

Der Standard EMVA 1288 zur Charakterisierung von Kameras und Bildsensoren – von 2D- zu 3D-Kameras

Bernd JÄHNE

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden kurz die Grundprinzipien des Standards EMVA 1288 beschrieben: offen, nicht einschränkend, modellbasiert und Kamera als Komponente. Wenige Parameter sind notwendig, um flexibel und applikationsspezifisch eine optimale Kameraauswahl zu treffen. Dies wird an vergleichenden Beispielen illustriert. Weiterhin werden verfügbare Testgeräte vorgestellt und am Ende kurz dargestellt, wie der Standard auf 3D-Kamerasysteme erweitert werden könnte.

1 Einleitung und Grundprinzipien

Eine Fülle an Bildsensoren mit den unterschiedlichsten Eigenschaften ist inzwischen verfügbar. Daher ist es eine wesentliche Aufgabe, Bildsensoren bzw. digitale Kameras mit einer möglichst kleinen Zahl an Parametern *vergleichbar* zu beschreiben, die aber alle wesentlichen Eigenschaften umfassen sollten. Genau dies ist die Zielsetzung des 1288 Standards. Namhafte Hersteller, Distributoren und Forschungsinstitute haben sich unter dem Dach der European Machine Vision Association (EMVA) dazu zusammengefunden (www.emva.org). Seit Ende 2010 ist der Standard 1288 in einer sorgfältig dokumentierten und ausgereiften Release 3.0 verfügbar, der durch einen Vertrag zwischen der EMVA, der amerikanischen Imaging Association (AIA) und der japanischen Industrial Imaging Association (IIIA) global anerkannt ist. Inzwischen hat der Standard auch über den Bereich der industriellen Bildverarbeitung Interesse gefunden, da er universell anwendbar ist.

Der Standard 1288 beruht auf einer Reihe einfacher Prinzipien:

Offener Standard: die Standarddokumente sind offen und kostenlos verfügbar. Im technischen Komitee kann jedes Unternehmen und Forschungsinstitut mit entsprechender Sachkenntnis mitarbeiten, auch wenn es kein EMVA-Mitglied ist.

Nicht-einschränkender Standard: Das Testequipment ist nicht festgelegt, nur die Messprinzipien. Damit ist der Standard jederzeit offen für Fortschritte in der Messtechnik.

Kamera als Komponente: Der Standard 1288 sieht die Kamera als eine Komponente ohne Optik. Beschrieben wird daher der Zusammenhang zwischen dem Lichteinfall auf der Sensorebene und dem resultierenden Bildsignal. Damit wird den Bedürfnissen der Machine Vision Industrie Rechnung getragen, die sich aus Kameras, Optiken und Beleuchtung Systeme zusammenstellt und daher die Eigenschaften der einzelnen Komponenten kennen muss. Daher sind Standards, die das Gesamtsystem beschreiben, weniger geeignet. Solche Standards wurden zur Beschreibung digitaler Kamerasysteme mit Optik im Konsumerbe-

reich von der ISO entwickelt: ISO 14524 (Opto electronic conversion function, ISO 15739 (Noise and Signal to Noise Ratio, Dynamic Range).

Modellbasiert: Der Standard basiert auf einem universellen Kameramodell und damit auf wohldefinierten physikalischen Prinzipien. Daraus ergeben sich unmittelbar die wesentlichen Kameraparameter, andere beschreiben die Abweichungen vom Modell (Nichtlinearität und Inhomogenitäten inklusive der Charakterisierung defekter Pixel). Das lineare Kameramodell führt dazu, dass alle Modellparameter durch eine Input/Output-Relation nach der linearen Systemtheorie bestimmt werden können. Die Kamera kann als „schwarzer Kasten“ (Blackbox) betrachtet werden, von der nur Belichtungszeit und Pixelgröße bekannt sein müssen. Das Eingangssignal sind Mittelwert und die Varianz der über die Belichtungszeit integrierten Photonenzahl, das Ausgangssignal Mittelwert und Varianz des digitalen Bildsignals. Dass keinerlei Interna über die Kameraelektronik bekannt sein müssen, ist ein essenzieller Vorteil des Standards: Nicht nur Kamerahersteller, sondern auch Testlabors, Integratoren, Distributoren und Endanwender können deswegen die Messungen durchführen.

Im Folgenden wird der Standard kurz beschrieben. Für eine umfassende Darstellung sei auf das Standarddokument und weitere Dokumente auf der EMVA Webseite (www.emva.org) verwiesen. Dieser Artikel ist eine verkürzte und modifizierte Version von JÄHNE (2012).

2 Lineares Kameramodell

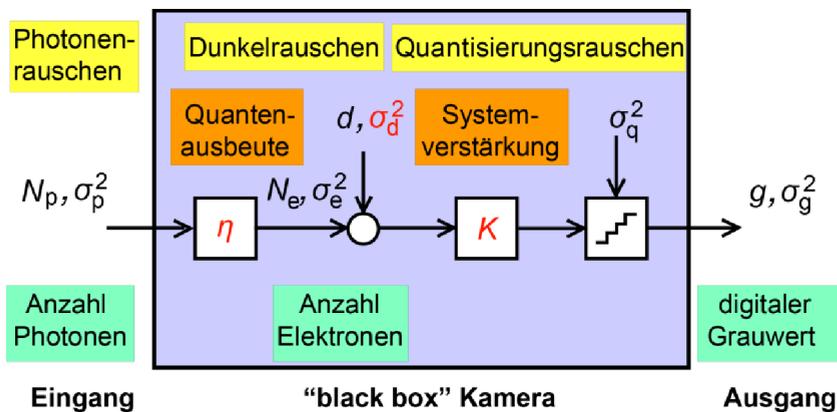


Abb. 1: Lineares EMVA 1288 Kameramodell. Bei dem Eingangssignal (Photonenzahl integriert über die Belichtungszeit) und dem Ausgangssignal (digitaler Grauwert) sind Mittelwert und Varianz angegeben. Die unbekanntenen Modellparameter sind η , K und σ_d^2 .

Das lineare Kameramodell beschreibt den elementaren Zusammenhang zwischen der *Bestrahlungsstärke* E in Anzahl Photonen pro Pixel auf der Sensorebene und dem *digitalen Signal* der Kamera (Grauwert y in Einheiten von digital numbers oder DN) (Abb. 1). Es beinhaltet nur drei Parameter, die Quantenausbeute η , das Dunkelrauschen σ_d und die Ka-

meraverstärkung K , wie im Folgenden erläutert wird. Während der Belichtungszeit treffen im Mittel μ_p Photonen auf ein Sensorelement. Davon wird, abhängig von der Wellenlänge λ des einfallenden Lichtes, der Bruchteil

$$\eta(\lambda) = \frac{\mu_e}{\mu_p} \quad (1)$$

die *Quantenausbeute* η , absorbiert und in μ_e elektrische Ladungsträger (Elektronen) konvertiert. Zu den photoneninduzierten Ladungsträgern kommt noch das über die Belichtungszeit integrierte Dunkelsignal μ_d (thermisch induzierte Ladungsträger bzw. Leckströme). Dieses Signal wird verstärkt und am Ende durch einen Analog-Digital-Wandler quantisiert zu einem digitalen Grauwert

$$\mu_y = K(\mu_d + \mu_e) = \mu_{y,\text{dark}} + K\mu_e \quad (2)$$

mit einem Dunkelwert μ_d (Einheit e^-) bzw. $\mu_{y,\text{dark}}$ (Einheit DN). Die Konstante K ist der *absolute Verstärkungsfaktor* der Kamera und hat die einfache dimensionslose Einheit Anzahl Elektronen pro digitalem Wert (e^-/DN). Die Beziehung in Gleichung (2) kann nicht direkt bestimmt werden, da die Anzahl der Ladungsträger μ_e nicht bekannt ist. Gemessen werden kann nur der Zusammenhang zwischen der Photonenzahl/Pixel μ_p und dem mittleren Bildsignal μ_y , in dem Gleichung (1) in Gleichung (2) eingesetzt wird:

$$\mu_y = \mu_{y,\text{dark}} + K\eta(\lambda)\mu_p \quad (3)$$

Die über die *Belichtungszeit* t_{exp} integrierte Photonenzahl μ_p ergibt sich bei bekannter Pixelfläche und Wellenlänge aus der mit einer kalibrierten Photodiode bestimmte Bestrahlungsstärke E zu

$$\mu_p [\text{Photonen/Pixel}] = 50.34A[\mu\text{m}^2]t_{\text{exp}}[\text{ms}]\lambda[\mu\text{m}]E[\mu\text{W}/\text{cm}^2] \quad (4)$$

Nach Gleichung (3) ist die *Kamerakennlinie* linear. Der Achsenabschnitt ist das Dunkelsignal $\mu_{y,\text{dark}}$ und die Steigung das Produkt aus Verstärkungsfaktor K und der Quantenausbeute η .

Von den drei Parametern des linearen Kameramodells in Abbildung 1 kann daher keiner eindeutig aus der Kamerakennlinie bestimmt werden. Das ergibt sich erst aus einer Analyse des Rauschens. Das lineare Kameramodell enthält drei Rauschquellen: Photonenrauschen, Dunkelrauschen und Quantisierungsrauschen. Das unvermeidliche *Photonenrauschen* (shot noise), d. h. die statistischen Fluktuationen des Photonstroms, sind poissonverteilt und die Varianz ist gleich dem Mittelwert:

$$\sigma_p^2 = \mu_p \quad (5)$$

Die gleiche Aussage gilt für Varianz der über die Belichtungszeit akkumulierten Elektronen (SALEH & TEICH 2007, Kapitel 12.2D und 18.6A):

$$\sigma_e^2 = \mu_e \quad (6)$$

Wegen der linearen Kamerakennlinie können alle Rauschquellen, die aus dem Transport oder der Verstärkung der Ladungsträger resultieren in einer einzigen Rauschquelle und bezogen auf das Eingangssignal zusammengefasst werden, egal wo diese tatsächlich auftreten. Dieses Rauschen wird das *Dunkelrauschen* genannt.

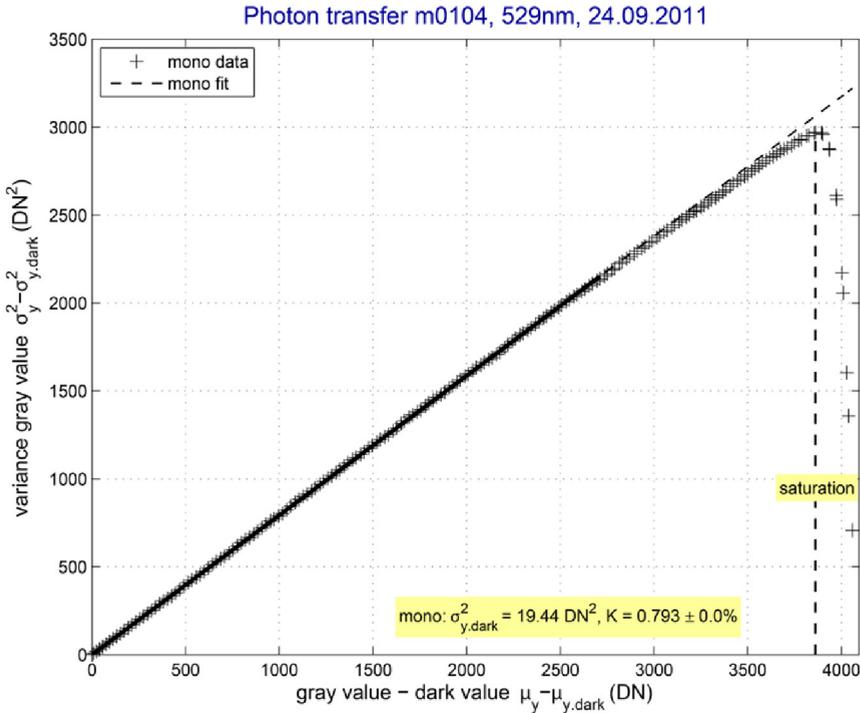


Abb. 2: Photontransferkurve einer modernen CMOS-Kamera

Das so definierte Rauschen wird dann mit dem Verstärkungsfaktor K verstärkt. Lediglich eine weitere signifikante Rauschquelle tritt nach der Verstärkung auf und muss auch an dieser Stelle betrachtet werden, das *Quantisierungsrauschen*. Dieses ist ein Pseudoräuschen. Wenn die Quantisierungsintervalle klein genug sind, kann es als uniform betrachtet werden mit einer Varianz

$$\sigma_q^2 = 1/12 \text{ DN} \tag{7}$$

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz addieren sich dann die Varianzen verschiedener Rauschquellen linear (solange die Quantisierungsstufen nicht zu grob sind, siehe (EMVA 2010, Anhang B4, und WIDROW & KOLLAR 2008), sodass sich unter Zuhilfenahme von (2) und (3) ein Gesamtrauschen von

$$\sigma_y^2 = K^2 \sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K(\mu_y - \mu_{y, \text{dark}}) \tag{8}$$

ergibt. Die Varianz steigt damit linear zum photoneninduzierten Grauwert an. Rauschen ist ausnahmsweise einmal für etwas gut: Aus der Steigung ergibt sich dann ohne jegliche Kenntnisse über die Kameraelektronik der absolute Verstärkungsfaktor K und aus dem Achsenabschnitt nach Abzug des Quantisierungsrauschens die Varianz des Dunkelrauschens, σ_d^2 .

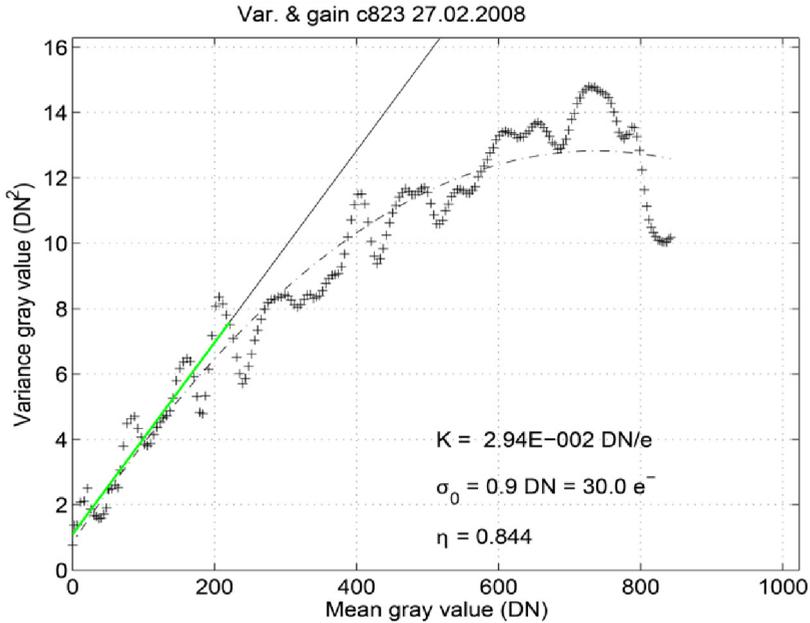


Abb. 3: Photontransferkurve einer CMOS-Kamera mit fehlerhaftem ADC

Mit bekanntem Verstärkungsfaktor K kann aus der Steigung der Kamerakennlinie in Gleichung (3) auch die Quantenausbeute berechnet werden. Diese Methode wird nach JANE-SICK (1985) *Photontransfermethode* genannt.

Gute reale Kameras zeigen die erwartete lineare Photontransferkurve (Abb. 2) und belegen daher, wie gut der modellbasierte Ansatz des Standards 1228 ist. Umgekehrt ausgedrückt: Abweichungen in der Kamerakennlinie und insbesondere der Photontransferkurve (Abb. 3) zeigen klar Sensordefizite und sind zu einem wichtigen Hilfsmittel bei der Sensor- und Kameraentwicklung geworden.

3 Signal/Rausch-Verhältnis und abgeleitete Parameter

Der zentrale Parameter für die Qualität eines Kamerasignals ist das Verhältnis des Signals zum Rauschen, definiert als das *Signal/Rausch-Verhältnis*:

$$SNR = \frac{\mu_y - \mu_{y, \text{dark}}}{\sigma_y} \quad (9)$$

Mithilfe der Kamerakennlinie und der Photontransferkurve kann das SNR als Funktion der Bestrahlungsstärke in Einheiten Photonenzahl/Pixel, μ_p , ausgedrückt werden:

$$SNR(\mu_p) = \frac{\eta \mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2 / K^2 + \eta \mu_p}} \quad (10)$$

Unter Vernachlässigung des Quantisierungsrauschens hängt das SNR nicht von der Kameraverstärkung K ab. Das leuchtet intuitiv ein, da Rauschen und Signal bei einer linearen

Kennlinie gleichermaßen verstärkt werden. Die Formel wird verständlicher, wenn die Grenzfälle von viel und wenig Licht betrachtet werden. Dann ergibt sich

$$SNR(\mu_p) = \begin{cases} \sqrt{\eta\mu_p}\eta\mu_p \gg \sigma_d^2 \\ \frac{\eta\mu_p}{\sigma_d}\eta\mu_p \ll \sigma_d^2 \end{cases} \quad (11)$$

Diese Gleichungen besagen, dass das SNR bei kleinem Signal bzw. hohem Dunkelrauschen zuerst linear mit der Bestrahlung anwächst, bei hoher Bestrahlungsstärke aber nur noch mit der Wurzel der Bestrahlung. In einer doppelt-logarithmischen Darstellung ändert sich die Steigung daher von 1 auf 0.5 (Abb. 2). Es ist leicht möglich, die Werte für den bestmöglichen Sensor anzugeben. Dieser hat eine Quantenausbeute von eins und kein Dunkelrauschen und damit ist nach Gleichung (10)

$$SNR_{ideal}(\mu_p) = \sqrt{\mu_p} \quad (12)$$

Besser kann kein realer Sensor sein. Bei viel Licht ist ein realer Sensor im SNR nur um den Faktor $\eta(\lambda)^{1/2}$ geringer, bei wenig Licht hängt die Verschlechterung vom Dunkelrauschen ab, und das SNR ist gegenüber einem idealen Sensor um den Faktor $\eta(\lambda) \mu_p^{1/2} / \sigma_d$ wesentlich geringer.

Aus der SNR-Kurve in doppelt-logarithmischer Auftragung (Abb. 4) lassen sich alle weiteren sekundären Parameter ableiten, die mittlere Eigenschaften des Bildsensors beschreiben. Als Beispiel sind hier die Sättigungskapazität, die Empfindlichkeitsschwelle und der Signalumfang (DR) beschrieben. Man muss man den digitalen Grauwert nehmen, bei dem die Verteilung um diesen Grauwert noch nicht nach oben abgeschnitten wird. Als zuverlässiges Maß dafür hat sich der mittlere Grauwert μ_y ergeben mit der maximalen Varianz σ_y . Die Grauwertvarianz steigt ja linear mit dem Grauwert an und fällt dann scharf ab, wenn die Grauwertverteilung abgeschnitten wird. Die Sättigungskapazität ist daher ein praktisches Maß für die maximale Photonenzahl, die ein Sensor per Pixel messen kann. Aus der Umkehrfunktion zu Gleichung (10) ergibt sich die minimale Photonenzahl, die ein Bildsensor messen kann, die *Empfindlichkeitsschwelle* (*absolute sensitivity threshold*) $\mu_{p,min}$. Diese ist definiert durch die Photonenzahl (Bestrahlung) bei der das SNR eins ist. Aus Gleichung (10) folgt

$$\mu_p(SNR=1) = \mu_{p,min} \approx \frac{1}{\eta} \left(\frac{\sigma_{y,dark}}{K} + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{\eta} \left(\sigma_d + \frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

Der *Signalumfang* (*dynamic range* DR) ist das Verhältnis von Sättigungskapazität zur Empfindlichkeitsschwelle):

$$DR = \frac{\mu_{p,sat}}{\mu_{p,min}} \quad (14)$$

und wird im 1288 Standard als direktes Verhältnis, dB-Wert ($20 \log_{10} DR$) und in bits ($\log_2 DR$) angegeben. Die von der SNR-Kurve abgeleiteten Parameter können auch direkt graphisch aus der doppelt-logarithmischen SNR-Kurve abgelesen werden (Abb. 4).

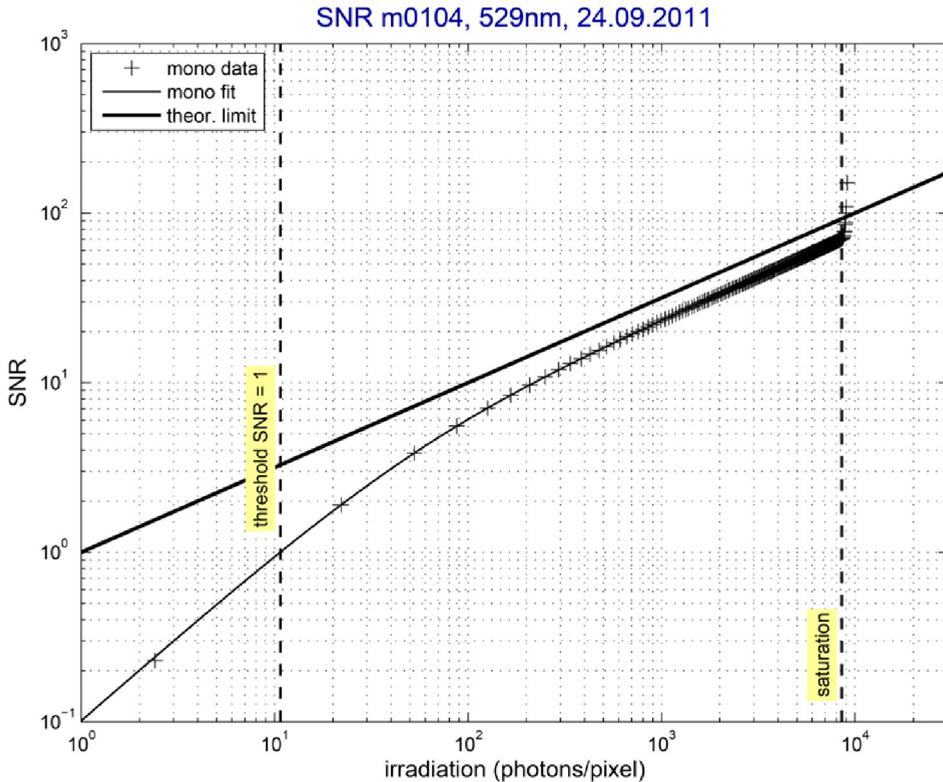


Abb. 4: SNR Kurve einer monochromen CMOS-Kamera

4 Inhomogenitäten

Bisher wurden nur die mittleren Eigenschaften des Bildsignals betrachtet. Genauso wichtig für die Qualität eines Sensors ist aber auch wie gleichmäßig der Dunkelwert und die Empfindlichkeit des Bildsensors sind. Diese beiden Größen werden „*dark signal nonuniformity*“ (DSNU) und „*photoresponse nonuniformity*“ (PRNU) genannt. Auf den ersten Blick könnte man meinen, dass es ausreichend ist, die Standardabweichung bzw. Varianz der räumlichen Variationen anzugeben, wie dies auch beim zeitlichen Rauschen der Fall ist. Das wäre in der Tat so, wenn die räumlichen Schwankungen wie die zeitlichen Signalschwankungen von Pixel zu Pixel völlig unabhängig wären („weißes Rauschen“). Leider weist das räumliche Rauschen („fixed pattern noise“) ein wesentlich kompliziertes Spektrum auf. Deswegen sagt die Angabe der räumlichen Standardabweichung für sich allein relativ wenig aus. Es lassen sich vier Klassen räumlicher Variationen unterscheiden:

Langsame Variationen. Diese degradieren die Bildqualität kaum, da das menschliche Auge diesen Effekt kaum bemerkt und auch die meisten Bildverarbeitungsoperationen kaum stört. Hinzu kommt, dass alle Optiken einen mehr oder weniger großen Abfall der

Bestrahlungsstärke zum Rand des Sensors aufweisen, sodass dieser Teil der PRNU zusammen mit der benutzten Optik korrigiert werden muss.

Periodische Muster. Diese bemerkt das Auge sehr empfindlich und viele Bildverarbeitungsoperationen werden dadurch gestört. Ursache für periodische Muster im Bild sind elektronische Interferenzen oder Übersprechen in der Kameraelektronik. Daher ist es notwendig, periodische Muster sorgfältig zu messen. Im EMVA Standard 1288 können periodische Muster empfindlich durch Spektrogramme (Berechnung des Leistungsspektrums durch Fouriertransformation) in horizontaler und vertikaler Richtung vermessen werden.

Zufällige Variationen. Dieser Teil der DSNU bzw. PRNU produziert wie die zeitlichen Fluktuationen ein weißes Rauschen, das aus den Spektrogrammen berechnet werden kann. Es wird im 1288 Standard als „weiße“ Standardabweichung s_{white} angegeben und verglichen mit der totalen Standardabweichung, sodass die relative Stärke der periodischen Muster an den räumlichen Grauwertvarianzen angegeben werden kann („non-whiteness factor“).

Ausreißer („defekte Pixel“). Dies sind einzelne Pixel, Pixel Cluster, Zeilen oder Spalten, die signifikante Abweichungen vom Mittelwert außerhalb der zu erwartenden Schwankungsbreite aufweisen. Im Extremfall die Pixel keinerlei Response oder haben einen so hohen Dunkelstrom, dass sie immer übersteuert werden. Ausreißer können in logarithmischen Histogrammen des Dunkel- bzw. Empfindlichkeitsbild empfindlich detektiert werden in Häufigkeit und Grad der Abweichung bis hinunter zu einzelnen Ausreißern.

Damit erlauben die einfachen aber mächtigen Auswertemöglichkeiten des 1288 Standards eine gezielte Analyse aller möglichen Ursachen für Sensorinhomogenitäten sowohl bezüglich DSNU als auch PRNU.

5 Praktischer Kameravergleich

Der hohe Nutzen der Parameter des EMVA 1288 Standards wird nun an einem realen Beispiel erläutert. Dazu werden in Tabelle 1 die gemessenen Parameter von einigen Kameras aufgelistet. Da die Kameraauswahl hier begrenzt sein muss, werden fairerweise die Hersteller nicht genannt. Da es die beste Kamera per se nicht gibt, werden im Folgenden verschiedene typische Anwendungsfälle untersucht.

Generell ist der zentrale Parameter für die Qualität eines Kamerasignals das Verhältnis des photoinduzierten Grauwertsignals $\mu_y - \mu_{y.\text{dark}}$ zur Standardabweichung des zeitlichen Rauschen σ_y , definiert als das *Signal/Rausch-Verhältnis* (Abschn. 3). Für die Frage nach der besten Signalqualität gibt es interessanterweise drei verschiedene Antworten, je nach dem von welchen Beleuchtungsverhältnissen man ausgeht (Tabelle 2):

SNR bei viel Licht. Wenn in einer Anwendung genügend Licht vorhanden ist, kommt es auf die absolute Bestrahlungsstärke überhaupt nicht an. Entscheidend ist nur, welche Signalqualität die Kamera bei der Sättigungskapazität bzw. relativ zur Sättigungskapazität erreicht. Der Qualitätsparameter ist der EMVA 1288 Parameter

$$\text{SNR}_{\text{max}}(\mu_{p.\text{max}}) = \sqrt{\eta \mu_{p.\text{max}}} \quad (15)$$

Da die Quantenausbeute wenig variiert, wird die Signalqualität in diesem Fall durch die Sättigungskapazität dominiert, die hauptsächlich von der Pixelgröße abhängt. Daher liefern die Kameras D und E mit den größten Pixeln in diesem Fall die besten Werte.

Konstante Bestrahlung pro Pixel. Anders sieht die Situation aus, wenn man von einer konstanten Bestrahlung pro Pixel ausgeht. Dann ergeben sich im Grenzfall hoher und niedriger Bestrahlungsstärke die Qualitätsparameter direkt aus Gleichung (3). Bei hoher Bestrahlungsstärke pro Pixel ist nur die Quantenausbeute von Bedeutung und alle Kameras bis auf die Kamera B zeigen vergleichbare Signalqualitäten. Bei niedriger Bestrahlungsstärke dominiert der Qualitätsparameter $\eta\mu_p/\sigma_d$, sodass die Kameras mit niedrigem Dunkelrauschen im Vergleich gesehen immer bessere Signale liefern (Tabelle 2) und Kamera E der klare Gewinner ist.

Konstante Bestrahlungsstärke. Schließlich kann man auch von einer konstanten Bestrahlungsstärke $E_p = \mu_p/A$ ausgehen. Das ist dann gegeben, wenn man unabhängig von der Pixelfläche A von Objektiven mit der gleichen Blendenöffnung ausgeht. Das SNR ergibt sich dann als Funktion der Bestrahlungsstärke zu

$$SNR(E_p) = \frac{\eta E_p A}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 + \eta E_p A}} \quad (16)$$

Jetzt spielt die Pixelfläche A eine wesentliche Rolle. Bei hohen Bestrahlungsstärken ist sie der dominante Faktor, bei niedrigen ist es das Dunkelrauschen pro Fläche (Tabelle 1 und 2). Bei hoher Bestrahlungsstärke haben die Kameras D und E noch ein vergleichbares SNR, während zu kleineren Bestrahlungsstärken hin Kamera E immer besser wird.

Bei den Betrachtungen zur Signalqualität wurden die räumlichen Inhomogenitäten vernachlässigt, die natürlich die Signalqualität bezogen auf eine Variation von Pixel zu Pixel zusätzlich beeinträchtigen. Sowohl der Dunkelwert als auch die Empfindlichkeit schwanken von Pixel zu Pixel. Diese Effekte wurden hier vernachlässigt, da sie durch eine Nachkalibrierung (Shading-Korrektur) weiter vermindert werden, sodass sie keinen nennenswerten Einfluss mehr haben.

Bestmöglicher Signalumfang. Der Signalumfang DR (Gleichung 14) ist dann ein wichtiger Qualitätsparameter, wenn eine Szene aufgenommen werden muss, die hohe Variationen in der Lichtstärke aufweist. Die Kamera mit dem besten Signalumfang kann direkt aus dem entsprechenden EMVA 1288 Parameter in Tabelle 1 abgelesen werden. Kamera E mit der Kombination aus hoher Sättigungskapazität und niedrigem Dunkelrauschen bzw. niedriger absoluter Empfindlichkeitsschwelle ist der klare Gewinner und zeigt einen mehr als zehnmal besseren Wert als die nächstbessere Kamera.

Tabelle 1: Kameraparameter einiger moderner monochromer 2-5 Mpixel Kameras gemessen nach dem Standard EMVA 1288 mit grünem Licht (529 nm). Kursiv gedruckt sind sekundäre Wert, die aus den EMVA 1288 Parametern berechnet wurden, fett gedruckt die jeweilig besten Werte. Wenn Spitzenwerte nahe beieinanderliegen, werden alle Werte innerhalb eines Bereichs von 20 % fett gedruckt. Alle Kameras bei Zimmertemperatur gemessen; bei Kamera E ist der Chip auf 5 °C gekühlt.

Kamera	A	B	C	D	E
Sensortyp	CCD	CCD	CMOS	CMOS	sCMOS
Shuttertyp (nur für CMOS)			rolling	global	rolling
Quadratische Pixelgröße (μm)	4,4	3,45	2,2	5,5	6,5
Auflösung (bit)	12	12	12	12	16
Quantenausbeute @ 529 nm	0,56	0,49	0,57	0,60	0,55
Verstärkungsfaktor K (DN/e^-)	0,434	0,660	0,793	0,0864	1,99
Dunkelrauschen (DN)	3,32	9,01	4,41	1,11	2,70
Dunkelrauschen (e^-)	7,6	13,6	5,5	12,4	1,4
DSNU1288 (DN)	0,26	1,78	1,11	1,07	2,0
DSNU1288 (e^-)	0,6	2,7	1,4	12,4	1,0
SNR_{max}	98,2	79,4	70,9	111,4	181
$\text{SNR}_{\text{max}}^{-1}$ (%)	1,02	1,26	1,41	0,90	0,55
PRNU1288 (%)	0,52	0,54	1,52	0,95	0,48
Empfindlichkeitsschwelle, (Phot./Pixel)	15	29	11	22	3,5
<i>Empfindlichkeitsschwelle, (Phot./μm^2)</i>	<i>0,77</i>	<i>2,4</i>	<i>2,27</i>	<i>0,72</i>	<i>0,08</i>
Sättigungskapazität (Photonen/Pixel)	16440	11620	8547	19200	59400
<i>Sättigungskapazität (Photonen/μm^2)</i>	<i>850</i>	<i>976</i>	<i>1766</i>	<i>635</i>	<i>1400</i>
Dynamic range	1118	405	800	860	16750
Dunkelstrom (DN/s)	13,9	13,0	12,8	30,6	41
Dunkelstrom (e^-/s)	32	20	16	354	21

Tabelle 2: Beste Signalqualität unter drei verschiedenen Annahmen über die Bestrahlung

Kamera	A	B	C	D	E
SNR bezogen auf Sättigungskapazität					
SNR bei Sättigungskapazität	95,7	74,3	69,6	106,6	181
SNR bei 50 % Sättigungskapazität	67,4	51,7	49,1	74,9	128
SNR bei 10 % Sättigungskapazität	29,4	20,7	21,4	31,9	57
SNR bei konstanter Bestrahlung pro Pixel					
SNR bei 5000 Photonen/Pixel	52,4	47,7	53,1	53,4	53,4
SNR bei 100 Photonen/Pixel	5,3	3,2	6,1	4,1	7,4
SNR bei 10 Photonen/Pixel	0,70	0,36	0,95	0,47	2,1
SNR bei konstanter Bestrahlungsstärke					
SNR bei 500 Photonen/ μm^2	73,3	52,4	36,7	94,5	109,7
SNR bei 50 Photonen/ μm^2	22,1	13,4	10,6	27,9	34,7
SNR bei 10 Photonen/ μm^2	8,4	3,7	3,6	9,9	15,5
SNR bei 1 Photonen/ μm^2	1,3	0,42	0,48	1,4	4,7

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Standard 1288 der EMVA stellt ein theoretisch fundiertes und in der Praxis über Jahre bewährtes Instrumentarium zur objektiven Charakterisierung von Bildsensoren und Kameras dar – nach dem Prinzip „so einfach wie möglich“ aber ohne unerlaubte Vereinfachung. Der Beitrag zeigt, dass der Standard EMVA 1288 mit wenigen Parametern differenzierte und zuverlässige Aussagen über die beste Kamera für gegebene Einsatzfälle ermöglicht.

Eine Reihe von Firmen bietet Testequipment bzw. 1288 kompatible Kameravermessung als Serviceleistungen an (<http://www.aphesa.com/>, <http://www.emva1288.aeon.de>, <http://www.image-engineering.de/>).

Schulungsangebote gibt es bei Framos (<http://www.framos.eu/news/training-dates.html>) und AEON (<http://www.schulung.aeon.de/emva.html>).

Release 3.0 hat sich bewährt und ist inzwischen mit minimalen Erweiterungen bzw. geringfügigen Änderungen durch Release 3.1 abgelöst werden. Für Release 4.0 soll unter anderem die Beschreibung der Sensornichtlinearität präzisiert und der Standard auf nichtlineare Kamera-Kennlinien und High-Dynamic-Range-Kameras ergänzt werden.

Geplant ist auch den EMVA 1288 Standard auf 3D-Kamerasysteme zu erweitern. Dazu wurde schon eine Unterarbeitsgruppe gebildet. Für bildaufnehmende 3D-Systeme werden sich die bewährten Prinzipien des Standards 1288 (Abschnitt 1) weitgehend übertragen lassen. Für Tiefenbilder werden in gleicher Weise wie für Intensitätsbilder die statistische Unsicherheit, die systematischen Fehler und die Inhomogenitäten angegeben werden.

Vermutlich wird die Erweiterung des Standards 1288 auf 3D-Systeme zweistufig sein. Für viele Systeme wird eine Beschreibung des eingesetzten Sensors als Komponente sinnvoll sein, z. B. für PMD-Sensoren. Es wird aber auch eine Charakterisierung des Gesamtsystems mit Lichtquelle und Optik notwendig sein, um Systeme, die auf unterschiedlichen Prinzipien basieren, objektiv miteinander vergleichen zu können. Auf dieser Ebene wird es auch notwendig sein, den Einfluss des Umgebungslichtes auf die Tiefenbilder zu charakterisieren.

Literatur

- European Machine Vision Organization (2010): EMVA Standard 1288, Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras, Release 3.0. Nov. 2010, www.emva.org.
- Jähne, B. (2012): Objektive Charakterisierung von Bildsensoren und digitalen Kameras Standard 1288 der European Machine Vision Association (EMVA 1288). FKT, 5, S. 239-245.
- Janesick, J. R. (1985): CCD characterization using the photon transfer technique. SPIE Proc., Vol. 570, S. 7-19.
- Saleh, B. E. A. & Teich, M. C. (2007): Fundamentals of Photonics. 2nd Ed. Wiley-Interscience: Hoboken, NJ.
- Widrow, B. & Kollar, I. (2008): Quantization Noise. Cambridge, NY.