

Untersuchungen und erste Ergebnisse zur geometrischen Qualität marktgängiger Kameras für den UAV-Einsatz¹

Investigations and First Results on the Geometric Quality of Market-Driven Cameras for UAV Applications

Heinz-Jürgen Przybilla

In der klassischen Luftbild-Photogrammetrie sind digitale Messbildkameras seit mehr als einer Dekade etabliert. Die zum Einsatz kommenden Systeme sind spezielle, auf die Anwendung hin konzipierte Konstruktionen. Ein besonderer Aspekt ist hierbei die sogenannte „Metrik“ der Kamera, welche sich durch eine Langzeitstabilität der Inneren Orientierung auszeichnet /Jacobsen et al. 2010/. Der chinesische Hersteller DJI ist Marktführer im Bereich der UAV /Suasnews 2017/ mit Schwerpunkt auf semiprofessionellen Anwendungen. Allerdings ist ein deutlicher Trend zur Entwicklung von Systemen für den professionellen Einsatz erkennbar. Dabei sind die verfügbaren Fluggeräte mit Kameras aus eigener Entwicklung (proprietäre Systeme) ausgestattet, die sowohl für die Erstellung von hochauflösenden Videos als auch von Einzelbildern geeignet sind.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die aktiv stabilisierten Kamerasysteme der DJI Phantom 3 Professional (12 MPx) sowie der Zenmuse-X5-Kamera (16 MPx) hinsichtlich ihrer metrischen Qualität untersucht. Sie sind Teil eines umfangreichen Benchmarks, der die geometrischen und radiometrischen Eigenschaften aktueller UAV-Kameras untersucht /Cramer et al. 2017b/, /Meißner et al. 2017/. Die geometrischen Prüfungen erfolgten am 3D-Testfeld der Hochschule Bochum (HS Bochum) mittels wiederholter Kalibrierungen. Die Vorgehensweise der Kalibrierung ist dabei analog zu dem beschriebenen Verfahren von /Kraft et al. 2016/. Zusätzlich erfolgte die Kalibrierung der Zenmuse-X5-Kamera mit dem DJI Inspire 1 Pro auf Grundlage einer Kreuz-Befliegung des LWL-Industriemuseums Zeche Zollern, das als 3D-Testfeld für UAV-Befliegungen dient.

Während der Kalibriersequenzen wurden die Kameras wie im praktischen Einsatz gehandhabt. Diese wurden mehrfach ein- und ausgeschaltet und dabei ein fixierter Fokus, eine feste Blende und eine konstante Belichtungszeit gewählt. Bei der Zenmuse-X5-Kamera wurde zwischen den Kalibriersequenzen und vor dem Testflug auf der Zeche Zollern das Objektiv vom Sensor gelöst, um einen Einfluss des Bajonettanschlusses auf die Stabilität der Inneren Orientierung nachzuweisen.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchung ist die geometrische Vorverarbeitung der verfügbaren Bilddaten im JPEG-Format. Hier werden vom Hersteller DJI nicht dokumentierte Korrekturen bezüglich der radialsymmetrischen Verzeichnung vorgenommen, um die zum Teil extremen Verzeichnungen der Objektive zu korrigieren. Da die Bilddaten gleichzeitig im proprietären RAW-Format gespeichert werden, erlaubt dies einen Vergleich der Auswirkungen auf die Geometrie des Bilds.

Schlüsselwörter: UAV, Kamera, Kalibrierung, Stabilität der Inneren Orientierung

¹ Beitrag der Oldenburger 3D-Tage 2017

In the field of classical aerial photogrammetry digital metric cameras have been established for more than a decade. The systems used are specifically designed for this application. A particular aspect is the so-called “metric” of the camera, which is characterized by a long-term stability of the interior orientation parameters /Jacobsen et al. 2010/.

The Chinese manufacturer DJI is market leader in the field of UAV /Suasnews 2017/, focusing on semi-professional applications. However, a clear trend towards the development of systems for professional use is apparent. The individual aircrafts are equipped with proprietary cameras that are used to create high-resolution videos as well as single images.

The present investigation shows results of the actively stabilized camera systems of the DJI Phantom 3 Professional (12 MPx) and the Zenmuse X5 camera (16 MPx) concerning their metric quality. They are part of an extensive benchmark that investigates the geometric and radiometric properties of current UAV cameras /Cramer et al. 2017b/, /Meißner et al. 2017/. The tests were carried out at the 3D test field of Bochum University of Applied Sciences (HS Bochum) using repeated calibrations. The calibration method is analogous to the one described by /Kraft et al. 2016/. Additionally the Zenmuse X5 camera (installed on a DJI Inspire 1 Pro) was calibrated on the basis of a cross-flight at the LWL industrial museum Zeche Zollern, which – among others – can be used as a 3D test field for UAV flights.

During the calibration sequences the cameras were handled as in practical use. They had been switched on and off several times, thereby selecting a fixed focus, a fixed aperture and a constant exposure time. In the case of the Zenmuse X5 camera the lens was detached from the sensor between the calibration sequences and before the test flight on Zeche Zollern in order to detect the influence of the bayonet connection on the stability of the interior orientation parameters.

Another aspect of the study concerns the geometric preprocessing of the available image data in JPEG format. In the present case corrections are made by the manufacturer DJI with regard to the radial-symmetric distortion, in order to correct the extreme distortions of the lenses. Since the image data is stored simultaneously in the proprietary RAW format, this allows a comparison of the effects on the image geometry.

Keywords: UAV, camera, calibration, stability of interior orientation parameters

1 EINLEITUNG

Anwender von UAV-Systemen müssen bisher auf die Vorteile metrischer Kameras verzichten, da der Markt diese derzeit nicht anbietet. Dass metrische Kameras auch für die UAV-Nutzung diverse Vorteile bieten, zeigen /Kraft et al. 2016/. Aus der Perspektive der Photogrammetrie betrachtet handelt es sich bei nahezu allen UAV-Kamerasystemen um sogenannte „Teilmess-Kameras“, da die Sensormatrix ein Bildkoordinatensystem definiert und die flächenhaft wirkenden Parameter der Inneren Orientierung (Verzeichnung) als weitestgehend konstant angenommen werden können, währenddessen Kamerakonstante und Hauptpunktlage variable Elemente darstellen. Aus dieser Tatsache resultiert die Notwendigkeit zur Kamerakalibrierung, welche simultan im Rahmen einer Bündelblockausgleichung erfolgen muss (Selbstkalibrierung/In-situ-Kalibrierung). Hierzu notwendige Voraussetzungen bzw. Maßnahmen während des Bildflugs werden von /Przybilla et al. 2015/ sowie /Gerke & Przybilla 2016/ beschrieben. /Cramer et al. 2017a/ erläutert den grundsätzlichen Prozess der Kalibrierung, mit beteiligten Größen und Einflüssen. Verbleibende optische und mechanische Effekte der Kameras sowie damit einhergehende Bedienungsfehler durch die Nutzer bedingen jedoch – soweit sie im Auswerteprozess nicht modelliert werden können – weitere Genauigkeitsverluste. Kameras für die

Nutzung in UAV sind Serienprodukte der Fotoindustrie. Dies bietet die Vorteile einer Produktion für den Massenmarkt (Preis, aktuelle Technologie, Variabilität etc.), die allerdings die spezifischen Wünsche an einen photogrammetrischen Sensor unberücksichtigt lässt. Eine Klassifizierung von UAV-Kameras, verbunden mit einer Marktübersicht derzeit aktueller Systeme, ist in /Przybilla 2017/ zu finden.

1.1 Untersuchte UAV-Kameras

Mit den Bauserien Phantom und Inspire werden von DJI fest verbaute Kameras in Kombination mit kardanischen Aufhängungen (Gimbal) angeboten (*Abb. 1*). Während es sich bei der Kamera des Phantom 3 um einen Sensor mit Festbrennweite handelt, kann die Zenmuse-X5-Kamera, welche für den Inspire 1 Pro angeboten wird, mit verschiedenen Objektiven des Micro-Four-Thirds-(MFT-) Standard ausgestattet werden (*Tab. 1*). Damit können hochwertige Fremdobjektive über einen Bajonettverschluss montiert werden.

Die DJI-Kameras ermöglichen grundsätzlich eine Bildspeicherung im RAW- und JPEG-Format. Das hier genutzte universelle DNG-Format (Digitales Negativ) der Firma Adobe ermöglicht einerseits



Abb. 1 | DJI-Kameras: Phantom 3 Professional (links) und Zenmuse X5 mit Olympus-Objektiv M. Zuiko Digital ED 12/2.0 (rechts)

Kamera	Phantom 3	Zenmuse X5
Sensortyp	CMOS (Sony Exmor)	CMOS (Sony Exmor)
Sensorformat	6,2 mm × 4,6 mm	17,3 mm × 13,0 mm
Sensorauflösung	12,4 MPx	16 MPx
Pixelgröße	1,55 µm	3,76 µm
ISO-Empfindlichkeit	100 – 3200	100 – 25 600
Brennweite	4 mm	Olympus M. Zuiko Digital ED 12/2.0
Fokus	∞ (fix)	MF auf ∞
Optischer Bildstabilisator	Nein	Nein
Blende	f 2,8	f 4,0
Min. Verschlusszeit	1/8 000 s	1/8 000 s
Field of View (FOV)	94°	84°
RAW-Format	DNG	DNG
Farbtiefe	k. A.	12 bit
JPEG-Format (korrigiert bezüglich radial-symmetrischer Verzeichnung)	Ja	Ja

Tab. 1 | Technische Daten der untersuchten DJI-Kameras

eine verlustfreie Bildkompression und protokolliert darüber hinaus alle Arbeitsschritte, die bei einer Bearbeitung in Photoshop, Photoshop Elements oder Lightroom ausgeführt werden. Der Anwender kann seine Bearbeitung also jederzeit wieder zurücknehmen und die Aufnahme in den Originalzustand zurücksetzen. Im JPEG-Format erfolgt eine herstellerseitige Bildkorrektur, bei der die Aufnahmen bezüglich radialsymmetrischer Verzeichnung korrigiert werden. Die geometrischen Bildveränderungen werden allerdings durch den Hersteller nicht dokumentiert.

1.2 KALIBRIERUNG IM TESTFELD

Testfeld-Kalibrierungen ermöglichen, das geometrische Verhalten eines Kamerasystems über einen längeren Zeitraum oder unter variablen Betriebsbedingungen zu prüfen. Das hier genutzte 3D-Testfeld der HS Bochum hat eine Ausdehnung von ca. 14 m × 3 m × 3 m und besteht aus ca. 500 räumlich verteilten, codierten und nicht codierten Targets (Abb. 2).



Abb. 2 | 3D-Testfeld der HS Bochum

Die Datenerfassung bei der Kalibrierung erfolgte über einen höhengestaffelten, halbkreisförmigen Bildverband (Abb. 3). Um eine Bestimmung der Hauptpunktlage sowie von Affinitäts- und Nicht-Orthogonalitätsparametern zu ermöglichen, beinhalten die Datensätze um 90°, 180° und 270° gekantete Aufnahmen.

Die Berechnungen erfolgten im Rahmen einer Bündelblockausgleichung mit der Software AICON 3D-Studio. Da die Software keine RAW-Formate verarbeiten kann, wurden die vorliegenden Bilddaten verlustfrei in das TIFF-Format (8 bit) überführt. Hierzu kam die Software RawTherapee (Version 4.2.x) /RawTherapee 2017/ zum Einsatz, wobei alle bildmanipulierenden Faktoren auf 0 gestellt wurden. In einer weiteren Berechnung wurden die direkt in der Kamera konvertierten Bilder im JPEG-Format für die Bündelblockausgleichung verwendet. Kalibriersequenzen, bei denen die Kameras wie im praktischen Einsatz gehandhabt werden (Ein- und Ausschalten/

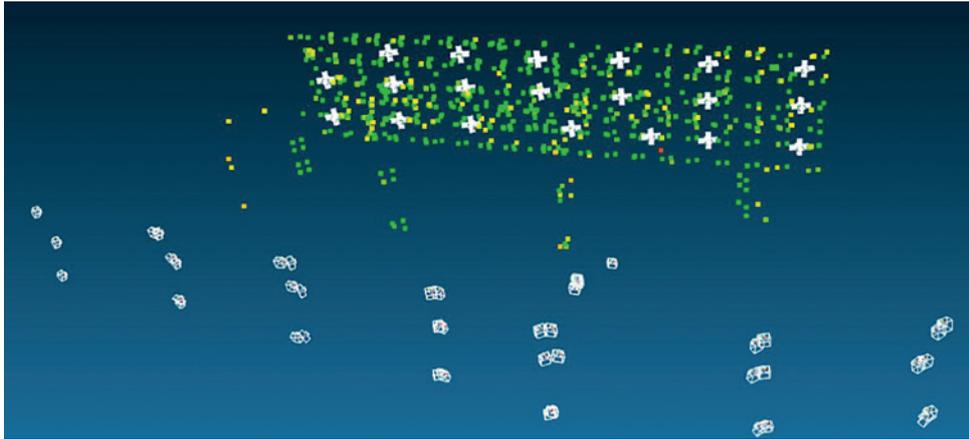


Abb. 3 | Kalibrierung – typische Aufnahmeconfiguration

Wechsel des Akkus, Wechsel der Objektive), spiegeln dabei die alltägliche Nutzung wider. Die individuellen Bildverbände bestehen aus ca. 50 Aufnahmen.

Bilddaten quasi nicht nachweisbar, zeigen die JPEG-Daten deutlich erkennbare Systematiken. Die A-priori-Bildkorrektur des JPEG-Formats ist hier im Ergebnis eher kontraproduktiv.

2 UNTERSUCHUNGS- ERGEBNISSE

2.1 DJI Phantom 3 Professional

Die Abb. 4 bis 6 zeigen die Ergebnisse der Kalibrierungen der Kamera des Phantom 3, einem System, bei dem die Optik fest auf die Entfernungseinstellung „∞“ mit Blende f 2,8 fokussiert ist. Die Veränderungen der Parameter Kamera-konstante (c_k) und Hauptpunktage (x_H , y_H) bewegen sich in einem schmalen Band, es sind jedoch deutliche Unterschiede in Abhängigkeit vom Bilddaten-format erkennbar (Abb. 4).

Der flächenhafte Parameter der „radial-symmetrischen Verzeichnung“ bleibt über alle Epochen konstant, es sind jedoch deutliche Unterschiede zwischen den originären Bilddaten des TIFF-Formats und den verzeichnungskorrigierten JPEG-Daten erkennbar (Abb. 5). Die vom Hersteller a priori angebrachte Korrektur wirkt jedoch nicht bis in die Bildecken, sondern beschränkt sich offensichtlich auf einen reduzierten Bildkreis von ca. 90 %.

Die Parameter „tangential-asymmetrische Verzeichnung“ (Abb. 6a) sowie „Affinität und Nicht-Orthogonalität“ (Abb. 6b) zeigen signifikante Unterschiede. Während die Effekte in den TIFF-



Abb. 4a | Phantom 3 – Variation der Parameter c_k , x_H , y_H (Format: TIFF)

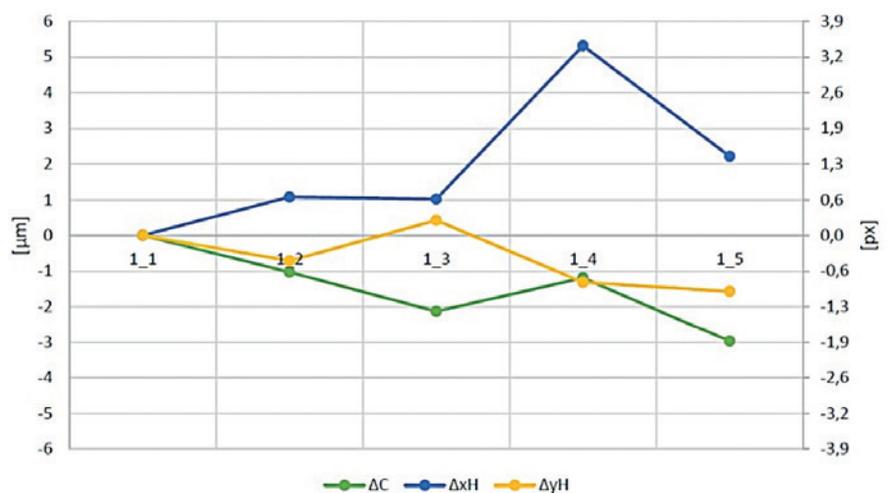


Abb. 4b | Phantom 3 – Variation der Parameter c_k , x_H , y_H (Format: JPEG)

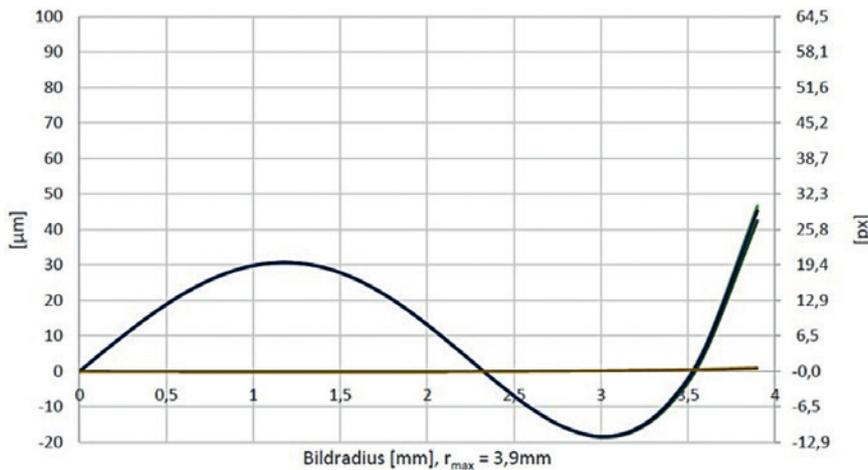


Abb. 5a | Phantom 3 – Variation der radial-symmetrischen Verzeichnung (Format: TIFF)

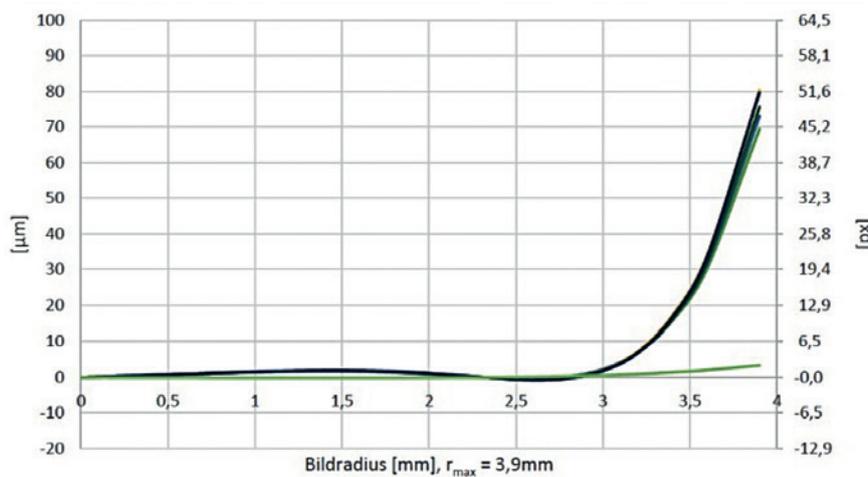


Abb. 5b | Phantom 3 – Variation der radial-symmetrischen Verzeichnung (Format: JPEG)

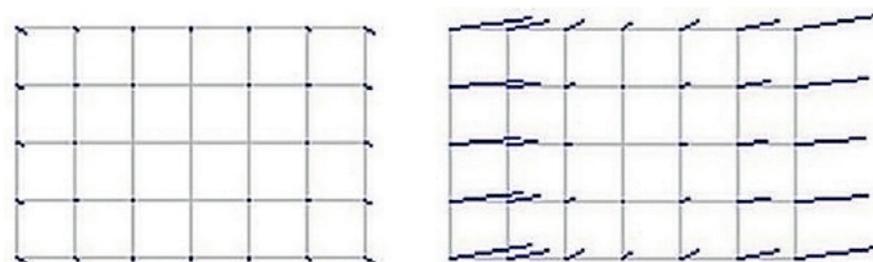


Abb. 6a | Phantom 3 – tangential-asyymetrische Verzeichnung; links: TIFF-Format (max. Wert 2,3 µm), rechts: JPEG-Format (max. Wert 14,7 µm)

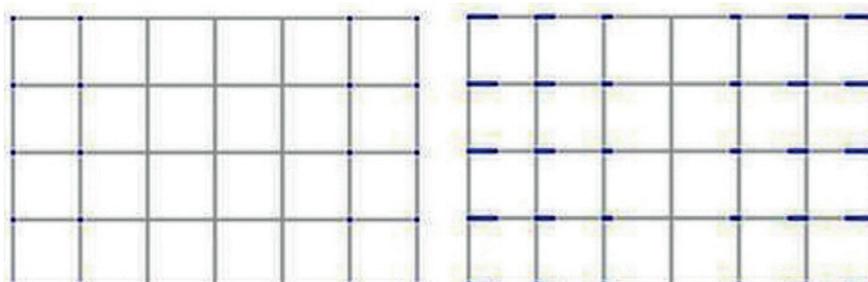


Abb. 6b | Phantom 3 – Affinität und Nicht-Orthogonalität; links: TIFF-Format (max. Wert 0,6 µm), rechts: JPEG-Format (max. Wert 4,7 µm)

2.2 DJI Zenmuse X5

Die Zenmuse-X5-Kamera ermöglicht den Einsatz von manuell fokussierbaren Objektiven des MFT-Standards. Für die mehrfache Kalibrierung wurde das Objektiv Olympus M. Zuiko Digital ED 12/2.0 verwendet. Dazu wurde der Fokus auf die Entfernungseinstellung „∞“ fixiert, die Blende mit f 4,0 vorgewählt. Während die in den Abb. 7 dargestellten Kalibrierepochen 1_1 bis 1_5 den Prozess des „Ein- und Ausschaltens“ der Kamera beschreiben, erfolgt zur Epoche 2_1 die kurzzeitige Demontage des Objektivs (entspricht einem Objektivwechsel). Hier (Epoche 2_1 bis 2_3) werden die Schwächen im Aufbau der Kamera sichtbar. Durch die vorhandenen mechanischen Toleranzen des Bajonettanschlusses ist ein reproduzierbares Zusammenfügen der Komponenten nicht möglich. Die bereits für das Phantom-3-Kamerasystem erzielten Aussagen bezüglich der flächenhaften Parameter bestätigen sich auch für die Zenmuse X5 (Abb. 8 bis 9). Besonders erwähnenswert ist die extreme Größe der tangential-asyymetrischen Verzeichnung bei der Nutzung des JPEG-Formats im Vergleich zum TIFF-Format (Abb. 9a). Ein Verzicht auf die Bestimmung dieser Parameter im Rahmen einer Selbstkalibrierung ist offensichtlich nicht ratsam. Darüber hinaus weist die Kamera deutlich erkennbare Affinitätseffekte auf.

2.3 Kamera-Benchmark

Im Rahmen eines erweiterten Benchmarks wurden weitere Kameras, die auf UAV-Plattformen verschiedener Hersteller zum Einsatz kommen, bezüglich ihrer geometrischen Parameter untersucht /Cramer et al. 2017b/. Tab. 2 zeigt – neben einigen Kenngrößen der Sensoren – die Variationen der sigma0-Werte nach der Bündelausgleichung von Testfeld-Kalibrierblöcken

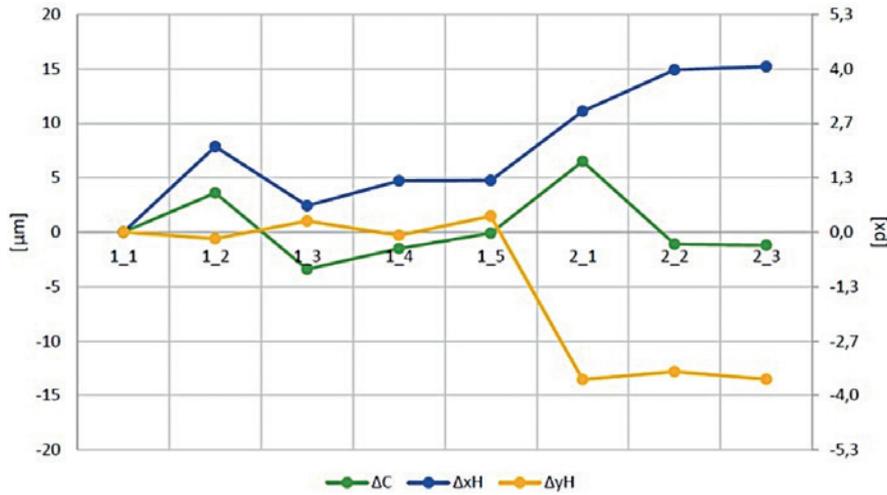


Abb. 7a | Zenmuse X5 – Variation der Parameter c_k, x_H, y_H (Format: TIFF)

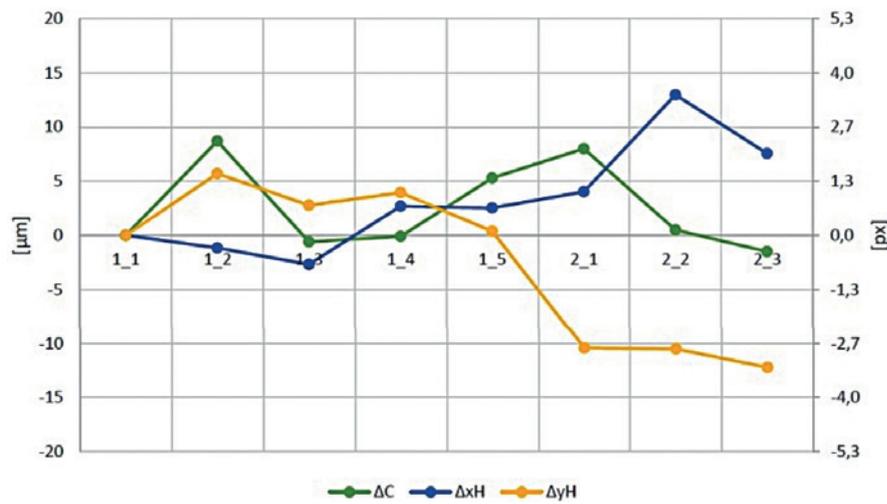


Abb. 7b | Zenmuse X5 – Variation der Parameter c_k, x_H, y_H (Format: JPEG)

für diese Systeme. Das in der Tabelle dargestellte σ_0 wurde als jeweiliger Mittelwert aus den Kalibrierläufen jedes Kamerasystems gewonnen. Der Wert spiegelt die Präzision des Schnitts von Strahlen einer Beobachtung mit Einheitsgewicht wider und ist sowohl in den Einheiten μm als auch pixel dargestellt. Letztere zeigt das

Verhältnis des σ_0 bezogen auf das sogenannte „pixelpitch“ (Pixelgröße) an, welches wiederum eine wesentliche Kenngröße eines Sensors darstellt. Größere Pixel führen in der Regel zu einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis und somit einer detailreicheren Abbildung des Sensors.

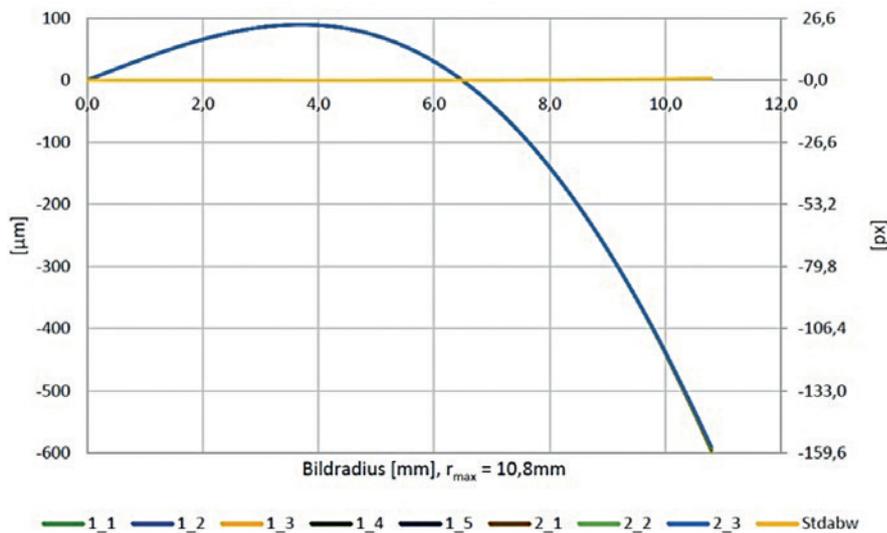


Abb. 8a | Zenmuse X5 – Variation der radial-symmetrischen Verzeichnung (Format: TIFF)

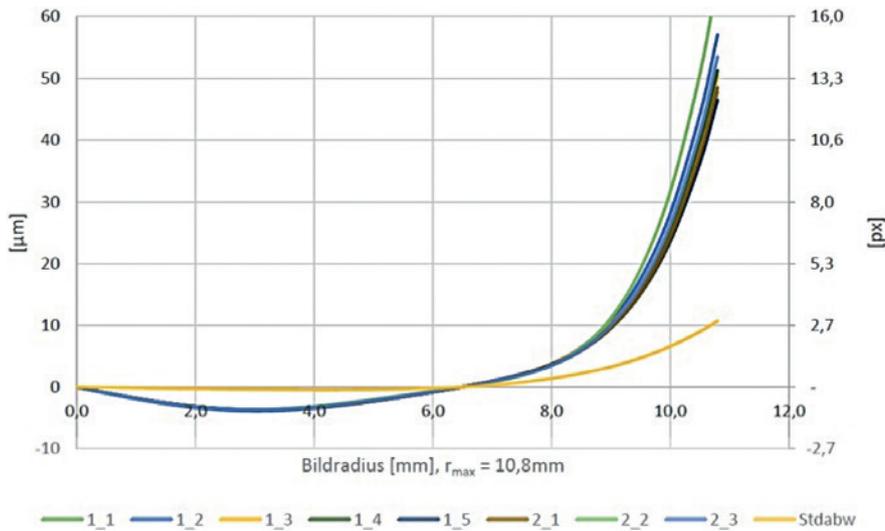


Abb. 8b | Zenmuse X5 – Variation der radial-symmetrischen Verzeichnung (Format: JPEG)

Da die Blockgeometrien quasi identisch sind (Abb. 3) und alle Bildbeobachtungen mit ähnlichen Gewichtungen betrachtet werden (wie sie automatisch durch die Software AICON 3D Studio festgelegt wurden), kann das σ_0 verwendet werden, um Ergebnisse zu vergleichen. Bemerkenswert ist hierbei, dass mit der Sigma DP1 sowie der Ricoh GRX zwei Kameras, die ausschließlich am Gebrauchtmärkte gehandelt werden, die besten Ergebnisse zeigen. Ein signifikantes Unterscheidungsmerkmal der im Benchmark untersuchten Systeme ist das besondere Konzept des Sensoraufbaus bei der Sigma DP1 (FOVEON-Chip), das sie deutlich von den sonstigen Sensoren mit Bayer-Pattern unterscheidet /Greiwe et al. 2017/.

Die Vorteile einer Nutzung unkomprimierter Bilddaten – hier im TIFF-Format – wird am Beispiel der DJI-Systeme deutlich. Die

automatisierte Messung der Testfeld-Targets (mittels Ellipsenoperator) führte im ansonsten identischen Bildmaterial zu einer deutlich gesteigerten Anzahl gemessener Punkte (zwischen 20 % und 50 % gegenüber den JPEG-Fotos) bei gleichzeitig besseren Strahlenschnitten (Verbesserung des σ_0 um ca. 25 %) (Abb. 10).

2.4 Vergleich von Testfeld- und-Selbstkalibrierungen

Die Ergebnisse der erweiterten Untersuchung der Zenmuse-X5-Kamera sind nachfolgend am Beispiel der Parameter c_k , x_H und y_H dargestellt. Die Konfiguration der Kalibrierungen im 3D-Testfeld

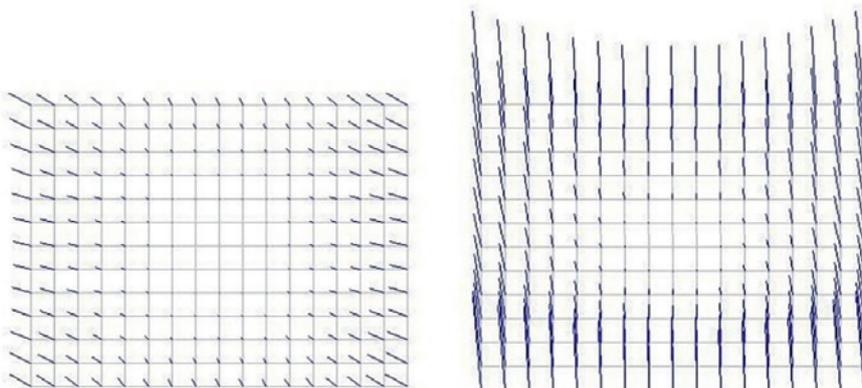


Abb. 9a | Zenmuse X5 – tangential-asymmetrische Verzeichnung; links: TIFF-Format (max. Wert 5,6 µm), rechts: JPEG-Format (max. Wert 19,8 µm)

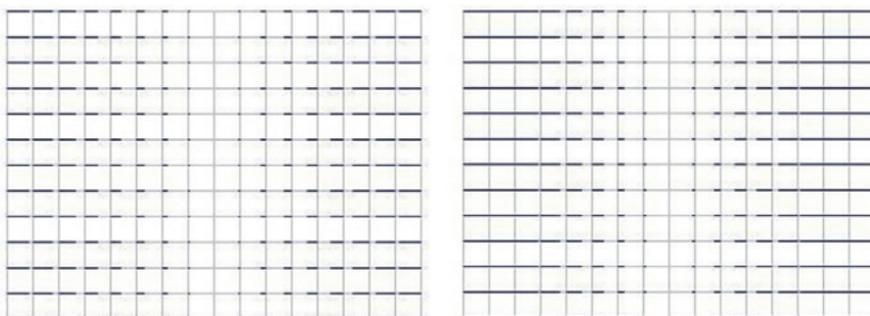


Abb. 9b | | Zenmuse X5 – Affinität und Nicht-Orthogonalität; links: TIFF-Format (max. Wert 18,3 µm), rechts: JPEG-Format (max. Wert 25,8 µm)

Kamera	Sensorformat in mm	Pixelpitch in μm	Bildformat	sigma0 in μm	sigma0 in pixel
Sigma DP1	20,7 × 13,8	7,8	JPEG	0,23	0,03
Ricoh GXR	23,6 × 15,7	5,5	JPEG	0,28	0,05
Sony Alpha 7R	35,9 × 24	4,9	JPEG	0,42	0,09
Sony Alpha NEX 5R	23,6 × 15,7	4,8	JPEG	0,28	0,06
Canon EOS 5 DSR	35,9 × 24	4,14	JPEG	0,69	0,17
PhaseOne iXU 1000	53,4 × 40	4,6	TIFF	0,37	0,08
DJI Phantom 3	6,2 × 4,6	1,5	JPEG	0,31	0,21
			TIFF	0,16	0,10
DJI Inspire 12 mm	13,2 × 8,8	3,9	JPEG	1,24	0,32
			TIFF	0,86	0,22
DJI Inspire 15 mm	13,2 × 8,8	3,9	JPEG	1,33	0,34
			TIFF	0,98	0,25

Tab. 2 | UAV-Kamera-Vergleich: Parameter und Ergebnisse der Testfeldkalibrierungen

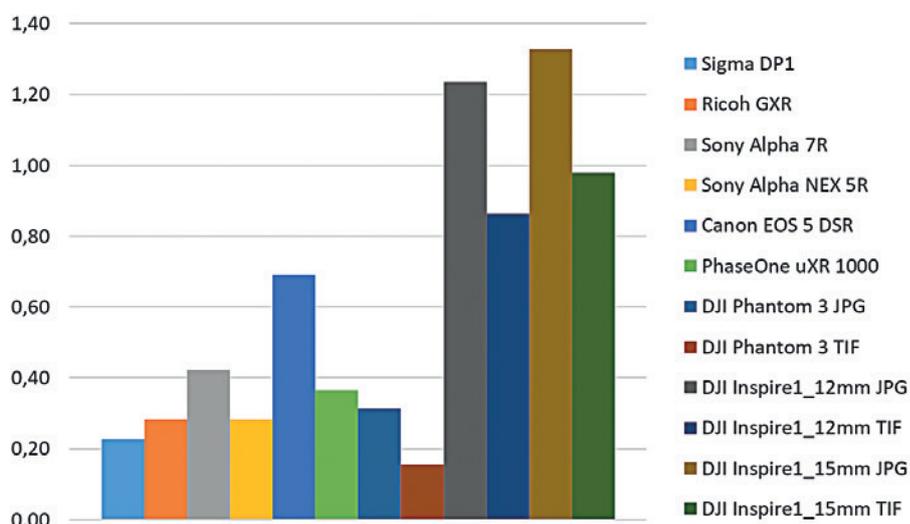


Abb. 10 | Sigma0 nach der Bündelblockausgleichung in μm

der Hochschule Bochum entspricht *Abb. 3*. Zusätzlich wurden verschiedene Selbstkalibrierungen auf der Grundlage von Bildflügen im Testfeld der Zeche Zollern durchgeführt (*Abb. 11*).

Während die drei ersten Kalibriersequenzen am 3D-Testfeld der Hochschule Bochum vergleichsweise geringe Abweichungen aufzeigen, kommt es bei der vierten Kalibrierung zu erheblichen Änderungen in den Parametern, obwohl alle Aufnahmen in einem unmittelbaren zeitlichen Zusammenhang angefertigt wurden und die Blockgeometrie in allen vier Fällen vergleichbar ist. Diese Abweichung kann wiederum als ein Indiz für die mechanische Instabilität der Zenmuse-X5-Kamera gedeutet werden. Die in *Abb. 12* dargestellten Ergebnisse der Selbstkalibrierung im Testfeld bestätigen diese Annahme. Der direkte Vergleich von Kalibrierparametern, wie in *Abb. 12* vorgenommen, muss etwas vorsichtig behandelt werden. Aufgrund von Korrelationen der Parameter untereinander und mit den Elementen der Äußeren Orientierung können die Parameter variieren, obwohl das Ergebnis gut ist. Dieses kann vor allem dann auftreten, wenn die Kalibrierparameter aus stark unterschiedlichen Blockgeometrien geschätzt werden (Cramer et al. 2017a/).

Die Selbstkalibrierung erfolgte unter Verwendung aller Luftbilder der alternierenden Flugstreifen der Kreuzbefliegung (R-C Unified)

und unter Verwendung der alternierenden Flugstreifen ohne Kreuzstreifen (R only).

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse der Kalibriersequenzen am 3D-Testfeld der Hochschule Bochum zeigen, dass das „Fix-Fokus-Konzept“ der Kamera des Phantom 3 Professional nur zu geringfügigen Änderungen von Kamerakonstante und Hauptpunktage führt. Über erweiterte Untersuchungen zu den Ergebnissen der Selbstkalibrierung in Verbindung mit Befliegungen auf dem Testgebiet der Zeche Zollern wird in (Cramer et al. 2017b/ berichtet).

Bei der DJI Zenmuse X5 konnte nicht nachgewiesen werden, dass die Elemente der Inneren Orientierung über die Zeit stabil bleiben. Die Verwendung von Wechselobjektiven in Verbindung mit dem MFT-Bajonettverschluss führt vermutlich zu einem Gang in der Inneren Orientierung. Grundsätzlich ist die Verwendung von Foto-Objektiven nicht zu empfehlen, da i.d.R. Fokus und Blende nicht mechanisch fixiert werden können. Eine mögliche Alternative ist der Austausch des Bajonettanschlusses gegen ein fixiertes Objektivge-

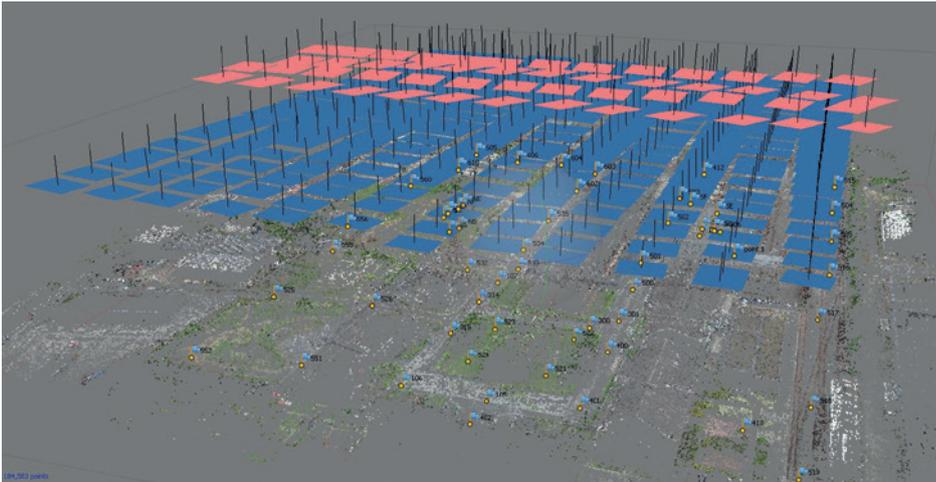


Abb. 11 | Bildfluganordnung Testfeld Zeche Zollern. Nadir alternierend (REGULAR): dunkelblau; Nadir alternierend Kreuz (CROSS): rot

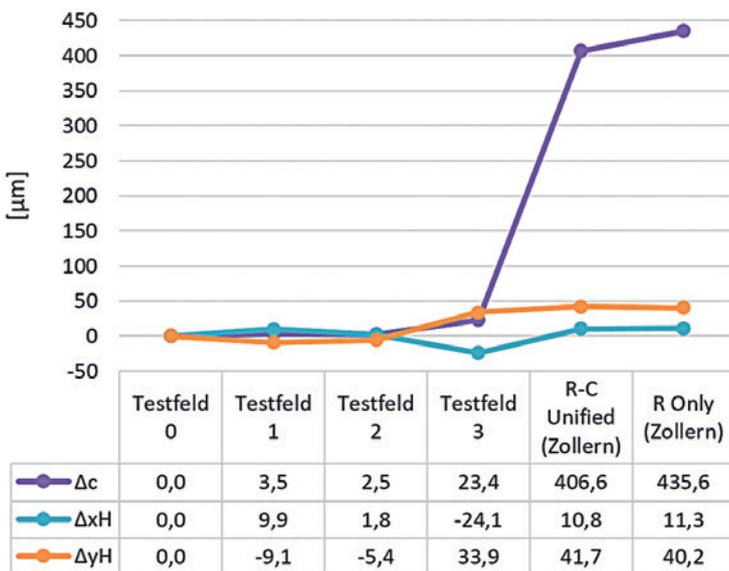


Abb. 12 | Zenmuse X5 – Variation der Parameter c_k , x_H , y_H nach Kalibrierung am 3D-Testfeld der Hochschule Bochum sowie aus einer Selbstkalibrierung beim Bildflug im Testfeld Zeche Zollern

winde, damit industrielle Optiken (z.B. Schneider Kreuznach Apo-Xenoplan 24/2.0) genutzt werden können. Entsprechende Umbauten einer Zenmuse X5 sind kurzfristig geplant und bieten die Option einer Kamerastabilisierung, vergleichbar der einer metrischen Kamera.

Im photogrammetrischen Prozess kann eine Selbstkalibrierung helfen, sofern der Block eine hinreichend gute Geometrie aufweist. Die Blöcke sollten eine hohe Bildüberlappung aufweisen, mit einander kreuzförmig überlagernden parallelen Streifen auf zwei verschiedenen Flughöhen ($\Delta_{\text{Höhe}}$ ca. 20 %–30 %). Gegebenenfalls ist es hilfreich, die Parameter der Inneren Orientierung ausgehend von den Näherungswerten vorhandener Kalibrierungen zu verwenden.

Für die DJI-Kameras wird eine Bildspeicherung im DNG-Format empfohlen, insbesondere dann, wenn hohe Genauigkeitsanforderungen vorliegen. Die dem JPEG-Format zugrunde liegende Zeichnung ist werksseitig vorkonfiguriert und beschreibt nicht die realen Abbildungsfehler. Da die Zenmuse X5 signifikante Unterschiede zwischen Labor- und Testfeldkalibrierungen aufweist, ist eine A-priori-Kalibrierung nur wenig hilfreich.

DANK

Besonderer Dank gilt allen Mitwirkenden der Gruppe „Metrische Kamera für UAV“ für die freundschaftliche und von vielen Ideen geprägte Zusammenarbeit!

LITERATUR

- Cramer, M. (2016): Welche ist am besten? – Ein paar Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. In: UAV2016 – Vermessung mit unbemannten System. Schriftenreihe des DVW, 82. Wißner, Augsburg, 97 – 118.
- Cramer, M.; Przybilla, H.-J.; Meißner, H.; Stebner, K. (2017): Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. In: 156. DVW-Seminar „UAV 2017 – Unmanned Aerial Vehicles 2017“, Stuttgart (in Vorbereitung).
- Cramer, M.; Przybilla, H.-J.; Zurhorst, A. (2017): UAV Cameras: Overview and Geometric Calibration Benchmark. Submitted to UAV-g 2017 conference, Bonn.
- DJI Innovations (2017): DJI-Website. <http://www.dji.com/de> (06.07.2017).

Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), (2016)1, 17–30.

Greiwe, A.; Peters, J.; Spreckels, V.; Schlienkamp, A.; Lösler, M.; Eschelbach, C. (2017): Geeignete Kameras zur Geländeaufnahme durch UAS. In: Luhmann, Th.; Schumacher, Chr. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Wichmann, Berlin/Offenbach, 202–221.

Jacobsen, K.; Cramer, M.; Ladstädter, R.; Ressler, C.; Spreckels, V. (2010): DGPF-Project: Evaluation of Digital Photogrammetric Camera Systems – Geometric Performance. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), (2010)2, 83–98.

Kraft, T.; Geßner, M.; Meißner, H.; Przybilla, H.-J.; Gerke, M. (2016): Introduction of a photogrammetric camera system for RPAS with highly accurate GNSS/IMU information for standardized workflows. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-3/W4, 71–75.

Meißner, H.; Cramer, M.; Piltz, B. (2017): Benchmarking the optical resolving power of UAV based camera systems. Submitted to UAV-g 2017 conference, Bonn.

Przybilla, H.-J.; Reuber, C.; Bäumker, M.; Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. In: Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 24(2015), 45–54.

Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: 156. DVW-Seminar „UAV 2017 – Unmanned Aerial Vehicles 2017“, Stuttgart (in Vorbereitung).

RawTherapee (2017): Software zur Konvertierung von RAW-Bilddaten. <http://rawtherapee.com> (06.07.2017).

Suasnews (2017): DJI drones maintain market share in the USA. <https://www.suasnews.com/2016/01/dji-maintain-market-share-in-the-usa/> (06.07.2017).

Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla

HOCHSCHULE BOCHUM
FACHBEREICH GEODÄSIE I
LABOR FÜR PHOTOGRAMMETRIE

Lennerhofstr. 140 | 44801 Bochum
heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de



Manuskript eingereicht: 13.07.2017 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

Technikwissen punktgenau:
Grundkenntnisse der GNSS-Technologie praxisnah dargestellt!

Das Werk ermöglicht es Anwendern zu beurteilen, ob GNSS zur Lösung ihrer Probleme geeignet ist. Erstmals wird auf die Problematik der GNSS-Verwundbarkeit eingegangen.

Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten. Das E-Book ist ausschließlich auf www.vde-verlag.de erhältlich.

NEU

Manfred Bauer
Vermessung und Ortung mit Satelliten
Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme
7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Wichmann

7., neu bearb. und erw.
Auflage 2018
566 Seiten
66,- € (Buch/E-Book)
92,40 € (Kombi)

Bestellen Sie jetzt: (030) 34 80 01-222 oder www.vde-verlag.de/180193