schwarz dargestellt) Abb. 8: Anzahl der Defektpixel für eine Matrix, akkumuliert über die Bildspalten

Aus Abb. 8 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.

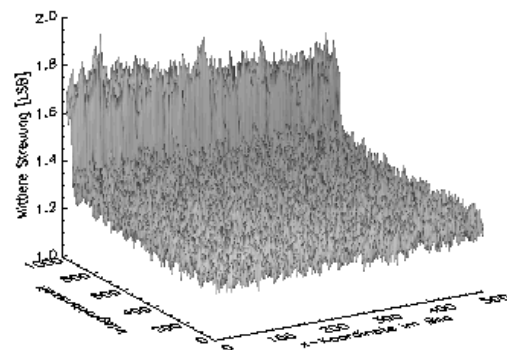
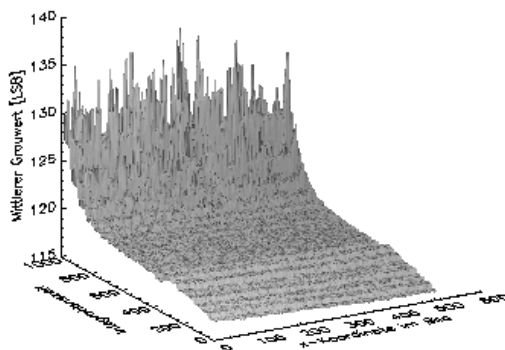


Abb. 9: Dunkelsignal bei verschiedenen Integrationszeiten (Mittelwert und Streuung (zeitlich ohne Referenz)) ohne Eliminierung der Defektpixel

In Abb. 9 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 hochfrequente Komponente der DSNU in einem Fenster F der Größe MxN Bildpunkte wird folgendermaßen berechnet:

$$DSNU_{HF} = s_{oF} = \sqrt{\frac{1}{N \cdot M - 1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\bar{U}_t(i, j) - \bar{U}_{DS_{0t}})} \quad (7)$$

Der Index t beschreibt eine Mittelwertbildung über die Zeit und der Index o eine Mittelwertbildung über den Ort. Eine Kombination der Indizes beschreibt die Mittelwertbildung über Ort und Zeit.

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

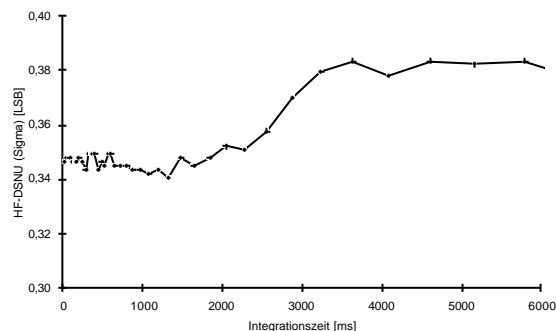
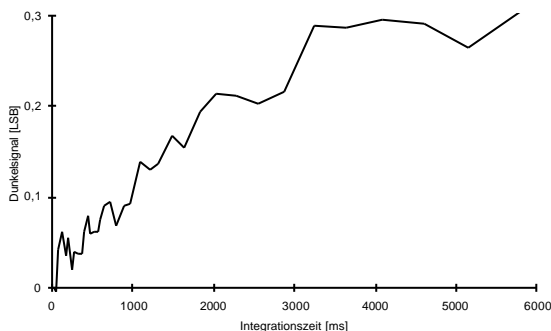


Abb. 10: Veränderung des Dunkelsignals (Bezugspunkt 0 bei 40ms) in Abhängigkeit von der Integrationszeit Abb. 11: Veränderung der DSNU in Abhängigkeit von der Integrationszeit

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. 11 und Abb. 12).

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. 12) angebunden, d.h., es wird nur die Differenz des aus dem Pixel ausgelesenen Grauwertes zum Mittelwert der Referenzspalte ausgewertet.

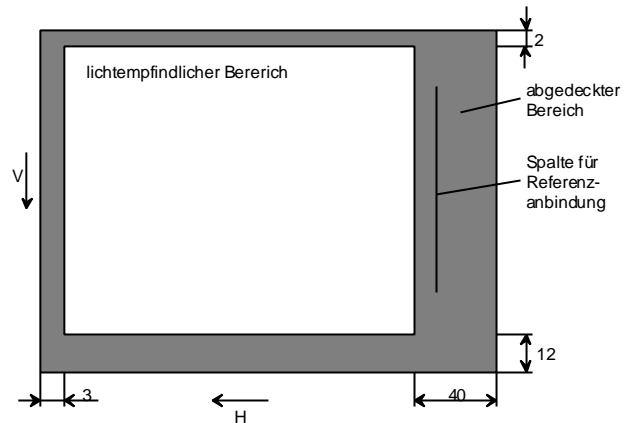


Abb. 12: Pixelanordnung auf einer Matrix [SONYA]

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.

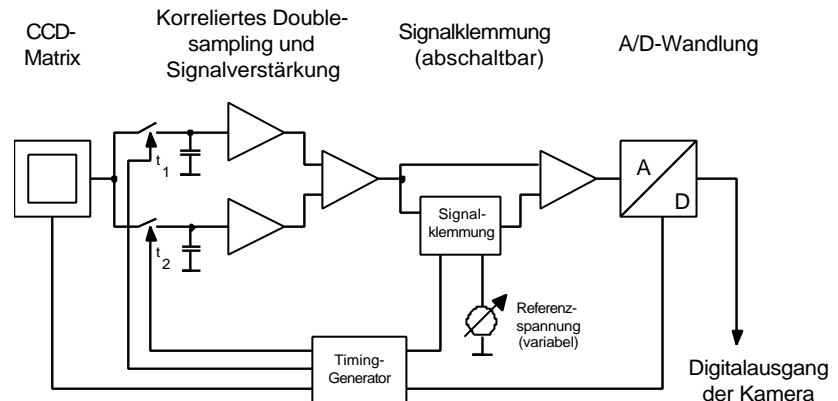


Abb. 13: Prinzipschaltbild der Signalverarbeitung zwischen CCD-Matrix und ADU in einer Digitalkamera

Bei den Weiterentwicklungen der Kamera ist vorgesehen, den notwendigen Referenzwert in der Kamera über einen Digital-Analog-Umsetzer (DAC) vom Auswertesystem einstellbar zu gestalten, da nur so der volle Dynamikbereich der Verstärker über den gesamten Arbeitstemperaturbereich ausnutzbar ist. Damit treten keine Zeilenklemmfehler mehr auf (Abb. 13).

4.1.5 Dunkelsignal bei Kurzzeitintegration

Im Shuttermode, d.h. bei Kurzzeitintegration ($T_{\text{int}} = 100 \mu\text{s}$ bis $16,6 \text{ ms}$), 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. 14, Abb. 15, Abb. 16).



Abb. 14: Dunkelbild mit Stufe (Grauwertunterschied 1 LSB)

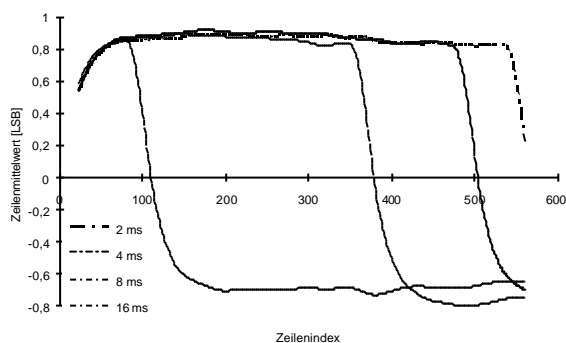


Abb. 15: Projektionen des Bildes aus (Abb. 14) in Zeilenrichtung für verschiedene Shutterzeiten

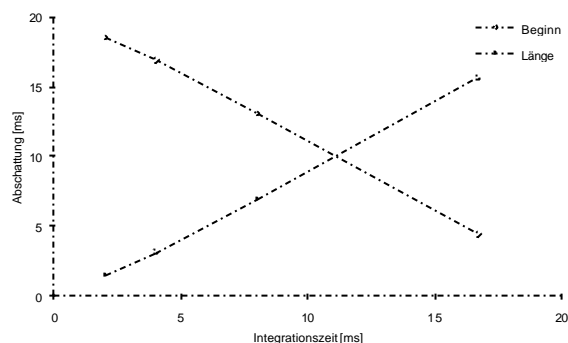


Abb. 16: Abschattungslängen und Integrationszeit

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], die im weiteren kurz beschrieben wird.

Tritt ein Photon mit dem Silizium der CCD-Matrix in Wechselwirkung, so wird bei Wellenlängen $\lambda > 300 \text{ nm}$ genau ein Elektron-Loch-Paar erzeugt. Das Signal S_{DN} einer Digitalkamera (gemessen in LSB oder DN) kann dann durch die Gleichung

$$S_{DN} = \frac{P_i}{k} \quad (8)$$

beschrieben werden, wobei P_i die Anzahl der Elektronen bezeichnet, die durch wechselwirkende Photonen erzeugt wurden. Mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes kann die Streuung für das Signal (s_s) berechnet werden (wobei $s_k = 0$ angenommen wird):

$$\mathbf{s}_S^2 = \left(\frac{\mathbb{1} \mathbf{s}_{P_i}}{\mathbb{1} P_i} \right)^2 \mathbf{s}_{P_i}^2 + \mathbf{s}_R^2 \quad (9)$$

$$\mathbf{s}_S^2 = \left(\frac{\mathbf{s}_{P_i}}{k} \right)^2 + \mathbf{s}_R^2$$

Mit \mathbf{s}_R wird die Streuung des Ausleserausens bezeichnet. Die Anzahl der wechselwirkenden Photonen ist poissonverteilt. Daher gilt in Verbindung mit Gleichung (8):

$$\mathbf{s}_{P_i}^2 = P_i = k \cdot S_{DN} \quad (10)$$

In Gleichung (9) eingesetzt ergibt sich:

$$k = \frac{S_{DN}}{\mathbf{s}_S^2 - \mathbf{s}_R^2} \quad (11)$$

Die Größen S_{DN} , \mathbf{s}_S und \mathbf{s}_R kann man in Verbindung mit einer Linearitätsmessung, bei der man die Integrationszeit variiert, ermitteln. Für die Streuung ist darauf zu achten, daß die DSNU bzw. die PRNU eliminiert werden. Dies kann am einfachsten durch die Auswertung von Differenzbildern (Differenz zweier zeitlich nacheinander aufgenommener Bilder) erfolgen (Streuung durch $\sqrt{2}$ teilen). Für die verschiedenen bei der Variation der Integrationszeit entstehenden Werte wird dann eine Regressionsrechnung (lineare Regression für die umgestellte Gleichung (11)) durchgeführt. Mit dem Ergebnis (Faktor k - Abb. 17, Abb. 18) kann dann die Sättigungselektronenzahl bestimmt und alle weiteren Berechnungen können in e^- angegeben werden.

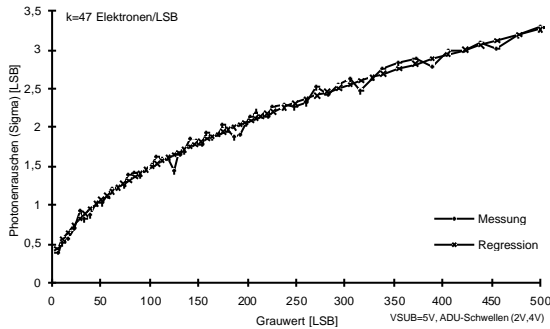


Abb. 17: Meßwerte und Regressionsfunktion zur Bestimmung des Systemübertragungsfaktors k

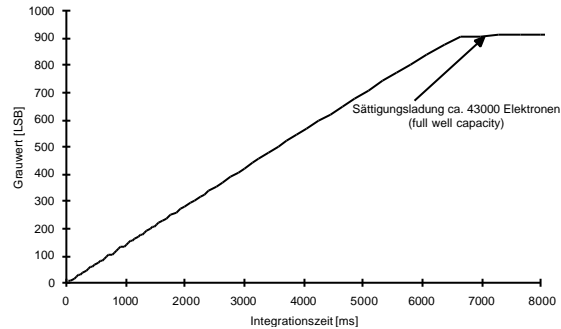


Abb. 18: Bestimmung der Sättigungsladung mit einer Linearitätsmessung durch Integrationszeitsteuerung ($V_{Sub}=5V$)

4.3 Hellsignaleigenschaften

4.3.1 Hellsignallungleichförmigkeit (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.

$$PRNU_{HF} = \mathbf{s}_{oF} = \sqrt{\frac{1}{N \cdot M - 1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\bar{U}_{E_i}(i, j) - \bar{U}_{E_{ot}})}^2} \quad (12)$$

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.

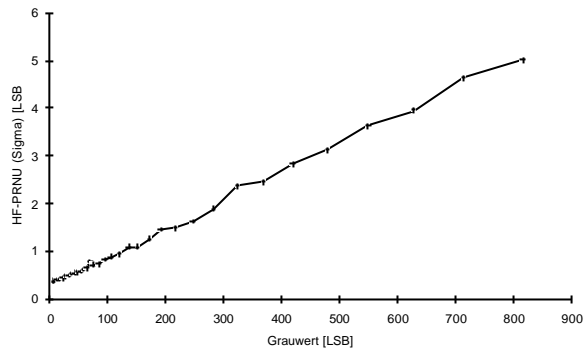


Abb. 19: HF-Komponente der PRNU für verschiedene Integrationszeiten

4.3.2 Nichtlinearität

Die mögliche photometrische 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). Im weiteren werden die letzten Meßwerte solange entfernt, bis der mittlere quadratische Fehler einen vorgegebenen Wert unterschreitet. Der letzte in der Regression verbliebene Meßwert bestimmt den maximalen linearen Aussteuerbereich. 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

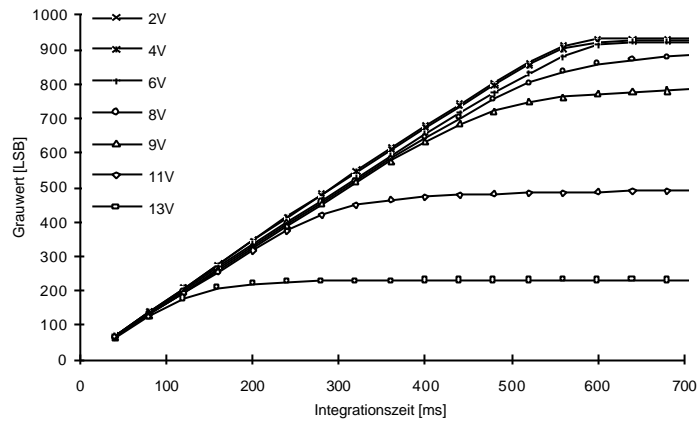


Abb. 20: Übertragungskennlinie für verschiedene Substratspannungen

Kennlinie benötigen, nicht geeignet. Messungen an einer Matrix, für die Sony eine Substratspannung von 11 V vorgibt, ergaben die in Abb. 20 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 Werte³:

Dunkelsignal		Hellsignal	(bei Grauwert 500)
zeitliches Rauschen	$s = 70 e^-$	zeitliches Rauschen	$s = 150 e^-$
Ungleichförmigkeit	$s = 16.5 e^-$ (bei Integrationszeiten < 2 s, 128x128 Pixel-Fenster)	Ungleichförmigkeit	$s = 150 e^-$
Generationsrate	$5 e^-/s$		

Tabelle 1

5 Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, daß 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 photometrische 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 photometrische Dynamikumfang⁴ 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 photometrische Meßwerte zur Verfügung.

³ Alle Daten werden in Elektronen angegeben (Substratspannung 5V, 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.

⁴ 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.

Durch die Firma TechnoTeam werden auf der Basis der Kamera CF8/1DX 8- bzw. 10-Bit-Version (Hersteller Kappa messtechnik GmbH) die Systeme LMK96 (Leuchtdichtemeßkamera) und SMK97 (Strahlungsdichtemeßkamera) angeboten (Abb. 21). Bei diesen Systemen werden unter anderem die hier beschriebenen Effekte korrigiert, so daß sehr genaue ortsaufgelöste photometrische 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.

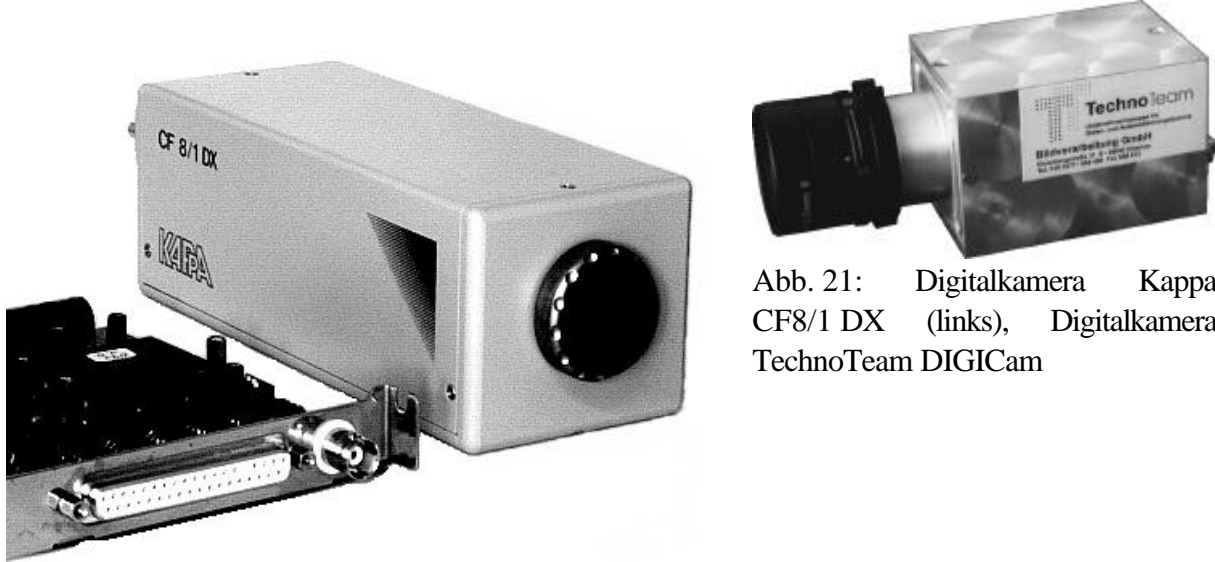


Abb. 21: Digitalkamera Kappa CF8/1 DX (links), Digitalkamera TechnoTeam DIGICam

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
- [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