

Bestimmung ausgewählter Parameter und Kennwerte digitaler Kamerasysteme

Udo Krüger,
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau

Messbare Parameter und Kennwerte bilden die Grundlage für jede Beurteilung der Systemeigenschaften digitaler Kameras. Besonders wichtig ist dabei eine anschauliche Darstellung der relevanten Messwerte. Im folgenden Beitrag werden Methoden vorgestellt, die es ermöglichen, solche Messergebnisse „auf einen Blick“ einzuschätzen. Außerdem werden verschiedene Methoden zur Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit von CCD-Sensoren erläutert.

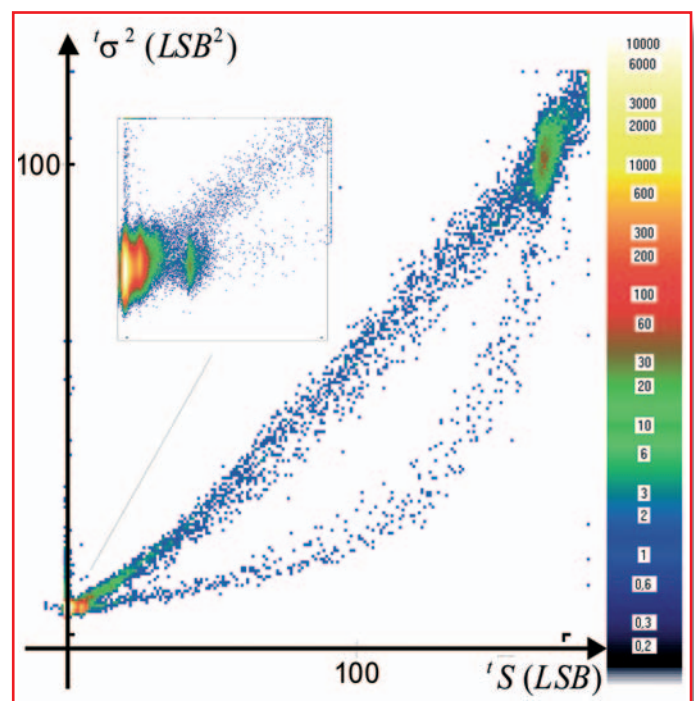
Die Analyse von Sensoren und Kamerasystemen erfordert die Auswertung großer Datenmengen. Diese sind mit geeigneten Maßnahmen auf einen überschaubaren Umfang zu reduzieren und anschaulich darzustellen, um mit Hilfe einiger weniger Kennwerte grundlegende Systemeigenschaften ermitteln zu können. Zur Analyse von Sensordaten bildet man in der Regel Histogramme von Mittelwerten oder bestimmt die Kennwerte von Rauscheigenschaften unter verschiedenen Randbedingungen. Die Berechnung einzelner Kennwerte mit der Photonen-Transfer-Methode (siehe Abschnitt 2) oder die Berechnung von Grauwert- und Varianz-Histogrammen über bestimmte Bildregionen führen immer nur zur Bewertung eines Teilaspektes bei der Analyse von Kamerasystemen. Um die Verteilung der Grauwerte und deren zeitlicher Streuung auch für komplexere Bildinhalte einfach und übersichtlich darstellen zu können, hat der Autor die Darstellungsform der Mittelwert-Varianz-Histogramme entwickelt [1]. Damit können Dunkel- und Hellsignalparameter wie Grundrauschen, Übertragungsfunktion und Defektpixel anschaulich dargestellt und grundlegende Analysen von Systemeigenschaften digitaler Kameras durchgeführt werden.

1 Mittelwert-Varianz-Histogramme

Mit Mittelwert-Varianz-Histogrammen ist eine anschauliche Visualisierung des Zusammenhangs zwischen Mittelwert und

Bild 1: Beispiel eines Mittelwert-Varianz-Histogramms (MVH). Das Bild zeigt deutlich die höheren Mittelwerte und Varianzen der Defektpixel, die an den Häufungspunkten oben rechts zu erkennen sind

Varianz von Bilddaten auf einen Blick möglich. Ausgangspunkt ihrer Entwicklung war die Darstellungsform "joint histogram" aus [2]. Bei diesen Histogrammen wird die Häufigkeit von Grauwertkombinationen in einem Bild dargestellt, wobei auf der einen Achse die Grauwerte einer Aufnahme mit der Integrationszeit t_0 und auf der anderen Achse die Grauwerte mit der Integrationszeit t_1 aufgetragen werden. Diese Histogramme geben bei geeigneten Szenen einen guten Überblick über das Systemverhalten, beziehen aber das zeitliche Rauschen nicht mit in die Betrachtung ein. Mittelwert-Varianz-Histogramme h_{MV} (MVH) sind ebenfalls zweidimensionale Datenfelder. Für eine gegebene Sensorbestrahlungsstärke wird aus einer Aufnahmeserie mit N Aufnahmen S_i gleicher Integrationszeit ein Mittelwertbild M und ein Varianzbild V berechnet. Aus diesen beiden Bildern kann ein zweidimensionales



Histogramm berechnet werden, wobei auf der x-Achse die Grauwerte und auf der y-Achse die Varianzen aufgetragen werden. Zum Beispiel zeigt **Bild 1** ein MVH eines Dunkelsignals bei der Integrationszeit $t_1 = 10$ s. Das MVH wird als Falschfarbenvorgabe mit einer Palette, die einen Bereich von ca. 5 Dekaden der Häufigkeit auf den Anzeigebereich abbildet, dargestellt. Die Analyse erfolgt im gesamten Bild einer Matrix vom Typ ICX085AL (1,3 Mio. Pixel). Im nächsten Beispiel (Bild 2) ist ein MVH für das Hellsignal des schnellen CMOS-Sensors PB-MV13 von Photobit dargestellt. Dieser Sensor hat auf Grund seiner internen Analog-Digital-Wandler und der hohen Abstraten¹ Probleme bei der Umschaltung von Bit 4 auf Bit 5. An dieser Stelle wird jeweils eine schmale und eine breite Codestufe erzeugt, die sich im MVH deutlich abbilden. Derartige Fehler, die sich sonst nur schwer

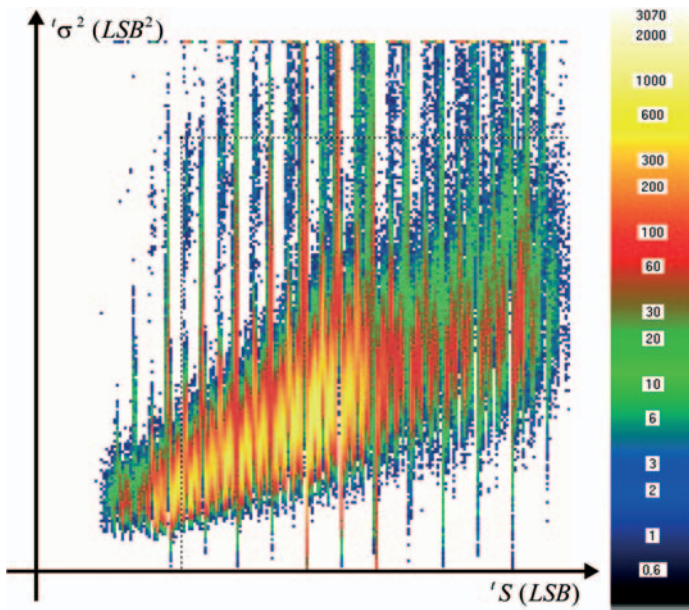


Bild 2: Beispiel eines MVH, das bei einem schnellen CMOS-Sensor Probleme mit der Umschaltung von Bit 4 auf Bit 5 aufzeigt. Diese ergeben sich aus der hohen Abtastrate und internen AD-Wandlern

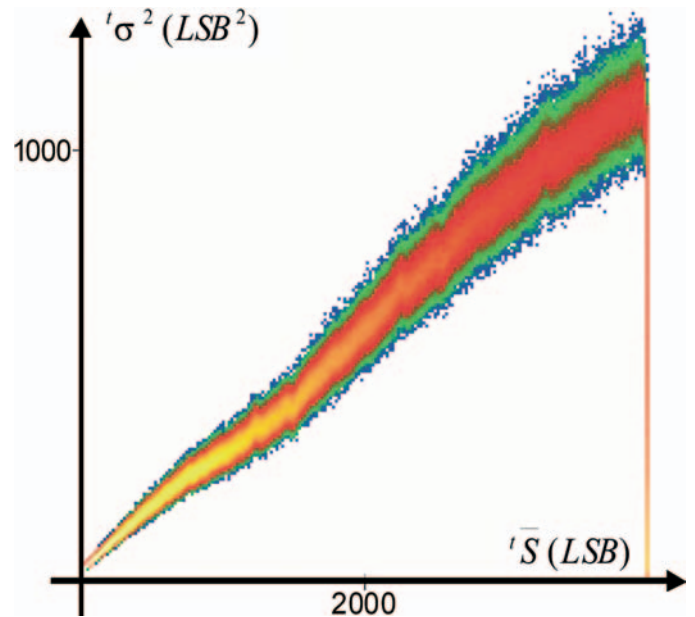


Bild 3: Bei größer werdenden Grauwerten ist wegen der steigenden Varianz mit einem breiter werdenden Varianzschlauch zu rechnen

nachweisen lassen, sind in MVHs gut zu erkennen. Weitere Beispiele werden im Rahmen der Photonen-Transfer-Methode erläutert.

2 Photonen-Transfer-Methode

Die Photonen-Transfer-Methode (PTM) wurde von J. Janesick entwickelt [3]. Die Grundlagen zur Berechnung wurden beim Framos-Forum schon 1997 von U. Schmidt vorgestellt [4]. Aus den Grundgleichungen der Kameramodellierung kann man mit der Annahme, dass die Anzahl der Photonen bzw. der daraus entstandenen Elektronen poissonverteilt ist, über das Gesetz zur Fehlerfortpflanzung die folgende Grundgleichung der Photonen-Transfer-Methode herleiten:

$$\sigma^2(S) = k_{\text{Sys}} \cdot S + \sigma_0^2 \quad (\text{Gl. 1})$$

mit digitalen Grauwerten S , Photonenrauschen $\sigma(S)$, Systemübertragungsfaktor k_{Sys} und Dunkelrauschen σ_0 . Die Grauwerte basieren dabei auf der Definition des LSB (least significant bit) als kleinstmögliche Differenz zwischen zwei digitalen Ausgangswerten des Analog-Digital-Wandlers. Verwendet man Vorlagen, deren Bilder etwa gleichverteilte Grauwerte enthalten, kann man mit den Daten der resultierenden Mittelwert-Varianz-Histogramme die Berechnungen der Photonen-Transfer-

Methode durchführen. Aus Gleichung 1 ist zu erwarten, dass die Varianz linear mit dem Grauwert steigt (**Bild 3**).

MVH-Ergebnisdaten kann man in analoger Form für die Bestimmung des Systemübertragungsfaktors und des Grundrauschens verwenden. Man erhält so gleichzeitig einen umfassenderen Eindruck von den Daten des Kamerasystems und deren Stabilität.

Mit einer Vorlage nach ISO 15739 (**Bild 4**) kann man definierte Grauwerte vorgeben, die Analyse mit der bekannten Photonen-Transfer-Methode durchführen und die Daten ebenfalls in einem Mittelwert-Varianz-Histogramm darstellen. Für das vorliegende System (digitale 12Bit-Kamera mit Bildsensor Sony ICX285AL) erhält man die in **Bild 5** dargestellten Messwerte. Man kann dort sehr gut den linearen Zusammenhang zwischen Grauwert und Varianz der Bilddaten erkennen. Bei diesem System dominieren die physikalischen Grundprozesse der Photonen-Ladungs-Wandlung das grundlegende Rauschverhalten.

3 Relative spektrale Empfindlichkeit

Im Folgenden wird die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit $s_\lambda(\lambda)$ eines Sensors beschrieben. Die genaue Kenntnis der spektralen Empfindlichkeit ist im Rahmen der Lichtmesstechnik von großer Bedeutung, da auf Basis dieser Daten die Berechnung und Fertigung der Filter zur spektralen Anpassung der Kamerasysteme an die spektrale Hellempfindlichkeit des mensch-

lichen Auges bzw. an die Normspektralwertkurven erfolgt. Es hat sich herausgestellt, dass für eine genaue Anpassung jede eingesetzte Matrix vermessen werden muss. Es wurden daher Messverfahren entwickelt werden, die eine genaue und schnelle Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit ermöglichen.

Im Wesentlichen können zwei Arten der Bestimmung unterschieden werden:

- Direkte Bestimmung: Auswertung schmalbandiger spektraler Strahlungsverteilungen
- Indirekte Bestimmung: Auswertung breitbandiger spektraler Strahlungsverteilungen

3.1 Direkte Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit

Bei der direkten Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit werden die Matrix und eine Referenzdiode mit einer schmalbandigen spektralen Bestrahlungsstärke beaufschlagt, der annähernd die Austasteigenschaft eines Dirac-Impulses zugeschrieben werden kann. Man erhält dann:

$$s_\lambda(\lambda_i) = S_E(\lambda_i) \cdot s_{\lambda,D}(\lambda_i) / S_D(\lambda_i) \quad (\text{Gl. 2})$$

mit spektraler Empfindlichkeit $s_\lambda(\lambda_i)$ bei Wellenlänge λ_i , effektivem Grauwert S_E der Kamera (Messwert, LSB), Messwert S_D der Referenzdiode (Ampere (A) oder LSB) und spektraler Empfindlichkeit $s_{\lambda,D}$ der Referenzdiode (A/W oder 1).

Zur Realisierung der schmalbandigen spektralen Bestrahlungsstärke verwendet

¹ Der PB-MV13 (Bezeichnung derzeit MT9M413 von Micron) kann bis zu 500 Bilder pro Sekunde bei einer Auflösung von 1280 x 1024 Bildpunkten mit 10 Ausgängen a 10 Bit ausgeben.

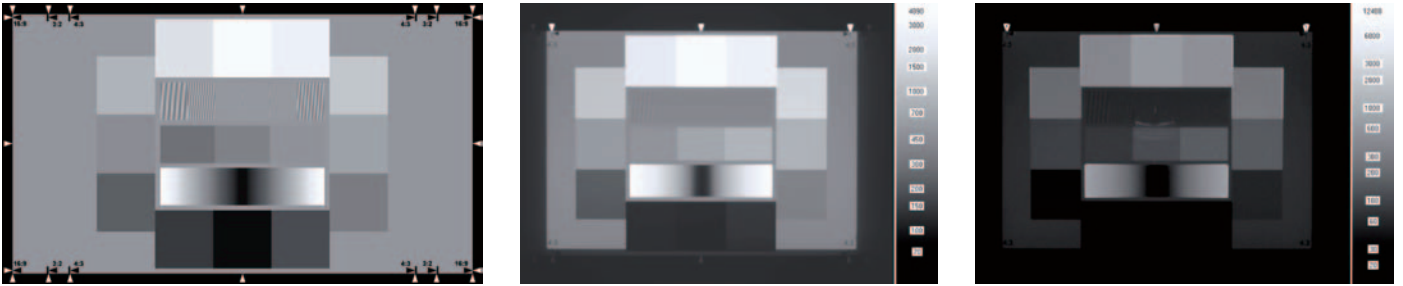


Bild 4: Vorlage nach ISO 15739 "Camera Noise Test Chart" [5] (links, Transmissionschart mit logarithmischer Skalierung) sowie Mittelwert- (Mitte) und Varianzbild (rechts). Die Aufnahmen wurden bewusst unscharf gemacht, um Aliasingeffekte bei der Erfassung der Rasterdruckvorlagen durch die Kamera zu vermeiden. Für die Messung wird nur der mittlere Grauwert der jeweiligen Flächen benötigt

man in der Regel einen Monochromator bzw. Doppelmonochromator. Eine solche Messung dauert aber für den Test vieler Matrizen zu lange. Daher wurde die Spektrometernmethode entwickelt, bei der das Licht einer Lampe über ein Prismen- oder Gitterspektrometer (Spektrometervorsatz) in seine spektralen Bestandteile zerlegt wird.

Die komplette Information über die spektrale Verteilung kann dann mit einem Bild bestimmt werden. In einem ersten Schritt (gestrichelte Position in **Bild 6**) werden mit Hilfe einer verschiebbar angebrachten Referenzdiode die Diodenmesswerte ermittelt. Im Anschluss daran kann man für mehrere Matrizen nacheinander die Matrixmessungen durchführen.

Dazu wird zuerst ein Linienstrahler vermessen, um die Lage der Matrix in Bezug zum Spektrometervorsatz exakt zu bestimmen. Im Anschluss daran wird ein kontinuierliches Spektrum erfasst und im Vergleich zu den Daten der Referenzdiodenmessung ausgewertet. **Bild 7** zeigt die prinzipielle Funktionsweise eines bildauflösenden Spektrometers. Für die Erfassung der spektralen Empfindlichkeit wird zur Steigerung der Genauigkeit und der Auflösung über die Ortsachse gemittelt. Durch die schnelle Erfassung und die orts-

aufgelöste Auswertung kann man u.a. die Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit von der Substratspannung und die Veränderung des Smear-Verhaltens bei unterschiedlichen Wellenlängen gut untersuchen.

In **Bild 8** ist der Smear-Koeffizient in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgetragen. Mit dem Smear-Koeffizienten wird die Beeinflussung der Messwerte durch Licht beschrieben, das während des Ladungstransportes einfällt, d.h. nach dem Ende der Integrationszeit. Das durch Smear entstehende Signal ist nur von der Transportzeit und nicht von der Integrationszeit abhängig.

Aus Bild 8 ist zu entnehmen, dass der Smear-Koeffizient im sichtbaren Spektralbereich bei kleinen Werten eine gewisse Welligkeit aufweist, was wahrscheinlich auf Interferenzerscheinungen zurückzuführen ist. Bei größeren Wellenlängen – im nahen Infrarotbereich – ist ein starkes Ansteigen des Smearkoeffizienten festzustellen. Daraus folgt, dass man in jedem Fall IR-Sperrfilter verwenden sollte, wenn die Applikation dies erlaubt.

Für den Smear-Koeffizienten gilt:

$$\alpha_s = t_i / t_T \cdot S_{Smear} / S_{t_i} \quad (\text{Gl. 3})$$

mit Smear-Koeffizient α_s , Auslesezeit (Transportzeit) t_T eines Bildes, Integrationszeit t_i , durch Smear verursachten Signalwert S_{Smear} und Signalwert S_{t_i} bei der Integrationszeit ohne Smear-Anteil.

3.2 Indirekte Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit

Bei der indirekten Bestimmung der relativen spektralen Empfindlichkeit verwendet man breitbandige spektrale Strahlungsverteilungen. Aus deren Kenntnis und den ermittelten Farbwerten (den Grauwerten der einzelnen Kanäle einer Farbkamera) versucht man, die relative spektrale Empfindlichkeit des Systems zu schätzen.

Dies erfordert eine gut überlegte Wahl der Farbproben und eine exakte Erfassung der spektralen und integralen Messwerte. Die numerische Lösung der entstehenden Gleichungen

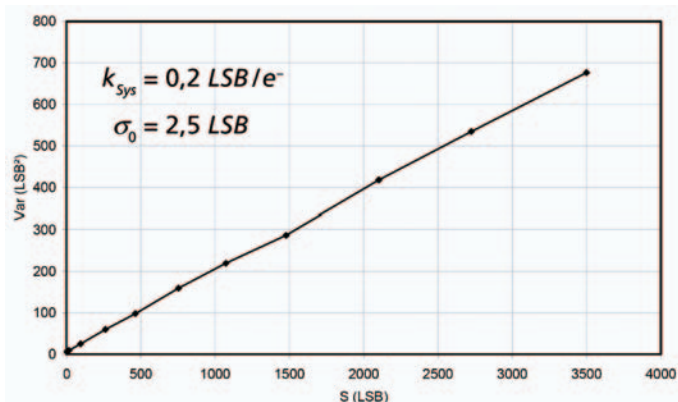
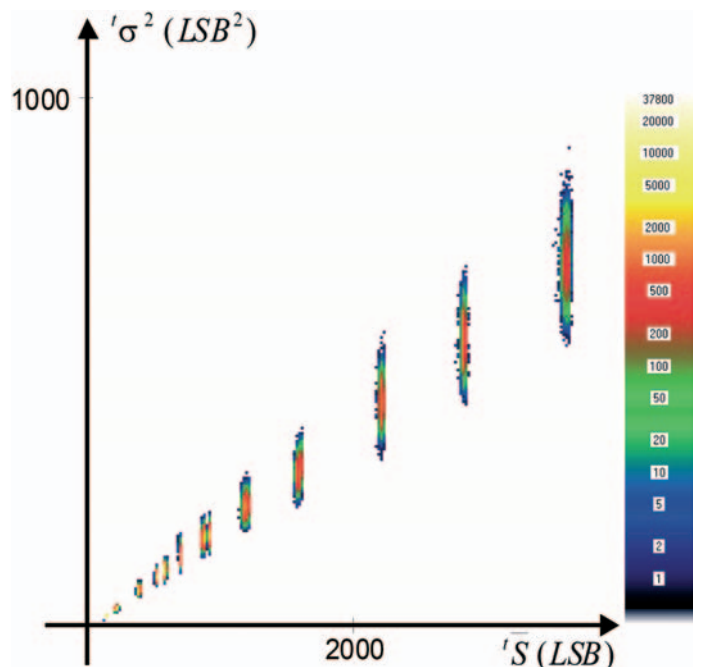


Bild 5: PTM-Darstellung (links) und MVH (rechts) für die Messwerte aus Bild 4



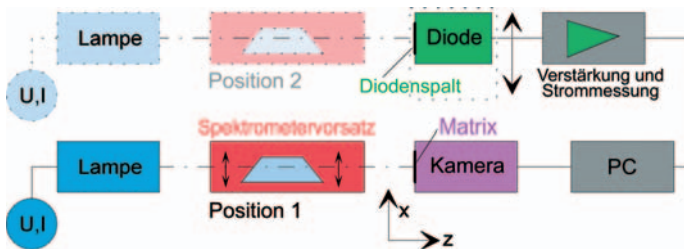


Bild 6: Schematische Darstellung der Spektrometernmethode

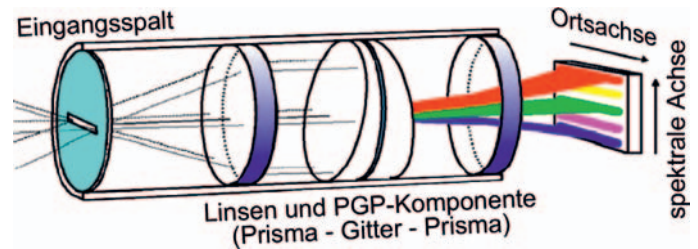


Bild 7: Funktionsweise eines Spektrometervorsatzes, z.B. ImSpector von Specim [6,7]

chungssysteme ist ebenfalls sehr komplex. Die indirekte Bestimmung ist eine verlockende Idee und z.B. bei der Scannerkalibrierung die einzige Methode, die ohne großen Aufwand zu realisieren ist. Die Genauigkeit und Stabilität ist aber insbesondere für messtechnische Anwendungen derzeit noch nicht ausreichend.

Mit der direkten Spektrometernmethode sind kurze Messzeiten möglich, sodass zahlreiche Abhängigkeiten der spektralen Empfindlichkeit (Substratspannung, Smear (Bild 8), Langzeitstabilität) ohne großen Aufwand und mit geringer Messunsicherheit erfasst werden können.

Ein Problem der Spektrometernmethode ist die Notwendigkeit, den Sensor ohne Optik zu betreiben. Alle weiteren Berechnungen der gesamten Systemempfindlichkeit müssen durch mehrere Einzelmessungen (Matrixempfindlichkeit, Transmission der Objektive und Filter) ermittelt werden. Mit Hilfe der indirekten Bestimmung hat man den Vorteil, dass die Systeme im Auslieferungszustand mit Filter und Objektiv vermessen werden können. Somit lassen sich auch digitale Fotoapparate ohne komplizierte Laboraufbauten vermessen – Systeme, die in der Regel nicht demontiert

werden können. Eine direkte Bestrahlung der Matrix ist hier nur in seltenen Fällen möglich.

4 Zusammenfassung

Es wurden Verfahren zur Charakterisierung digitaler Kamerasysteme in den Bereichen Signal-Rausch-Verhalten und spektrale Empfindlichkeit vorgestellt. Die beschriebenen Verfahren ermöglichen eine umfassende und effektive Beurteilung der Systemeigenschaften. Die Eignung eines konkreten Systems oder auch nur eines Sensors kann mit wenigen Messungen und ohne großen technischen Aufwand bestimmt werden.

Literaturhinweise:

- [1] U. Krüger, *Ausgewählte Aspekte der ortsauflösenden Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen*, Dissertation, Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik der TU Ilmenau, Nr. 6, Der Andere Verlag, Osnabrück 2004, ISBN 3-89959-167-4
- [2] S. Mann, *Comparametric Equations with Practical Applications in Quantigraphic Image Processing*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol.9, No.8, August 2000, pp. 1389-1406, 2000
- [3] J.R. Janesick, M.M. Blouke, J. Freeman, *Scientific*

charge-coupled devices, Optical Engineering, Vol. 26, No.8, pp. 692-714, 1987

- [4] U. Schmidt, *Einige ausgewählte Möglichkeiten zur Bewertung von CCD-Systemen*, Framos CCD-Forum, München, 1997
- [5] ISO 15739, *Photography – Electronic still picture imaging – Noise measurements* (www.iso.org oder www.i3a.org)
- [6] Spectral Imaging Ltd., *ImSpector: Imaging spectrophotograph user manual*, Version 2.21, 2003, www.specim.fi
- [7] M. Aikio, *Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph*, Diss., Department of Electrical Engineering, University of Oulu, 2001
- [8] F. Dierks, *Sensitivity and Image Quality of Digital Cameras*, www.baslerweb.com/popups/5128/Image_Quality_of_Digital_Cameras.pdf, 2004
- [9] EMVA standard 1288, *Standard for Measurement and Presentation of Specifications for Machine Vision Sensors and Cameras*, emva.org/home/content/blogcategory/135/164
- [10] S. Ochi, *Charge-Coupled Device Technology*, Gordon and Breach Publishers, 1996
- [11] A.J.P. Theuwissen, *Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Bosten, London, 1997

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Udo Krüger
 TechnoTeam
 Bildverarbeitung GmbH
 Werner-von-Siemens-Str. 10
 D-98693 Ilmenau
 Tel. 03677/4624-0
 Fax 03677/4624-10
 eMail: udo.krueger@technoteam.de
 Internet: www.technoteam.de



Jens Kellermann
 Projektleiter
 Framos Electronic
 Vertriebs GmbH
 Zugspitzstr. 5, Haus C
 D-82049 Pullach
 Tel. 089/710667-12
 Fax 089/710667-66
 eMail: j.kellermann@framos.de
 Internet: www.framos.de

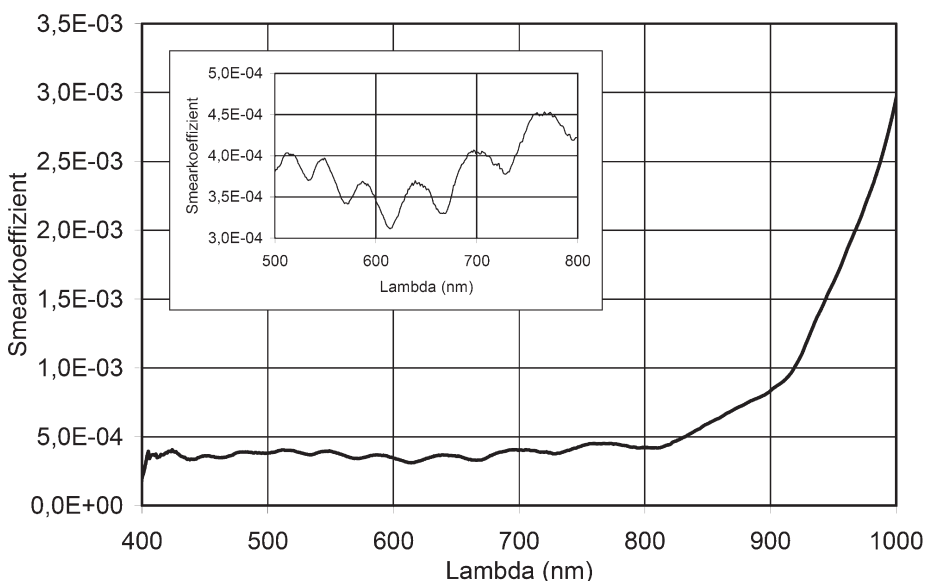


Bild 8: Smear-Koeffizient in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Sensor: ICX085AL)