Hochschule Mainz – University of Applied Sciences; Universität Koblenz-Landau

GENAUIGKEITSABSCHÄTZUNG VON BÜNDELBLOCKAUSGLEICHUNGEN MITHILFE DES EMVA1288-STANDARDS

Waldemar Kisser, Frank Boochs, Dietrich Paulus

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt die a priori Abschätzung erreichbarer Genauigkeiten der Bündelblockausgleichung. Dies geschieht mithilfe des EMVA1288-Standards. Durch numerische Simulationen wird hierzu zunächst die Zentrumsunsicherheit der Zielmarken mit der daraus folgenden Objektraumunsicherheit verknüpft. Der nächste Schritt ist eine Verknüpfung der EMVA1288-Kennzahlen und der daraus resultierenden Unsicherheit eines Grauwerts mit Algorithmen zur Ellipsendetektion. Abschließend wird ein stochastisches Modell vorgeschlagen und an einer real durchgeführten Kamerakalibrierung untersucht.

Schlüsselwörter: Photogrammetrie, Bündelblockausgleichung, EMVA1288

ACCURACY ESTIMATION FOR BUNDLE-ADJUSTMENTS BY USING THE EMVA1288 STANDARD

Abstract: This article describes a method which predicts the resulting bundle-adjustment accuracies, by using the EMVA1288 standard. In the first step a numerical simulation is done, which links the target accuracy in the image space with accuracies in the object space. The next step links EMVA1288 parameters to target detection algorithms in order to approximate the uncertainty resulting from grey value noise. Finally a real camera calibration with the proposed stochastic model is carried out.

Keywords: Photogrammetry, Bundle adjustment, EMVA1288

Autoren

M. Sc. Waldemar Kisser
Prof. Dr.-Ing. Frank Boochs
Hochschule Mainz – University of Applied Sciences
i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik
Lucy-Hillebrand-Str. 2
D-55128 Mainz
E: waldemar.kisser@hs-mainz.de
frank.boochs@hs-mainz.de

Prof. Dr.-Ing. Dietrich Paulus
Universität Koblenz-Landau
Institut für Computervisualistik
Arbeitsgruppe Aktives Sehen
Universitätsstraße 1
D-56070 Koblenz
E: paulus@uni-koblenz.de

1 MOTIVATION

Die klassische Photogrammetrie verändert sich durch die Zunahme digitaler Kamerasysteme sehr schnell, analoge Modelle weichen in fast allen Bereichen ihren digitalen Konkurrenten. Auch deshalb, weil Letztere einen höheren Grad an Genauigkeit und Automatisierung erzielen und dadurch ganz neue Aufgabenspektren erschließen.

Moderne photogrammetrische Systeme lassen sich gut im Dienstleistungssektor einsetzen, etwa in der Qualitätskontrolle der Werkstücke oder entlang einer Fließbandfertigung. Doch im Gegensatz zu den bilderzeugenden Instrumenten basiert das zugrunde liegende mathematische Gerüst meistens noch auf Verfahren aus der Zeit der analogen Kameras. Fairerweise muss ergänzt werden, dass ein Theorieumbruch zunächst nicht notwendig schien, da das Genauigkeitspotenzial aufgrund anderer Hürden limitiert war und nicht zwangsläufig durch bessere Modelle gesteigert werden konnte. Dies hat sich durch moderne Kamerasensoren geändert. Diese können mittlerweile deutlich genauer und hochauflösender gefertigt werden. Daher wirkt es sich positiv auf die Genauigkeit aus, wenn die Feinheiten der Digitalsensoren bei der Auswertung berücksichtigt werden.

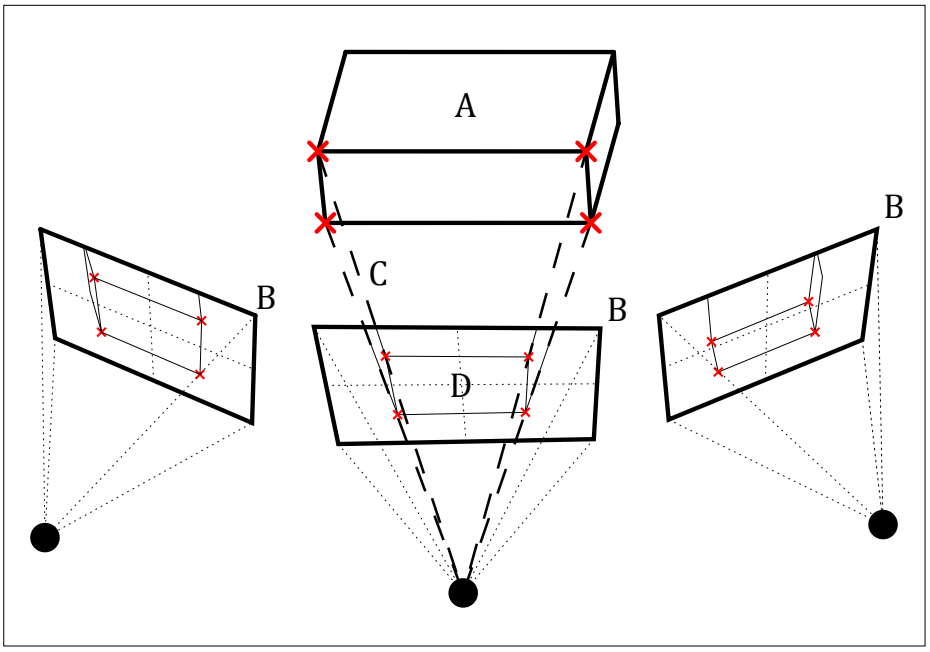

Abbildung 1: Rekonstruktion durch Mehrbildphotogrammetrie: A) Objekt zur Vermessung, B) verschiedene Kamerapositionen, C) Projektionsgeometrie, D) Projektion in Sensorebene

2 VOM BILD ZUR OBJEKTGEOMETRIE

Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen photogrammetrischen 3D-Rekonstruktionsprozess. Die Geometrie eines Objekts (A) soll anhand seiner Eckpunkte (Kreuze) bestimmt werden. Hierzu wird es aus verschiedenen Standpunkten und Perspektiven aufgenommen (B). Während des Abbildungsprozesses wird das dreidimensionale Objekt mithilfe projektiver Strahlen (C) in die Bildebene (D) transformiert. Sie entspricht der Sensorebene und hat nur zwei Dimensionen. Die markanten Verknüpfungspunkte lassen sich dort mithilfe der Bildverarbeitung automatisch bestimmen.

Als besonders robust und genau erweist sich der Einsatz von Kreiszielmarken. Diese werden vor allem in der Nahbereichsphotogrammetrie verwendet, wenn diese am Objekt angebracht werden können. Gemäß Luhmann (2010a) werden so unter optimalen Bedingungen Genauigkeiten von 1/100 bis 5/100 px erreicht. Abbildung 2 zeigt eine codierte Zielmarke. Der Code (außen) dient zur widerspruchsfreien Identifizierung und erleichtert damit die Zuordnung der Punkte in mehreren Bildern. In der Mitte befindet sich ein Kreis. Zur Bestimmung dessen Zentrums existieren mittlerweile mehrere unabhängige Algorithmen, wie die Berechnung des Grauwertschwerpunkts (Maas 1992) oder eine Ellipsenausgleichung mit der Kleinste-Quadrate-Methode. In der Bildunterschrift wird der Zusatz „fehlerfrei" verwendet, da es sich bei diesem Modell um eine Vektorgrafik handelt. In dieser gibt es keinerlei Störquellen, weder Modellierungsfehler noch Unebenheiten. Aus mehreren Bildern lässt sich über solche Verknüpfungspunkte die dritte Dimension errechnen. Einen Überblick über die Theorie der 3D-Rekonstruktion und der hier verwendeten Methoden bieten Kraus (2004), Luhmann (2010a) und Luhmann (2010b). In den meisten Fällen ist die Objektgeometrie (X, Y, Z) oder Kameraposition (X_0, Y_0, Z_0) samt Ausrichtung (ω, ϕ, κ) die benötigte Information. Diese Werte werden mittels mathematischer Optimierung bestmöglich bestimmt. Aus der Theorie ergibt sich ein Zusammenhang, der in Diagramm 1 dargestellt wird.

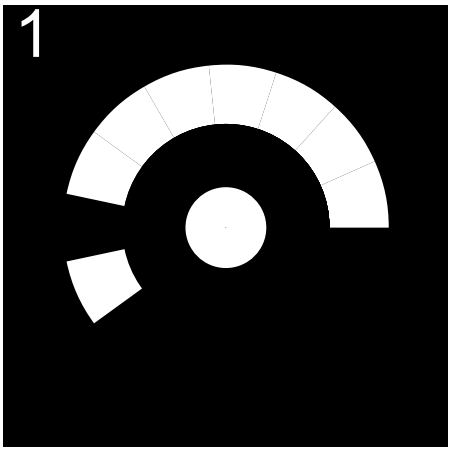

Abbildung 2: Fehlerfreies Modell einer codierten Zielmarke

Der Zielfindungsoperator liefert die Verknüpfungspunkte im Bildraum (x, y). Diese besitzen aufgrund der in den folgenden Abschnitten beschriebenen physikalischen Eigenschaften des Sensors ein gewisses Rauschniveau (σ_x,σ_y). Während der Initialausrichtung mit den Parametern (ω, ϕ, κ, X_0,Y_0,Z_0) werden einzelne Bilder grob ausgerichtet und zueinander in Bezug gebracht. Dadurch pflanzt sich die Unsicherheit σ_x,σ_y in die Initialausrichtung (in Form von σ_{X0}, σ_{Y0}, σ_{Z0}, σ_ω, σ_ϕ, σ_κ, σ_x, σ_y, σ_z) fort. Die Parameter der Initialausrichtung dienen als Startwerte für das linearisierte Gleichungssystem der Bündelblockausgleichung. Auch hier besteht eine Fehlerfortpflanzung, insbesondere dann, wenn der Bündelblock als freies Netz ohne korrigierende Zwangsbedingungen ausgeglichen wird und die Näherungswerte der Initialausrichtung als Datum (Translation, Rotation, Maßstab) in den Berechnungsprozess eingehen. Zusammengefasst ist der Zielfindungsoperator

zunächst der limitierende Faktor der insgesamt erreichbaren Genauigkeit.

In der hier vorgestellten Arbeit wird der Fokus ausschließlich auf die Bildmessgenauigkeit und deren Limitierung durch den Sensor gelegt. Deshalb werden alle Fehlerquellen, wie die Verzeichnung durch das Objektiv, die kein Teil der EMVA1288 (2010) sind, zur Vereinfachung der Thematik außer Acht gelassen.

In den meisten Projekten ist der Anwender primär an der Ausrichtung des Sensors und/oder der Objektraumgeometrie interessiert. In Projektverträgen sind daneben auch häufig die erwarteten Genauigkeiten festgeschrieben. Aus solchen Vorgaben wird die Aufnahmemethode und Hardware mithilfe von Erfahrungswerten und Näherungsberechnungen zusammengestellt. Im Folgenden wird eine Vorgehensweise beschrieben, mit der die Objektraumgenauigkeiten in der Planung aus dem Sensorrauschen abgeleitet werden können. Dies geschieht zunächst über eine Verknüpfung des Bildrauschens mit der Objektraumgenauigkeit. Danach wird das Sensorrauschen gemäß EMVA1288 in Bezug zum Grauwertrauschen und damit auch zum Bildrauschen gebracht.

Ellipsendetektion	
Messwerte im Bildraum	x, y, σ_x, σ_y
↓	
Startwerte für die Initialausrichtung	
Näherungswerte im Objektraum	$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa, X, Y, Z$ $\sigma_{X_0}, \sigma_{Y_0}, \sigma_{Z_0}, \sigma_\omega, \sigma_\phi, \sigma_\kappa, \sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$
↓	
Bündelblockausgleichung	
Objektgeometrie	$\hat{X}_0, \hat{Y}_0, \hat{Z}_0, \hat{\omega}, \hat{\phi}, \hat{\kappa}, \hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$ $\sigma_{\hat{\omega}}, \sigma_{\hat{\phi}}, \sigma_{\hat{\kappa}}, \sigma_{\hat{X}}, \sigma_{\hat{Y}}, \sigma_{\hat{Z}}$

Diagramm 1: Zusammenhang zwischen Bildmessung und Objektgeometrie

3 VERKNÜPFUNG DER BILD- UND OBJEKTRAUMGENAUIGKEIT

Die Verknüpfung von Bildraum- und Objektraumgenauigkeit erfolgt mit einer numerischen Simulation. Dies ist notwendig, da die bekannten Näherungsformeln bzw. Faustregeln oft nur eine begrenzte Gültigkeit besitzen (z. B. Stereonormalfall) oder nur eine empirisch bekannte Genauigkeitsangabe liefern. Bei Mehrkamerasystemen, großen Maßstabsunterschieden, unterschiedlichen Zielmarken und Rauschniveaus der Sensoren verliert eine solche Approximation i. d. R. vollständig ihre Voraussagetauglichkeit. Dagegen lässt sich eine numerische Simulation an beliebig komplizierte Objekte und Kamerakonfigurationen anpassen. Auch können externe oder neu entdeckte Störquellen bei Bedarf modelliert werden, um den Genauigkeitsgrad der Voraussage zu steigern.

Als Objektgeometrie wird, wie in Abbildung 3 dargestellt, ein quaderförmiger (links, 2 × 2 × 1,5 m) nach VDI/VDE 2634 (2002), sowie ein ebener (rechts 2 × 1,5 m) Kalibrierkörper verwendet. Die Objektpunkte (30 mm Durchmesser) werden dreidimensional modelliert und durch Projektionsgleichungen eines 8-mm-Objektivs in die 5,632 × 4,224 mm (2,2 µm Pixelabstand) Bildebene transformiert. Diese Modellierung entspricht der realen Konfiguration (CMOS-Sensor und 8-mm-Objektiv), die in diesem Beitrag für das später folgende Praxisbeispiel verwendet wird. Die berechneten Bildkoordinaten sind durch die vollständig numerische Handhabung frei von genauigkeitsmindernden systematischen Effekten wie Ellipsen-Exzentrizitäten (Mordwinzew 2015), Offsets und Rau-

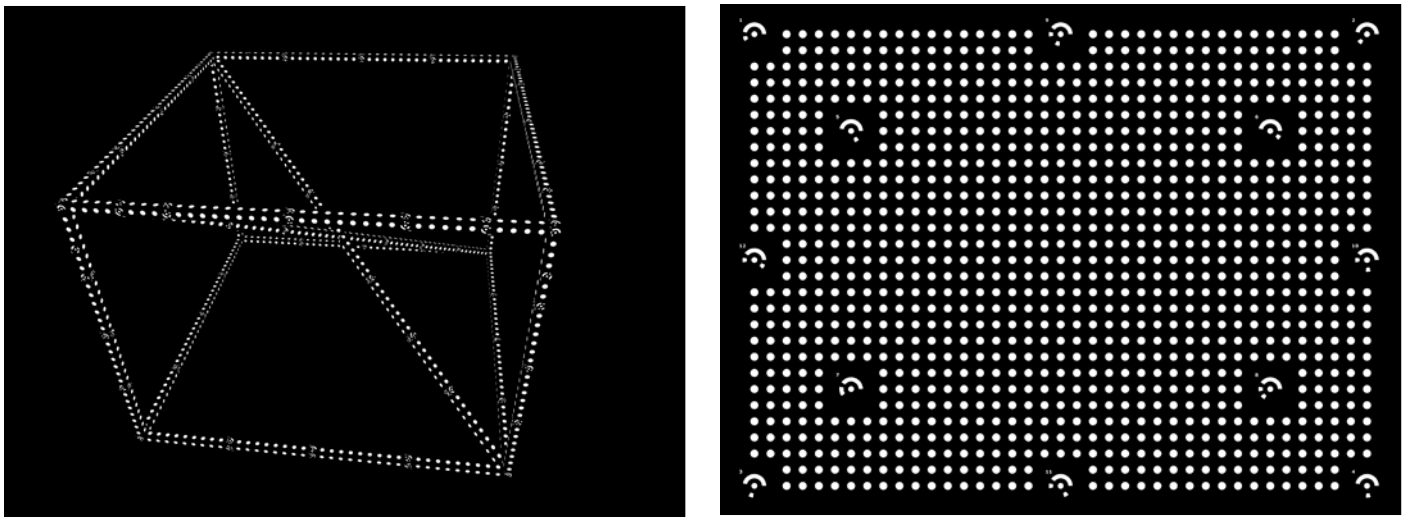

Abbildung 3: Links: Kalibrierkubus gemäß VDI/VDE 2634 (2002), rechts: ebene Kalibrierplatte

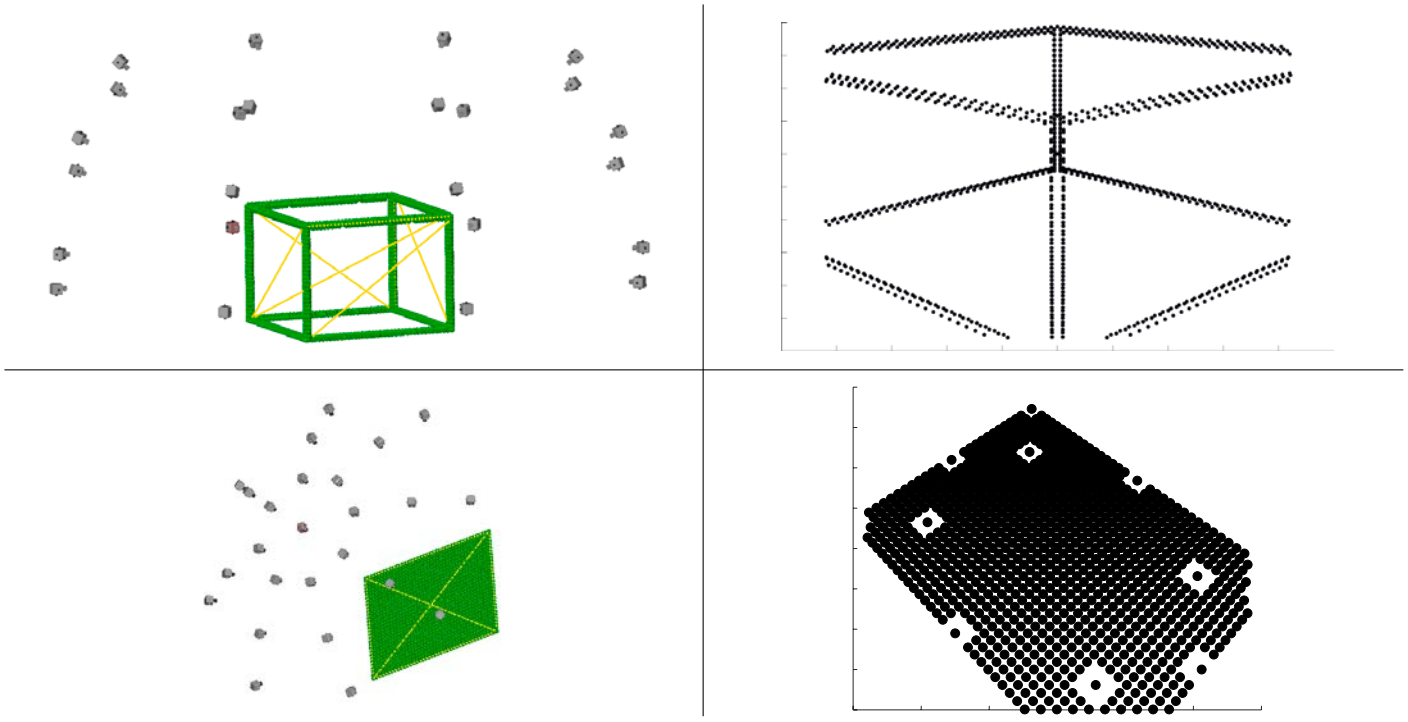

Abbildung 4: Übersicht der numerischen Simulation. Oben links: Kamerapositionen-Kubus, oben rechts: Einzelbildkubus, unten links: Kamerapositionen-Ebene, unten rechts: Einzelbildebene.

schen des Raytracings, Diskretisierungs- und Rasterisierungsfehlern. Damit ist das modellierte Störmodell die einzige Ursache für die Abweichungen.

Abbildung 4 visualisiert die nummerische Simulation. Die grauen Punkte repräsentieren die Kamerapositionen. Grün ist die Farbe der Punkte im Objektraum. Die Prüfstrecken sind in Gelb dargestellt. Der obere Teil der Abbildung zeigt den 3D-Kalibrierkubus. In jedem Kamerastandpunkt wird der Sensor zusätzlich viermal um die Sichtachse gedreht. Während einer realen Kalibrierung verbessert sich damit die Trennung (Dekorrelation) der Verzeichnungsparameter. Dieser Datensatz besitzt etwa einhundert numerische Bilder. Ein solches Einzelbild ist oben rechts dargestellt. Der untere Bildbereich zeigt eine Kalibrierebene (links) und ein so generiertes Einzelbild (rechts).

Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang zwischen der bildseitigen Unsicherheit des Zielmarkenzentrums und der Ungenauigkeit der Objektkoordinaten Δ nach einer Kamerakalibrierung (siehe Gl. (1) und Gl. (2)).

$$\Delta = \sqrt{RMS_{\hat{X}}^2 + RMS_{\hat{Y}}^2 + RMS_{\hat{Z}}^2} \quad (1)$$

$$\mathrm{XY}\Delta = \sqrt{RMS_{\hat{X}}^2 + RMS_{\hat{Y}}^2} \quad (2)$$

Links in Abbildung 5 ist das Ergebnis der 3D- und rechts der 2D-Kalibrierkörper dargestellt. Das ausgewiesene Signifikanzniveau des Objektraums liegt bei 95%. Die Werte der Abszissenachse entstehen, indem das normalverteilte Rauschen über alle Bildpunkte, in allen Aufnahmen, schritt-

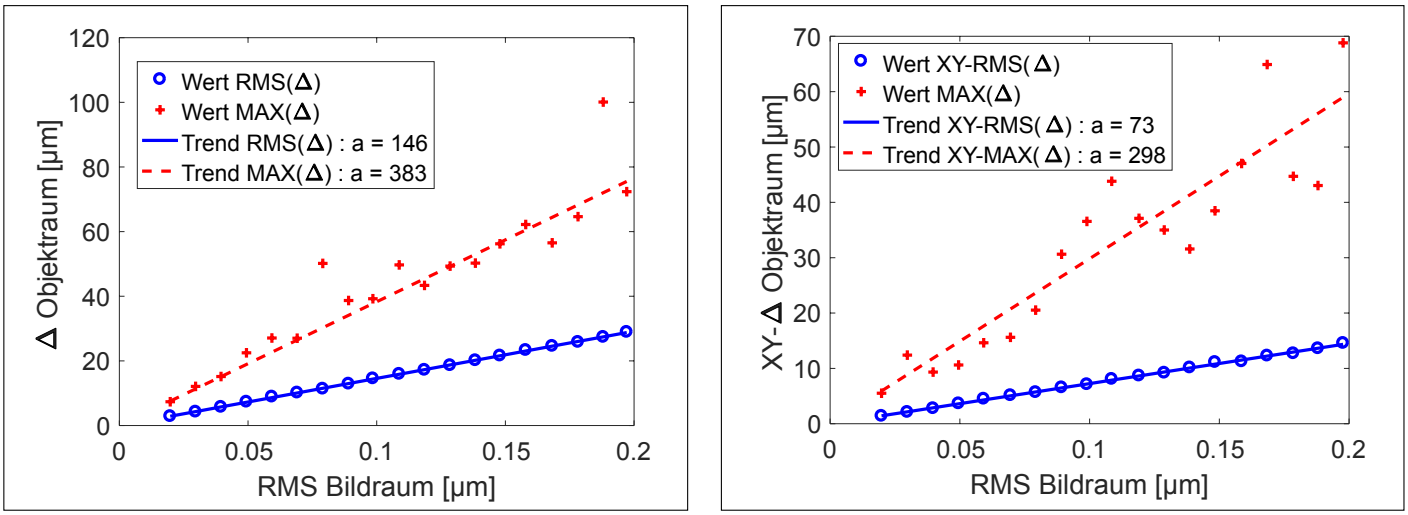

Abbildung 5: Abweichung Delta im Objektraum als Funktion der Zentrumunsicherheit der Zielmarken im Bildraum. Links: 3D-Kalibrierkubus, rechts: 2D-Kalibrierebene.

weise angehoben wird. Die Wirkung eines verrauschten Bildpunkts auf die resultierende 3D-Koordinate ist bereits hinreichend untersucht und kann wie in Abbildung 6 interpretiert werden.

Statt einer fehlerfreien Bildmessung gibt es eine zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zielmarkenzentrums mit dessen Standardabweichung

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \ .$$

Wenn ein und derselbe fehlerfreie Punkt aus zwei zueinander konvergenten Perspektiven gemessen wird, dann lässt sich dessen Position relativ zu den Kamerapositionen bestimmen. In Abbildung 6 (rechts) wäre dies der Schnittpunkt der durchgezogenen Linie. Bei fehlerbehafteten Beobachtungen hat der Verfolgungsstrahl durch die Standardabweichung eine gewisse Breite (gestrichelte Linien). Diese treffen sich nicht mehr in einem einzigen Punkt, sondern in einer Fehlerellipse (grau hinterlegt). Das Zentrum dieser Zielmarke liegt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb dieser Fläche. Die Fehlerfläche wird größer, sobald die Verfolgungsstrahlen breiter sind oder sich in einem spitzeren Winkel treffen. Damit ist auch die berechnete Position dieses Punkts ungenauer. In der dreidimensionalen Rekonstruktion entsteht ein Fehler-Ellipsoid. Dessen Berechnung erfolgt mit Gleichung (1) und bildet die Ordinate der Abbildung 5. Daraus folgt, dass ungenaue Messungen im Bildraum sich zwangsläufig negativ auf die Genauigkeit im Objektraum auswirken.

Aus diesem Grund liefert das steigende σ_{xy} auch ein steigendes Δ im Objektraum. Der Trend ist für beide Simulationen linear und lässt sich (ausnahmsweise) durch die Berechnung ausgleichender Geraden approximieren. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in dieser Konfiguration jeder µm (Rauschen) im Bildraum zu ≈ 146 µm RMS im Objektraum führt, wenn ein dreidimensionaler Kalibrierkörper verwendet wird. Im Fall der Kalibrierebene sind es lediglich ≈ 73 µm, da hier die deutlich ungenauere dritte Dimension vollständig vernachlässigt wird.

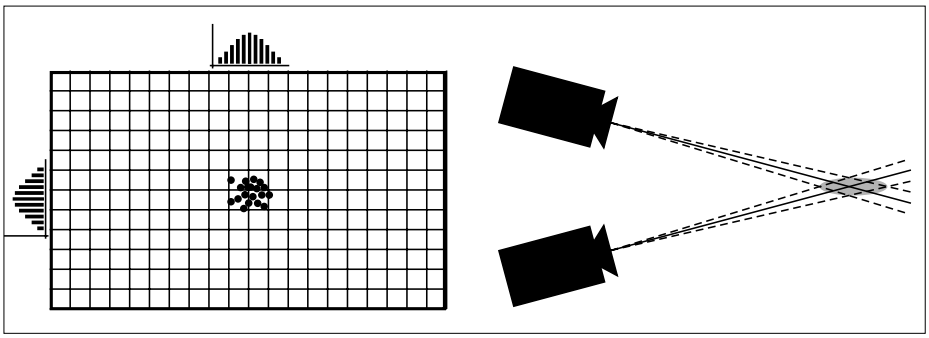

Abbildung 6: Auswirkung einer Rauschkomponente auf die Schnittgenauigkeit. Links: normalverteiltes Rauschen einer Bildkoordinate, rechts: Entstehung der Schnittfläche aus einem Schnittpunkt.

4 VERKNÜPFUNG DER GRAUWERTE MIT DER BILDRAUMGENAUIGKEIT

Dieser Abschnitt widmet sich der Verbindung zwischen den im Bild gemessenen Grauwerten g und deren Rauschen σ_g und σ_{xy}. Wie im Verlauf dieses Abschnitts noch festgestellt wird, hängen diese Abweichungen proportional zusammen und sind deswegen für die angestrebte Genauigkeitsvoraussage von zentraler Bedeutung. Die Verknüpfung erfolgt mit den im EMVA1288-Standard vorgeschlagenen Kennzahlen. Ziel dieses Standards ist es, einheitliche Methoden und Parameter zu definieren, die der Beschreibung und Charakterisierung von Bildsensoren dienen. Eine hardwareferne Betrachtung (Abstraktion) mit der EMVA1288 bietet sich an, da es in der Fertigung von Kamerasensoren viele verschiedene Technologien (z. B CCD, CMOS, Bayer-Pattern, Mikro-Linsen, …) gibt. Auch handelt es sich um vergleichbar schnell ändernde Komponenten, die oft nicht bis ins Detail offengelegt sind. Ein Photogrammeter ist dagegen vorrangig an der Unsicherheit der Bildmessungen interessiert. Zuerst wird hierzu das EMVA1288-Modell eines einzelnen Pixels und dessen Beitrag zum Grauwert beschrieben. Im nächsten Schritt erfolgt der Übergang in die Fläche und dem damit verbundenen Fehlerpotenzial.

4.1 EMVA1288 BLACKBOX-PIXEL

Abbildung 7 fasst das mathematische Modell eines einzelnen EMVA1288-Pixels zusammen (Dierks 2004). Während der Aufnahmezeit erreichen ihn n_p Photonen. Der Photonenfluss ist physikalisch bedingt nicht regelmäßig, sondern stochastisch. Das Muster entspricht einer Poisson-Verteilung, mit dem über die Aufnahmezeit berechneten Wert μ_p und der Varianz $\sigma_p^2 = \mu_p$. Ein perfekter Sensor wandelt jedes Photon in ein Elektron. Dieses Elektron wird ohne Verlust vom perfekten Analog-Digital-Wandler (ADW) durchgehend linear in einen Grauwert umgewandelt. Jedes Elektron inkrementiert während der Aufnahmezeit den Grauwert eines Pixels um 1. So lässt sich die gezählte Photonenzahl aller Pixel 1 zu 1 in einer Matrix als Grauwertbild speichern. In der Praxis gibt es jedoch keine perfekten Pixel. Einen guten Überblick über die in wissenschaftlichen Anwendungen verwendeten Sensoren und deren Ei-

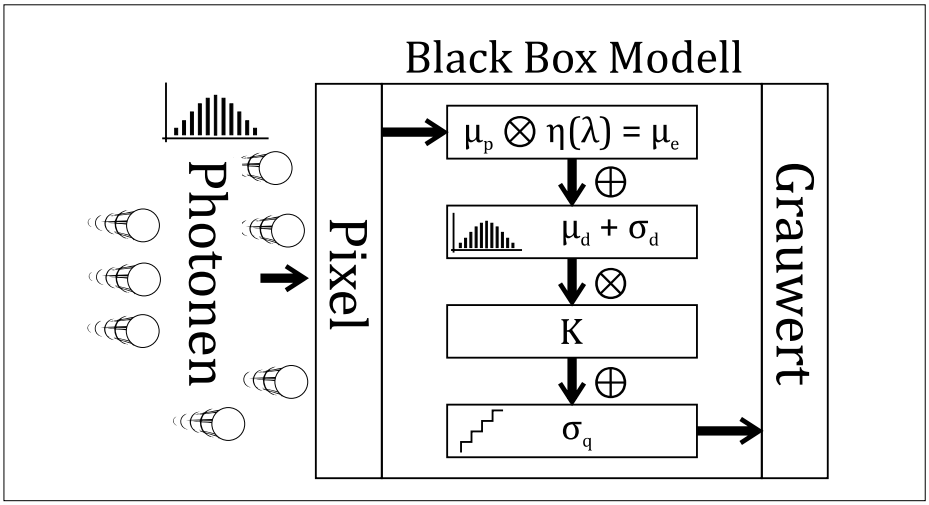

Abbildung 7: Blackbox-Kameramodell nach EVMA1288

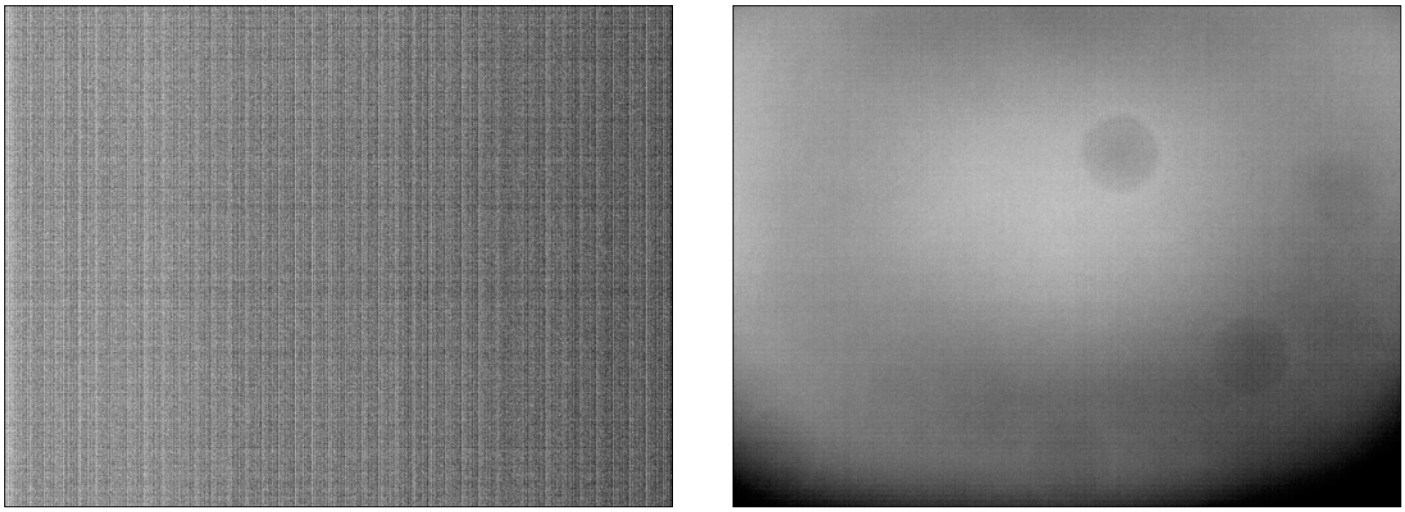

Abbildung 8: DSNU und PRNU eines CMOS-Sensors. Links: kontrastverstärktes Dunkelbild (DSNU), rechts: relative Sensitivität einzelner Pixel für eine Wellenlänge (PRNU).

genschaften bietet Janesick (2001). Jedes einfallende Photon wird in Abhängigkeit von seiner Wellenlänge λ und den physikalischen Sensoreigenschaften mit der Wahrscheinlichkeit η (Quantenausbeute) in ein Elektron umgewandelt. Der Umwandlungsprozess ist auch nicht durchgehend linear, sondern abhängig vom Sättigungsgrad (Kapazität) des Pixels. Gleichung (3) zeigt, welche Zusammenhänge sich daraus bilden lassen.

$$\mu_e = \sigma_e^2 = \eta(\lambda)\mu_p = \eta(\lambda)\sigma_p^2 \quad (3)$$

Elektronen werden in der Signalverarbeitung in einem (angenommen) linearen Prozess in Grauwerte konvertiert. Damit ist der ADW ebenfalls eine potenzielle Fehlerquelle. Es bedarf auch Strom, um den Sensor zu steuern. Leckströme und die Umgebungstemperatur sorgen dafür, dass sich der ganze Kamerakörper aufheizt. Die so aus der Hitze erzeugten Elektronen μ_d „wandern". Auf ihrem Weg können sie auch Pixel erreichen. In der Verarbeitungskette können Hitze-Elektronen nicht von Licht-Elektronen getrennt werden und gehen somit vollständig, samt ihrem Rauschen σ_d, in die Gesamtsumme der verwertbaren Elektronen ein. Meist werden sie noch mit einer internen Verstärkung K multipliziert, auf die der Nutzer keinen Einfluss hat. K muss vor allem dann näher betrachtet werden, wenn der ADW über eine höhere Auflösung verfügt als der Datentyp, der an den Nutzer geliefert wird, zum Beispiel ein 10-Bit-ADW und ein 8-Bit-Integerbild. Ein weiterer Nutzen ergibt sich, wenn die Verstärkung vor einer Rauschquelle erfolgen kann und somit das Verhältnis zwischen Signal und Rauschen günstiger wird. Im letzten Schritt – der Quantisierung – wird das analoge Signal in digitale Werte umgewandelt. Der hierbei entstehende Verlust von $\sigma_q^2 = 1/12$ Grauwerten (Widrow & Kollár 2008) ist durch den mittlerweile hohen dynamischen Umfang der Digitalsensoren vernachlässigbar. Damit lassen sich das funktionale und das stochastische Modell eines einzelnen Grauwerts μ_g und seiner Varianz σ_g^2 nach EMVA1288 gemäß der Gleichungen (4) und (5) definieren.

$$\mu_g = \mu_d + \mathrm{K}\eta(\lambda)\,\mu_p \quad (4)$$

$$\sigma_g^2 = \mathrm{K}^2\sigma_d^2 + \sigma_q^2 + \mathrm{K}(\mu_y - \mu_d) \quad (5)$$

4.2 FLÄCHEN-INHOMOGENITÄT

Bisher wurde jedes Pixel ohne eine Nachbarschaftsbeziehung nur für sich betrachtet. Ein perfekt gefertigter Flächensensor besitzt gleich große Pixelabstände in einem rechteckigen Muster. Alle Pixel liegen in einer Ebene und sind unabhängig von ihren Nachbarn. Auch für die Fläche gilt, dass sie nicht perfekt gefertigt werden kann. Zunächst ist μ_d temperaturabhängig und kann zudem noch zwischen einzelnen Pixeln mit einem konstanten sowie stochastischen Anteil variieren. Diese Eigenschaft wird im EMVA1288-Standard als Dark Signal Non-Uniformity (DSNU) bezeichnet. Abbildung 8 (links) zeigt beispielhaft ein kontrastverstärktes Dunkelbild des in diesem Beitrag untersuchten CMOS-Sensors. Hierbei ist das für CMOS-Sensoren typische Vertikalstreifenmuster zu sehen. Dieselben Fertigungsschwankungen sorgen auch dafür, dass jedes Pixel auch eine individuelle Sensitivität gegenüber Photonen besitzen kann, die zudem auch wellenlängen- und sättigungsgradabhängig sein kann. Diese Eigenschaft wird als Photon Response Non-Uniformity (PRNU) bezeichnet. Der rechte Teil der Abbildung visualisiert die PRNU des zuvor genannten Sensors für die Wellenlänge 543 nm. Es ist deutlich zu erkennen, dass der untere Bereich des Sensors weniger sensitiv ist als dessen Mitte. Auch werden während der Kalibrierung etwaige Staubpartikel (Jähne 2005) und Verunreinigungen der Sensorfläche sichtbar. Die Abweichung liegt für diesen Sensor und diese Wellenlänge bei etwa 2% des Grauwertbereichs. Durch Berücksichtigung der räumlichen Varianz entsteht das noch genauer modellierte, räumlich-stochastische Rauschmodell eines Grauwerts g (Jähne 2016) (Gl. (6)).

$$\sigma_{g,total}^2 = \sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{\mathrm{K}^2} + \eta(\lambda)\mu_p + \mathrm{DSNU}^2 + \mathrm{PRNU}(\eta(\lambda)\mu_p)^2 \quad (6)$$

5 EINFLUSS DES ZIELMARKENDESIGNS

Dieser Abschnitt betrachtet den Einfluss des Zielmarkendesigns aus Sicht der EMVA1288. Vorhergehende Abschnitte verdeutlichten: Je dunkler ein Grauwert ist, desto geringer ist der Informationsgehalt dieses Pixels. Bei geringer Sättigung überwiegt das Dunkelrauschen und sorgt damit für ein geringeres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Bei hoher Sättigung ist das SNR wie auch der Informationsgehalt deutlich höher.

Abbildung 9 (rechts) zeigt hierzu die Photontransfer-Kurve des in diesem Beitrag verwendeten 12-Bit-Sensors. Je höher der Grauwert, umso günstiger ist das SNR. Allerdings hat der Sensor in diesem Bereich auch eine höhere Abweichung vom linearen Trend (Abb. 9 links), die sich ebenfalls ungünstig auf die Grauwerte auswirkt. Inwieweit sich die Farbwahl auf die Stabilität des Zentrums von kreisförmigen Zielmarken auswirkt, zeigt Abbildung 10. Hierzu wurde ein Feld mit etwa 400 Kreiszielmarken formatfüllend einhundertmal hintereinander in einer unbeweglichen Konfiguration aufgenommen. Der bildseitige Radius variiert in diskreten Schritten zwischen 6 und 20 px mit je 25 Zielmarken. In der Grafik entspricht die Konfiguration WS weißen Kreisen auf schwarzem Hintergrund und SW schwarzen Kreisen auf weißem Hintergrund. Es ist deutlich zu erkennen, dass die SW mit 1/15 – 1/25 px RMS deutlich geringer rauschen als die der WS-Konfiguration. Als Plausibilitätskontrolle werden die Messbilder invertiert und erneut ausgewertet. Wie erwartet, ist in diesem Datensatz die SW-Konfiguration im selben Umfang genauer als WS. Damit sollte der Nutzer dieses Sensors auf die Verwendung von SW-Konfigurationen verzichten.

Eine weitere Empfehlung für diesen Sensor betrifft die Nichtlinearität am Ende der Grauwertskala. Die in dieser Arbeit angesprochenen Verfahren zur Detektion der Zielmarken und der Berechnung ihrer Mittelpunkte setzen zwingend eine Linearität in den Grauwerten voraus. Falls sich der systematische Anteil nicht ausreichend kalibrieren lässt, sollte die Belichtungszeit so angepasst werden, dass der höchste Grauwert außerhalb des nichtlinearen Bereichs bleibt.

6 BILDUNG EINES STOCHASTISCHEN MODELLS

In der Nahbereichsphotogrammetrie wird die Bündelblockausgleichung als Standardverfahren für die Bestimmung der Parameter verwendet. Dabei handelt es sich meist um eine gewichtete L_2-Norm (kleinste Quadrate), wobei die Matrixgleichungen (7) und (8) berechnet werden.

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_{ll}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}_{ll}\mathbf{L} \tag{7}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} - \mathbf{L} \tag{8}$$

Die detaillierte Bedeutung der einzelnen Größen kann in Koch (2004) nachgeschlagen werden. Dabei bildet die Matrix $\mathbf{P}_{ll}$ das stochastische Modell der Beobachtungen und ist, wie in Gleichung (9) dargestellt, definiert.

$$\mathbf{P}_{ll}^{-1} = \frac{1}{\sigma_0^2}\begin{pmatrix} \sigma_{l_1}^2 & \rho_{l_1 l_2} & \rho_{l_1 l_3} & \cdots & \rho_{l_1 l_n} \\ & \sigma_{l_2}^2 & \rho_{l_2 l_3} & \cdots & \rho_{l_2 l_n} \\ & & \ddots & \cdots & \vdots \\ & & & \cdots & \rho_{l_{n-1} l_n} \\ symm. & & & & \sigma_{l_n}^2 \end{pmatrix} \tag{9}$$

Es handelt sich um eine symmetrische Matrix. Auf der Hauptdiagonale befinden sich die Varianzen $\sigma_{l_i}^2$ der n Kreiszielmarken. Durch die Nebendiagonalen werden Korrelationen zwischen diesen Beobachtungen ρ_l modelliert. Üblicherweise werden vor allem bei sehr großen Datensätzen Vereinfachungsschritte vorgenommen. Damit wird die Lösbarkeit in einer vertretbaren Zeit gewährleistet. Zuerst wird gefordert, dass die Beobachtungen untereinander unkorreliert sind. Damit reduziert sich $\mathbf{P}_{ll}$ zu einer Diagonalmatrix. Aufgrund der Gleichung (7) kann die $\mathbf{P}_{ll}$ auch als eine relative Gewichtung der einzelnen Beobachtungen betrachtet werden. Beobachtungen mit hohen Varianzen bekommen damit in der Ausgleichung ein geringes Gewicht, während präzise Beobachtungen mehr Einfluss auf die Parameterschätzung haben. Daraus folgt wiederum, dass keine Ausgleichung dieser Form ungewichtet ist, auch wenn der Nutzer keine „bewusste" Gewichtung vornimmt. Wird die Matrix $\mathbf{P}_{ll}$ weggelassen, so entspricht sie (mathematisch betrachtet) der Einheitsmatrix. Alle Beobachtungen erhalten das gleiche Gewicht. Ein Zustand, der sich vor allem dann negativ auf die Ausgleichungsergebnisse auswirkt, wenn die Beobachtungen in der

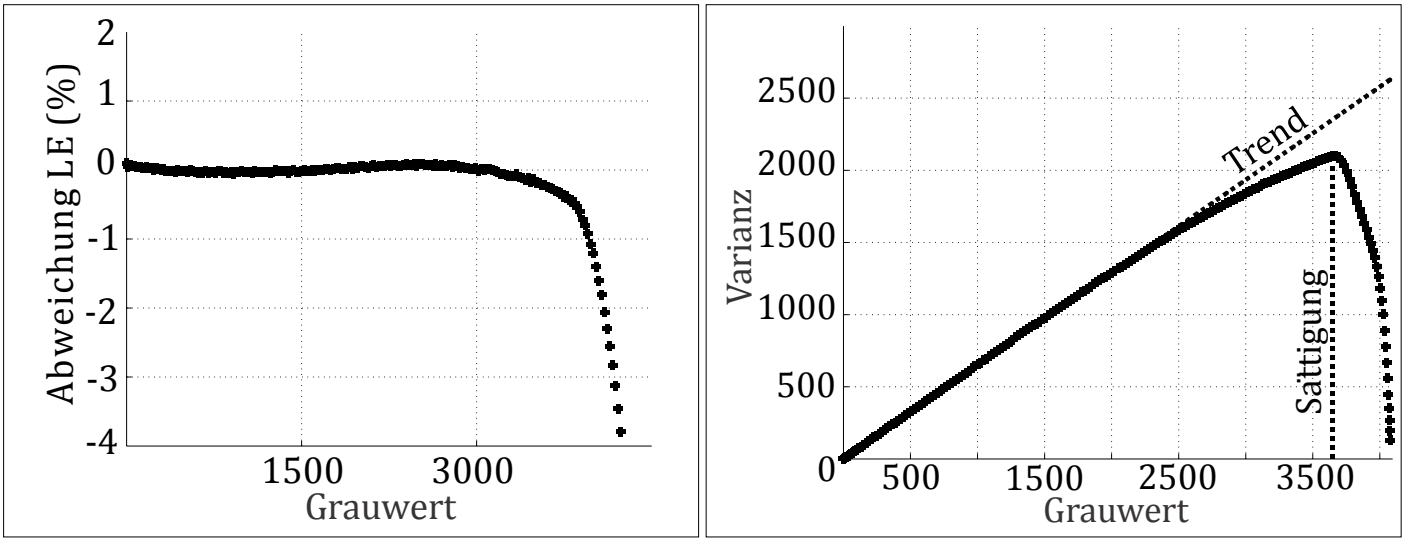

Abbildung 9: Abweichungen der Grauwerte bei zunehmender Sättigung. Links: Linearitätsabweichung, rechts: Varianz.

Realität nicht gleich genau sind. Dann kann es zur Diskrepanz zwischen der äußeren und inneren Genauigkeit kommen. Im Idealfall lässt sich dieser Unterschied mit Kontrollstrecken und anderen Beobachtungen, die nicht an der Ausgleichung teilnehmen, feststellen. Allerdings bestehen Kontrollstrecken nur aus diskreten Punkten. Deswegen ist es genauso möglich, dass sie aufgrund ihrer Position und Lagerung nicht geeignet oder nicht in ausreichender Zahl verfügbar sind, um eine Überprüfung zu gewährleisten.

Eine Gewichtung sollte auch nur dann vorgenommen werden, wenn diese Genauigkeitsangaben mit einer übergeordneten Präzision abgeleitet werden können. Auch darf es keine systematischen oder groben Fehler mehr in den Beobachtungen geben. Nur dann liefert die Methode der kleinsten Quadrate „… die wahrscheinlichsten Werte der Unbekannten" (Helmert 1872). Vor allem bei der Bestimmung von Ellipsenmittelpunkten birgt die Verwendung der aus der Ausgleichungsrechnung resultierenden inneren Genauigkeit ein hohes Fehlerpotenzial. Ein Beispiel hierzu zeigt Abbildung 11. Es handelt sich um eine mittels Bildverarbeitung gefundene Zielmarke mit den Ellipsenhalbachsen $a \approx 15$ px und $b \approx 4$ px (äußerer Ring). Nach einer Kleinsten-Quadrate-Ausgleichung beträgt die ausgewiesene innere Genauigkeit $\sigma_{xy} \approx 2/100$ px. In der Abbildung entspricht dies dem (skalierten) inneren Ring. Die Berechnung der Ellipsenexzentrizität (skalierte Linie entlang der kleinen Halbachse) ergibt einen Wert von $\sigma_{exz} \approx 20/100$ px und übertrifft damit die zuvor angenommene Genauigkeitsangabe um Faktor 10. Aufgrund der Fehlerfortpflanzung gilt $\sigma_{xy} \approx \max(\sigma_i)$. Die unkorrigierte systematische Komponente der Ellipsenexzentrizität verschmiert nicht nur die Genauigkeitsabschätzung durch den Ellipsenfit und EMVA1288, sondern auch die berechneten Unbekannten. Ähnliches gilt auch für grobe Fehler.

Eine in der Nahbereichsphotogrammetrie ebenfalls oft verwendete Gewichtungsmöglichkeit ist die Gleichgewichtung mit einer empirisch erwarteten Genauigkeit (z. B. 4/100 px). Die a priori Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 erhält denselben Wert. Allerdings handelt es sich hierbei weiterhin um eine Gleichgewichtung (Gl. (10) und (11)).

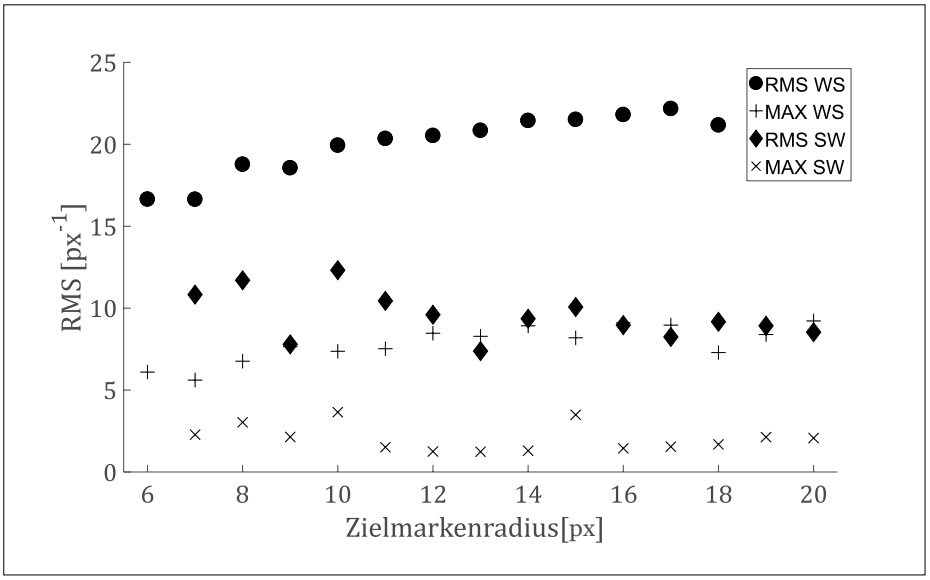

Abbildung 10: Rauschen des Kreismittelpunkts. Schwarzer Kreis auf weißem Hintergrund (SW) und weißer Kreis auf schwarzem Hintergrund (WS).

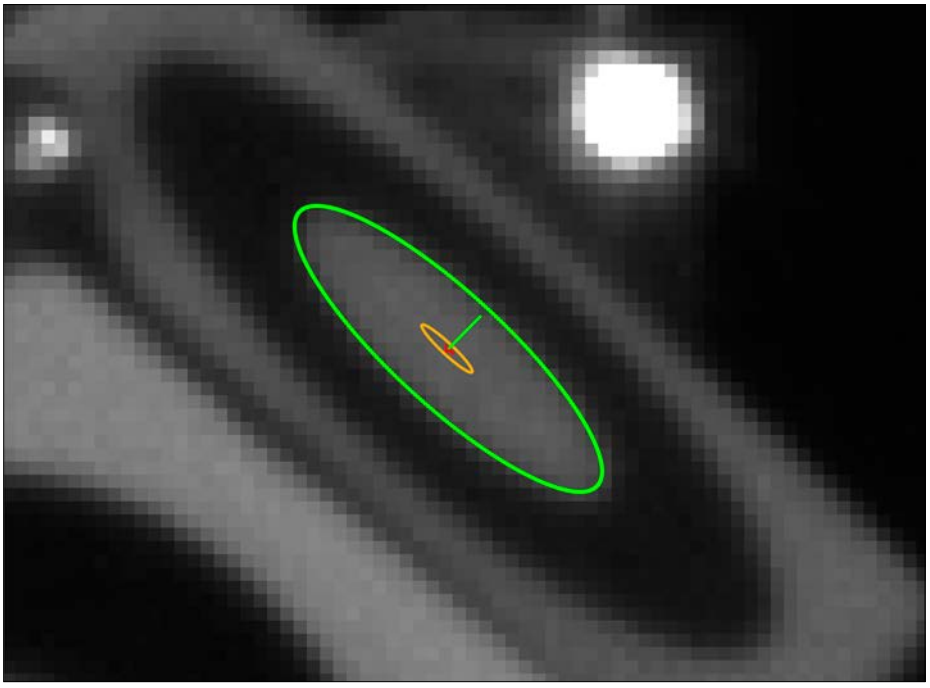

Abbildung 11: Ellipsenfit samt Exzentrizität

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^{\mathrm{T}} \mathbf{P}_{ll} \mathbf{v}}{f} \tag{10}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{x_1} & v_{x_2} & \cdots & v_{x_n} & v_{y_1} & v_{y_2} & \cdots & v_{y_n} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

Nach erfolgter Ausgleichung kann die berechnete a posteriori Varianz der Gewichtseinheit mittels Globaltest auf ihre Gültigkeit geprüft werden. Das Verhältnis aus $\hat{\sigma}_0^2$ und σ_0^2 folgt der zentralen $\chi^2(\alpha, f)$-Verteilung mit der Signifikanz α und f Freiheitsgraden. Damit lauten die Hypothesen und das stochastische Modell gemäß den Gleichungen (12-15).

Ist die Annahme der Zielmarken-Genauigkeiten richtig, dann gilt die Nullhypothese. Sonst gilt die Alternativhypothese und der Globaltest wird verworfen. Die Varianzen $\sigma^2_{x_{i,1288}}$, $\sigma^2_{y_{i,1288}}$ können mittels Ausgleichungsrechnung oder Fehlerfortpflanzung bestimmt werden. Im Fall einer Ellipsenausgleichung berechnet sich die Varianz der einzelnen Koordinatenpunkte mit der Gleichung (6). Für den Grauwertschwerpunkt können die in Maas (1992, S. 91) angegebenen Formeln gemäß der Gleichungen (16) und (17) angepasst werden.

$$\mathrm{T} = f\,\frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \sim \chi^2(\alpha, f) \tag{12}$$

$$\mathrm{H}_0 : \mathbb{E}(\hat{\sigma}_0^2) = \sigma_0^2 \tag{13}$$

$$\mathrm{H}_\mathrm{A} : \mathbb{E}(\hat{\sigma}_0^2) \neq \sigma_0^2 \tag{14}$$

$$\mathrm{diag}(\mathbf{P}^{-1}_{ll,1288}) = \frac{1}{\sigma^2_{0,1288}}\begin{bmatrix}\sigma^2_{x_{1,1288}} & \sigma^2_{x_{2,1288}} & \cdots & \sigma^2_{y_{n,1288}}\end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\sigma_x^2 = \sum\left(\frac{x_i - x_p}{\sum g_i}\right)^2 \sigma_{g_i}^2 \tag{16}$$

$$\sigma_y^2 = \sum\left(\frac{y_i - y_p}{\sum g_i}\right)^2 \sigma_{g_i}^2 \tag{17}$$

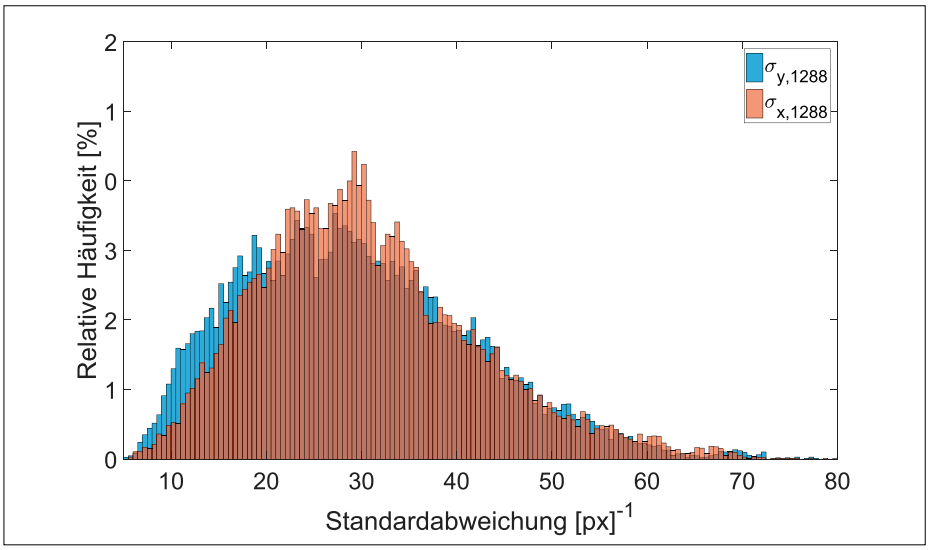

Abbildung 12: Voraussage für die Standardabweichungen der Zielmarkenzentren

7 ANWENDUNG IN DER REALKALIBRIERUNG

Dieser Abschnitt beschreibt eine Kamerakalibrierung mit dem stochastischen Modell und der Sensor/Objektiv-Kombination, die oben beschrieben wurden. Die EMVA-Kennzahlen des Sensors wurden zuvor im Labor bestimmt. Die Aufnahmeeinstellung entspricht (so weit wie möglich) einem Rohformat. Der Pixel-Takt und die Bildwiederholungsrate sind zur Senkung der inneren Temperatur auf den geringsten noch möglichen Wert gesetzt. Alle herstellerseitigen Grauwertanpassungen wie Software-Gamma, Verstärkung und die Interpolation defekter Pixel sind ebenfalls deaktiviert. Die Belichtungszeit ist so optimiert, dass sich die Grauwerte (vorwiegend) außerhalb der unteren und oberen 20% des Grauwertbereichs bewegen. Dieser Kalibrierdatensatz umfasst 100 Bilder und ist an das Schema der Abbildung 4 (oben links) angelehnt. Der Kalibrierkubus hatte ≈ 950 (WS) Objektpunkte mit ≈ 22.000 Beobachtungen im Bildraum. Alle Kreiszentren sind um die Ellipsen-Exzentrizität korri-

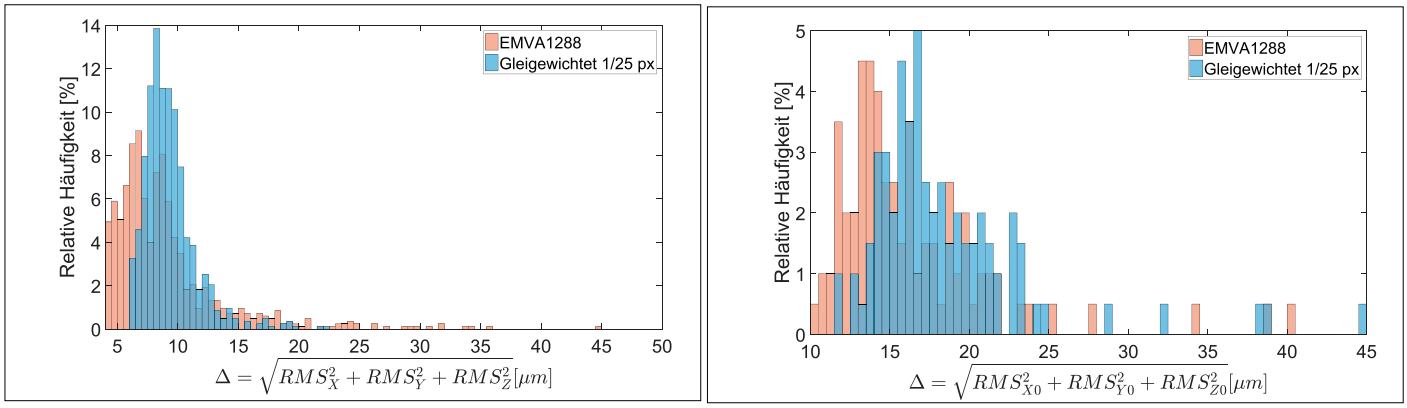

Abbildung 13: Verteilung der erreichten Genauigkeiten. Links: Objektkoordinaten, rechts: Kamerapositionen.

giert und auf Rest-Systematiken untersucht (Mordwinzew et al. 2016, Kisser et al. 2017). Das stochastische Modell der Grauwerte ist mit der Gleichung (6) berechnet. Der Übergang in das Rauschen des Zielmarkenzentrums erfolgt mit den Gleichungen (16) und (17). Die Voraussage der Unsicherheiten im Bildraum ist in Abbildung 12 als Histogramm zusammengefasst.

Nach ausgleichender Schätzung der Histogrammparameter liegt der Median beider Verteilungen bei ≈ 1/28,75 px. Dies deckt sich auch ungefähr mit den in Abbildung 10 ermittelten Werten. Übertragen in den metrischen Bildraum entspricht dies einer σ_{xy} von 2,2 µm/28,75 ≈ 0,077 µm. Der Erwartungswert für das RMS im Objektraum wird mit der Steigung aus Abbildung 5 geschätzt und liegt mit 95% Wahrscheinlichkeit bei mindestens 146 × 0,077 µm ≈ 11 µm. Einschränkend muss jedoch angemerkt werden, dass reale Messungen immer wieder Abweichungen zur mathematischen Modellierung haben. Daher sind geringfügige Abweichungen der realen Genauigkeiten eher die Regel als Ausnahme.

Die Bündelblockausgleichung liefert mit $\mathbf{P}_{ll,1288}$ und $\sigma_0 = 1{,}0$ das Verhältnis $\hat{\sigma}_0/\sigma_0 \approx 0{,}96$. Damit ist die a priori Standardabweichung der Beobachtungen nur etwa 4% falsch geschätzt. Der RMS-Wert des Objektraums liegt bei ≈ 10 µm. Die ausgewiesenen Fehler der Kontrollmaßstäbe sind mit ≈ 12 µm ebenfalls plausibel.

Die Bündelblockausgleichung mit gleichgewichteten Beobachtungen (1/25 px) liefert als Verhältnis $\hat{\sigma}_0/\sigma_0 \approx 0{,}73$.

Dies ist ein Hinweis, dass die angenommene Bildmessgenauigkeit zu niedrig ist. Die RMS der Objektkoordinaten und der Kontrollmaßstäbe liefern vergleichbare Werte. Allerdings ist das RMS nur eine sehr grobe Betrachtung.

Eine detaillierte Betrachtung geschieht, wie in Abbildung 13 gezeigt, mithilfe von Histogrammen. Der linke Teil zeigt die Verteilung der Δ der Objektkoordinaten. Die mit $\mathbf{P}_{ll,1288}$ berechneten RMS-Werte sind nicht nur anders verteilt, sondern auch überwiegend genauer als die der gleichgewichteten Schätzung. Gleiches gilt für die Kamerapositionen. Da die Verteilungen der Rotationsparameter und Verbesserungen nahezu deckungsgleich sind, wird auf deren explizite Darstellung verzichtet. Allerdings muss beachtet werden, dass σ_0 für diesen Sensor schon als Erfahrungswert (siehe Abb. 10) bekannt ist, weshalb die Fehlerverteilung vermutlich auch nicht so stark abweicht (positiv oder negativ), wie es bei einer zufälligen Schätzung womöglich wäre.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die beschriebene Methode durchaus dazu geeignet ist, um Genauigkeiten der Zielmarkenzentren a priori zu schätzen. Alle stochastischen Werte in $\mathbf{P}_{ll,1288}$ sind vollständig aus der EMVA-Kalibrierung und der Konfiguration abgeleitet. Vorhergehende Erfahrungswerte sind somit zwar von Vorteil, aber nicht zwingend notwendig.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Beitrag beschreibt, wie die Genauigkeiten einer 3D-Rekonstruktion mittels Bündelblockausgleichung bei einer bekannten Konfiguration schon a priori mithilfe der im EMVA1288-Standard vorgeschlagenen Kennzahlen abgeschätzt werden können. Die vorgestellte Vorgehensweise bedarf jedoch einer vorhergehenden Kalibrierung des Sensors. Die benötigten Kennzahlen können entweder mit übergeordneter Genauigkeit in Verbindung mit zertifizierter Ausrüstung oder teilweise und weniger genau, aus mehrfacher Aufnahme eines formatfüllenden Grauwertgradienten bestimmt werden. Der letztere Fall hat den Vorteil, dass auch die Linse samt Filter und somit das später in der Messung verwendete Spektralband berücksichtigt wird, da die EMVA1288-Kalibrierung i. d. R. nur mit einer vorgegebenen Wellenlänge ohne Linse durchgeführt wird. In der Praxis kommen oft wegen der verfügbaren Belichtung nur Sperr- bzw. Bandfilter und eine bestimmte Brennweite infrage. Wichtig ist auch, dass während der Messung und Kalibrierung ungefähr dieselben Bedingungen herrschen (Temperatur, Wellenlänge, Belichtungszeit, Zielmarkendurchmesser,

Intelligent
Vielseitig
Einfach

Alle Messtechnologien in einer MultiStation vereint.
Leica Nova MS60

Die weltweit erste selbstlernende MultiStation passt sich automatisch, fortlaufend an alle Umgebungsbedingungen an. In einem Instrument sind alle Messtechnologien vereint.

Scanning wird jetzt noch einfacher: die Punktwolken werden als 3D-Ansicht in Echtzeit mit gemessenen Punkten oder als 3D-Modell in der Anzeige dargestellt.

Leica Geosystems GmbH Vertrieb
www.leica-geosystems.com

- when it has to be right
Leica Geosystems

Algorithmus zur Zentrumsbestimmung, …). Aufgrund der noch nicht untersuchten Fertigungsschwankungen besteht kein Erfahrungswert, welchen Einfluss solche Abweichungen haben können. Bekannt ist jedoch, dass ein und derselbe Sensortyp, verbaut mit der Steuerelektronik unterschiedlicher Hersteller, Ergebnisse unterschiedlicher Qualität liefern kann (Jähne 2016).

Ein perfekt gefertigtes Pixel wandelt jedes einfallende Photon durchgehend linear 1 zu 1 in einen Grauwert. Alle Pixel eines perfekt gefertigten Sensors sind gleich groß (evtl. quadratisch), gleich sensitiv und liegen in einer Ebene. Es gibt keine Störkomponenten wie Signal- und Dunkelrauschen, Sättigung, Sensitivitätsinhomogenitäten, (unkalibrierbare) heiße, kalte und tote Pixel, Temperatur- und zeitliche Abhängigkeiten. Dies wird in der üblicherweise verwendeten mathematischen Modellierung der Bündelblockausgleichung und Zielmarkendetektion erwartet. Abweichungen vom perfekten Sensor verändern die Grauwerte mit einer systematischen und einer stochastischen Komponente. Während der systematische Anteil kalibriert werden kann, limitiert der stochastische Anteil die erreichbare Genauigkeit.

Die Aufnahmen erfolgten mit Rohdaten, zumindest soweit es in dieser Konfiguration realisierbar war. Alle herstellerspezifischen Anpassungen wie Software-Gain, Gamma oder Interpolation defekter Pixel wurden deaktiviert. Befindet sich eine Zielmarke im Bereich eines unkalibrierbaren Pixels, so kann dieses eine Pixel vollständig aus der Schätzung des Zentrums entfernt werden. Im Zweifelsfall auch die komplette Zielmarke. Um das Dunkelrauschen zu reduzieren, wurden die Bildfrequenz und der Pixel-Takt auf ein Minimum gestellt. Dadurch sanken der Stromverbrauch und die interne Temperatur. Die Belichtung und Belichtungszeit waren so gewählt, dass die Verteilung der Grauwerte im mittleren Bereich lag und weder stark in das Dunkelrauschen noch in die Nichtlinearität fiel. Der für diese Untersuchung benutzte (und vergleichbar günstige) CMOS-Sensor erreichte mit den zuvor im Labor ermittelten EMVA1288-Kennzahlen eine a priori geschätzte und später real nachgewiesene Zentrumsgenauigkeit von etwa ≈ 1/29 px.

Über alle Zielmarken hinweg betrachtet weichte die tatsächliche Standardabweichung der Gewichtseinheit aus der Bündelblockausgleichung nur um ≈ 4% vom vorausgeberechneten Wert ab. Auch konnten die erreichten Objektgenauigkeiten mit einer nur geringen Abweichung geschätzt werden. Damit liefert der EMVA1288-Standard eine aus photogrammetrischer Sicht sehr gute Abstraktionsebene zwischen Sensor und Grauwert.

DANKSAGUNG

An dieser Stelle bedanken sich die Autoren bei der Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation, die diese Untersuchungen im Rahmen des Projekts „Optimierte geometrisch/physikalische Modellierung digitaler Industriemesskameras im Einsatz der industriellen Qualitätskontrolle (MIndKam)", Förderkennzeichen: (961 – 386261 / 1055) finanziert hat.

Literatur

Dierks, F. (2004): Sensitivity and Image Quality of Digital Cameras. Basler Vision Technologies, Version 1.1.

EMVA1288 (2010): Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras. European Machine Vision Association, Release 3.0.

Helmert, F. R. (1872): Die Ausgleichungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Teubner, Leipzig/Berlin.

Janesick, J. R. (2001): Scientific Charge-Coupled Devices. The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA.

Jähne, B. (2005): Digital Image Processing. 6. Auflage. Springer, Berlin/Heidelberg/New York.

Jähne, B. (2016): Unterlagen zum EMVA1288 – Grund- und Aufbaukurs. AEON, Hanau.

Kisser, W.; Boochs, F.; Paulus, D. W. R. (2017): Analyse von Bildresiduen mit Machine-Learning im Kontext von Kamera-Kalibrierungen. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) (in Vorbereitung).

Koch, K. R. (2004): Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. 4. Auflage. Dümmler, Bonn.

Kraus, K. (2004): Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Auflage. De Gruyter, Berlin/New York.

Luhmann, T. (2010a): Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Luhmann, T. (2010b): Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, 645. München.

Maas, H.-G. (1992): Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 9665.

Mordwinzew, W.; Boochs, F.; Paulus, D. W. R. (2015): Relevance of ellipse eccentricity for camera calibration. In: Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII. SPIE Proceedings, Vol. 9528.

Mordwinzew, W.; Boochs, F.; Paulus, D. W. R. (2016): Analyse von Bildresiduen mit Machine-Learning im Kontext von Kamerakalibrierungen. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016. Wichmann, Berlin/Offenbach, S. 256-265.

VDI/VDE 2634 (2002): Blatt 1: Optische 3D-Messsysteme Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung. Verein Deutscher Ingenieure/Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik.

Widrow, B.; Kollár, I. (2008): Quantization Noise. Roundoff Error in Digital Computation, Signal Processing, Control, and Communications. Cambridge University Press.