

# Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge

MICHAEL CRAMER & NORBERT HAALA, Stuttgart

**Keywords:** UAV, low-cost Kompaktkamera, photogrammetrische Genauigkeitsauswertung

**Kurzfassung:** Unbemannte Flugsysteme (UAV) gewinnen auch für photogrammetrische Anwendungen zunehmend an Bedeutung. Insbesondere für die zeitlich und räumlich hochauflösende Erfassung kleinräumiger Gebiete bieten UAV auch aufgrund der preiswerten Systemkomponenten eine flexible und kostengünstig Alternative zur klassischen bemannten Luftbildphotogrammetrie. Im Beitrag soll das Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Datenauswertung für solche Systeme exemplarisch anhand von Testflügen im Bereich des Testgebiets Vaihingen/Enz untersucht werden. Für diese Testgebiete stehen unter anderem aus Befliegungen und Auswertungen während des DGPF-Projekts zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamarasysteme Referenzdaten zur Verfügung, die zu Vergleichszwecken herangezogen werden können. Zur Erfassung der untersuchten Daten wurde ein an der Universität Stuttgart entwickeltes System als Trägerplattform genutzt. Dieses besteht aus einem seriengefertigten Fluggerät mit eigenentwickelten Navigations- und Steuerkomponenten, als Kamera kommt eine Standard-Digitalkamera aus dem Consumerbereich zum Einsatz. Die Plattform wurde in diesen Tests erstmals für photogrammetrische Anwendungen eingesetzt.

Im Rahmen der Untersuchungen wird das geometrische Genauigkeitspotential der UAV-Bilddaten zunächst anhand der erreichbaren Qualität der durchgeführten Bündelblockausgleichung analysiert. Hierfür stehen eine Reihe signalisierter Pass- und Kontrollpunkte zur Verfügung. Schwerpunkt ist dann die Untersuchung der durch Bildzuordnung abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodelle (DOM) beziehungsweise 3D Punktwolken. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Fluggeschwindigkeit von UAV können Luftbilder mit hohen Überdeckungsgraden erfasst werden. Die Vorteile der so erhöhten Redundanz bei der DOM-Gewinnung durch geeignete Multi-Stereoverfahren werden innerhalb des Beitrags ebenfalls aufgezeigt.

## 1 Einleitung

Unbemannte Luftfahrzeuge erlauben eine flexible und oftmals auch kostengünstige Erfassung von kleinräumigen Gebieten, für die bemannte, herkömmliche Flüge oftmals zu kostspielig sind. Mit der Miniaturisierung von Navigationskomponenten, der Verfügbarkeit von entsprechenden Trägerplattformen und den entsprechenden Verfahren zur autonomen Flugdurchführung und automatisierten Datenauswertung erschließen sich UAVs neue Anwendungsfelder. Dementsprechend wird diese Technologie sowohl in Forschung als auch für kommerzielle Anwendungen zur Zeit intensiv untersucht. Dem großen Potenzial einer flexiblen Datenerfassung stehen allerdings auch gravierende Nachteile gegenüber. Diese sind insbesondere die noch großen Einschränkungen im Bereich der Fluggenehmigung (vor allem Sicht-Bedingung) aber auch die limitierte Nutzlastaufnahme und eingeschränkte Flugdauer. Teilweise wiegen diese Nachteile nicht so schwerwiegend, sofern nur an kleinräumige Anwendungen gedacht wird. Der photogrammetrisch entscheidende Punkt ist jedoch die Frage nach den Auswerteprodukten und deren Genauigkeiten. Daher liegt der Schwerpunkt hier auf der Untersuchung des photogrammetrischen Genauigkeitspotenzials dieser Systemkonstellation.

Im Zuge der Auswertungen wurde eine vollständige Prozesskette realisiert, die die Orientierung der Bilder und spätere Ableitung von digitalen Oberflächenmodellen und Orthophotos erlaubt. Da es sich um eine photogrammetrische Erstauswertung von UAV-Daten handelt, konnten die eigentlich erwarteten Genauigkeiten nicht vollständig erreicht werden. Dieses ist vor allem durch die nicht optimale Kamera verursacht, die zudem für die Befliegungen unzureichend konfiguriert war. Diese Punkte werden im weiteren Verlauf separat diskutiert werden. Vor diesem Hintergrund ist dieser Beitrag eher als eine Art Erfahrungsbericht zu verstehen, auch für Leser, die sich erstmals mit dieser Technologie beschäftigen wollen.

## 2 UAV-Plattform

Die UAV-Plattform wurde vom Institut für Flugmechanik und Flugregelung (IFR) der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik & Geodäsie der Universität Stuttgart zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um einen Starrflügler mit zwei Elektromotoren, einer Spannweite von 1.4 m und einem Abfluggewicht von ca. 1.3 kg. Das Flugzeug aus Elapor Schaumstoff ist damit eine sehr leichte aber auch sehr robuste und preisgünstige Trägerplattform. Der Flugzeugkörper, die elektrischen Motoren, Servos und Stromversorgung sind Standardkomponenten. Das Computersystem im Flugzeug ist eine Eigenentwicklung des IFR und basiert auf einer anwendungs-programmierbaren Logik-Anordnung (FPGA) (Weimer et al., 2010). Die Trägerplattform fliegt mit einer Geschwindigkeit von ca. 20 m/s. Die maximale Flugdauer mit einer Akkuladung liegt bei ca. 20 min. Dies entspricht einer Flugstrecke von ca. 20 km unter Berücksichtigung von entsprechenden Zeitintervallen für Auf- und Abstieg bzw. Start- und Landung. Die Abb. 1 zeigt das Flugzeug in einer Gesamtaufnahme. Auf dem Rumpf kurz vor dem Höhenleitwerk ist die GPS-Empfangeinheit zu sehen. Die Kamera wird in einer entsprechenden Aussparung des Flugzeugrumpfs mit Klebeband fixiert.



Abb. 1: UAV-Plattform.

### 2.1 Navigationssensorik im Flugzeug

Die Sensorik im Flugzeug umfasst neben der Kamera verschiedene Komponenten zur Echtzeitnavigation, deren Navigationsdaten später auch für die photogrammetrische Auswertung verwendet werden können. Es handelt sich dabei um eine low-cost inertielle Messeinheit (IMU), ein Magnetometer, barometrische Höhenmesser und Drucksensoren und ein L1-Code GPS-Empfänger. In einem dezentralen erweiterten Kalmanfilter wird daraus die aktuelle Navigationsinformation berechnet. Die Genauigkeit der (Horizontal-)Position wird dabei wesentlich durch die Spezifikationen des verwendeten GPS-Empfängers bestimmt und ist für den eingesetzten Locosys LS20031 Empfänger mit 3 m RMS angegeben. Die Genauigkeit der Vertikalkoordinaten hängt wesentlich von der barometrischen Höhenmessung ab. Weitere Details zur Systemkonfiguration sind Haala et al. (2011) zu entnehmen.

### 2.2 Kamerasystem

Für die Aufnahme der Bilder wird eine Canon IXUS 100 Kompaktdigitalkamera mit 12 MPix (3000 x 4000 pix) eingesetzt. Die Kamera hat eine nominelle Brennweite von 5.9 mm. In Kombination mit einer 1/2.3" CCD – korrespondierende CCD-Fläche 4.62 x 6.16 mm<sup>2</sup>, Bilddiagonale 7.7 mm – realisiert die Kamera einen maximalen Bildwinkel von ca. 66°, im regulären Kleinbildformat entsprechend einer Weitwinkelbrennweite von ca. 35 mm. Die individuellen Pixel auf der CCD haben nur eine Größe von 1.54 x 1.54 µm<sup>2</sup>, was sich auf die Empfindlichkeit bzw. das Rauschverhalten der Kamera auswirken kann. Daher verfügt die Kamera auch über einen optischen Bildstabilisator, der zur Steigerung der Bildqualität in vielen vergleichbaren Systemen im Consumersektor verwendet wird. Zu dem Zeitpunkt, als die Kamera als optischer Sensor für diese Plattform ausgewählt wurde, war nicht primär an photogrammetrische Anwendungen gedacht. Die Kamera wurde in erster Linie ausgewählt, da neben ihrem geringen Gewicht von 140 g (ohne Akku) für Canon Kameras eine Schnittstelle zur Verfügung steht (sog. Canon Hack Development Kit (CHDK)). Mit dieser Schnitt-

stelle kann direkt in die Funktionalität der Kamera eingegriffen werden. Damit kann über den Flugzeugrechner und somit ferngesteuert die rechnergestützte Auslösung der Kamera kontrolliert werden.

### 2.3 Laborkalibrierung Kamera

Im Vorfeld der photogrammetrischen Befliegung wurde die Kamera im Labor kalibriert. Um eine erste Aussage über die Stabilität des Kamerasystems zu treffen, wurden insgesamt 3 Kalibrierungen durchgeführt, in denen das terrestrische Testfeld mit jeweils 8 Bildern gemäß der bekannten 8-Standpunkt-Kalibrierung aufgenommen wurde. Die Auswertung wurde mit *Australis* (Fraser, 1997) durchgeführt. Das verwendete Kalibriermodell entspricht im Wesentlichen dem ursprünglich von Brown (1976) entwickelten physikalischen Parametersatz zur Kamerakalibrierung. Um die Reproduzierbarkeit der Kalibrierungen zu analysieren wurde die Kamera nach der ersten Aufnahmesequenz ausgeschaltet. Die 16 Bilder der zweiten und dritten Aufnahmesequenz wurden dann in einem Durchgang aufgenommen, d.h. die Kamera wurde während dessen nicht ausgeschaltet.

Die Kalibrierparameter aus den drei Kalibrierläufen ergeben sich leicht unterschiedlich, was auch an den Korrelationen der Parameter untereinander liegen kann. Im hier vorliegenden Fall tritt eine hohe Korrelation zwischen der Kamerakonstante und der x-Komponente des Bildhauptpunktes auf. Dies kann an der Aufnahmekonstellation liegen – es wurde ein ebenes Testfeld verwendet – oder auch an der beweglichen Linse des nicht fixierten optischen Bildstabilisators, die sich beim Verkanten der Kamera mitbewegt.

Um die Übereinstimmung der drei separaten Kalibrierungen abschätzen zu können, werden die Bildpunkte per Vorwärtsschnitt unter Verwendung der jeweiligen Kalibrierterme in den Objektraum gerechnet und die Objektkoordinaten untereinander verglichen. Die RMS-Werte der Differenzen erreichen Werte von bis zu 1.4 cm. Diese Abweichungen sind aufgrund der kurzen Aufnahmeentfernungen und der guten Schnittgeometrie signifikant. Die maximalen Differenzen treten auf, wenn die Parameter einer Kalibrierung für einen Datensatz verwendet werden, zwischen der Kamera aus- und wieder eingeschaltet worden ist. Damit muss von nicht reproduzierbaren Kalibriertermen ausgegangen werden, vor allem nach Ein- und Ausschalten und dem damit verbundenen Ein- und Ausfahren der Optik.

## 3 Prozesskette

UAV-Bildverbände unterscheiden sich von üblichen photogrammetrischen Bildflügen vor allem dadurch, dass klein-formatigere Kamerasysteme in unkonventionelleren Aufnahmeanordnungen zum Einsatz kommen. Im Falle von Luftbildern, die wie in diesem Fall mit Starrflügler-UAVs erfasst werden, orientiert sich die Aufnahmeplanung zwar oft an der klassischen Planung von photogrammetrischen Bildstreifen. Aufgrund der im Vergleich zu einem herkömmlichen Bildflugzeug deutlich instabileren Fluglage und dem Fehlen einer stabilisierenden Aufhängung kommt es zu deutlich höheren Abweichungen vom Nadirfall und zu deutlich unregelmäßigeren Bildüberdeckungen. Im Regelfall ist es daher selten möglich, die UAV-Bilder ohne eine Vororientierung einer klassischen photogrammetrischen Auswertekette, wie diese z.B. in *Match-AT* (Sigle & Heuchel, 2001) realisiert ist, zuzuführen – vor allem wenn zudem keine hinreichend genaue Sensororientierung aus den Navigationsdaten zur Verfügung steht.

Im Bereich der Computervision existieren Bildorientierungsverfahren, die mit quasi unstrukturierten, irregulären und hoch-redundanten, hoch-überdeckenden Bildverbänden zurechtkommen (sog. *structure and motion* Verfahren). An der Universität Washington wurde von Snavely et al. (2007) die open-source Software „*Bundler*“ entwickelt, die unter der GNU General Public License zur Verfügung steht. Ursprünglich sollten im Rahmen des *Photo Tourism* Projekts beliebige Bilder (auch aus Bildquellen im Internet) von bekannten Sehenswürdigkeiten oder ganzen Städten orientiert und eine zugehörige 3D-Punktwolke im Objektraum generiert werden.

Dieses Verfahren kann natürlich auch auf die Bilder einer UAV-Befliegung angewandt werden. Im ersten Schritt werden die entsprechenden Überdeckungen zwischen den Bildern analysiert, die Messung der Verknüpfungspunkte basiert auf dem *SIFT*-Operator (Lowe, 2004). Die resultierende Punktwolke wird in einem vom *Bundler* festgelegten, quasi beliebigen lokalen Koordinatensystem geliefert.

Für die hier durchgeführten empirischen Untersuchungen wurde die *Bundler*-Software entsprechend modifiziert (Abdel-Wahab et al., 2011), vor allem um die Punktkorrespondenzen hinsichtlich Genau-

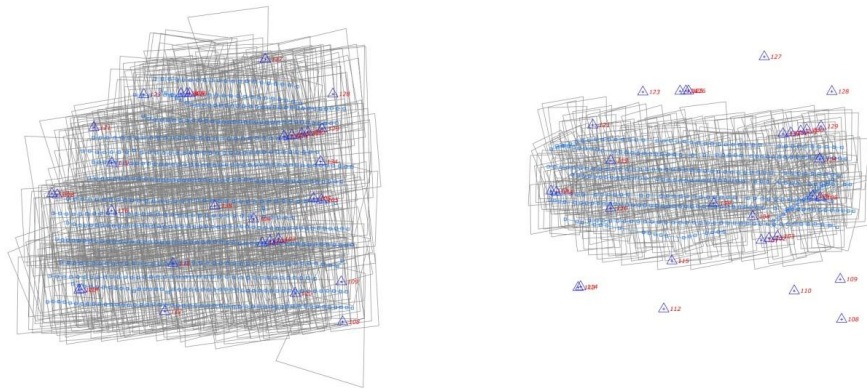
igkeit, Verteilung und Zuverlässigkeit zu erhöhen. Da die bislang vorhandene Bundler-Implementierung keine Möglichkeit zulässt, manuelle Messungen von Passpunkten in den Orientierungsprozess einzubeziehen, werden die Ergebnisse der Bundler-Auswertung in die Standardsoftware Match-AT übertragen. Dazu muss ein Übergang vom lokalen Bundler-Koordinatensystem in das Objektkoordinatensystem realisiert werden. Durch den Vergleich der im lokalen Bundler-Koordinatensystem bestimmten Projektionszentrumskoordinaten mit den GPS-Positionen (z.B. UTM-Koordinatensystem) lassen sich die 7-Parameter der räumlichen Helmerttransformation ableiten. So können die Orientierungselemente und auch 3D-Punktwolke aus der Bundler-Auswertung in Abhängigkeit von der Genauigkeit der GPS-Projektionszentren in das gewünschte Objektkoordinatensystem transformiert werden. Damit liegen für alle Bilder (Näherungs-)Werte für die äußere Orientierung vor. Mit diesen Werten wird dann das photogrammetrische Projekt in Match-AT aufgesetzt, um so z.B. die erforderliche Passpunktmessung durchzuführen. Anschließend kann die Bündelausgleichung mit Passpunkten erfolgen, wobei es dem Anwender prinzipiell freigestellt ist, vorab eine erneute automatische Verknüpfungspunktmessung mit Match-AT vorzunehmen oder alternativ die bereits durch Bundler ermittelten Punktkorrespondenzen für die Ausgleichung zu verwenden. Im Rahmen der hier durchgeführten empirischen Untersuchungen wurden beide Varianten durchgeführt, wie in dem nachfolgenden Abschnitt vorgestellt wird.

## **4 Empirische Testbefliegungen**

### **4.1 Datenerfassung**

Das Testfeld Vaihingen/Enz des Instituts für Photogrammetrie (ifp) der Universität Stuttgart ist bislang fast ausschließlich für Genauigkeitsuntersuchungen großformatiger Luftbildkamerasysteme in üblichen photogrammetrischen Bildflugzeugen verwendet worden. Das Testfeld existiert seit 1995 (Cramer, 2005) und wurde im Sommer 2008 auch für die Befliegungen im Rahmen des Kameraevaluierungstests der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) genutzt (Cramer, 2010). Das Testfeld liegt ca. 30 km nord-westlich von Stuttgart und umfasst insgesamt eine Ausdehnung von 7.4 x 4.7 km<sup>2</sup> mit ca. 200 signalisierten Pass- und Kontrollpunkten. Für die hier durchgeführten UAV-Untersuchungen wurde nur ein Teilbereich des Testgebiets mit einer Größe von knapp 2 km<sup>2</sup> (Ausdehnung 1.3 x 1.5 km<sup>2</sup>) befliegen. Zur Verdichtung der vorhandenen Passpunktinformationen wurden dazu am Flugtag weitere temporäre Signalisierungstafeln ausgebracht und vor Ort mit GPS und real-time Korrekturdaten eingemessen. Die Genauigkeit der Passpunktinformation ist im Bereich von 1 – 3 cm, vergleichbar mit der Genauigkeit der permanent signalisierten Punkte im Testgebiet. Allerdings konnten bei der späteren Auswertung der Bilder nicht alle Punkte verwendet werden, was Großteils durch die unzureichende Qualität der Bilder verursacht wurde.

Die eigentlichen Befliegungen sind mit Bodenpixelgrößen (GSD) von nominell 8 cm bzw. 5 cm geplant, woraus zwei unterschiedlichen Flughöhen von ca. 300 m ü.G. bzw. 200 m ü.G. resultieren. Die tatsächlichen Geländehöhen variieren im Überflieungsgebiet zwischen 250 m und 330 m. Die beiden Bildverbände sind als klassische Blöcke konzipiert mit parallelen Flugstreifen in Ost-West Richtung. Aufgrund der nicht stabilisierten Aufhängung der Kamera in der Trägerplattform und der damit verbundenen großen Abweichungen der Aufnahmerichtungen von der idealen Nadiraufnahme sind die Überdeckungen zwischen den benachbarten Flugstreifen mit geplanten 70% sehr hoch. Die Überdeckung innerhalb des Flugstreifens wird festgelegt durch das Auslöseintervall der Kamera. Die Bilder der Kamera werden mit einem festen Auslöseintervall von 1.5 s aufgenommen, was bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 20 m/s zu einer Basislänge von 30 m führt. Die korrespondierende Überdeckung in Flugrichtung beträgt knapp 90%. Die Abb. 2 zeigt die Blockkonfiguration der GSD 8 cm bzw. GSD 5 cm Befliegung mit den entsprechenden Bildüberdeckungen und signalisierten Bodenpunkten. Der Block GSD 5 cm wurde in einem Flug erfasst (8 Flugstreifen, 334 Bilder), für die insgesamt 16 Flugstreifen (621 Bilder) des GSD 8 cm Blocks musste dreimal gestartet werden, da das abgedeckte Gebiet im Vergleich zum GSD 5 cm Block größer und mehr Flugzeit für Steig- und Sinkflug kalkuliert werden musste. Zudem wurden aufgrund starker Gegenwinde die Akkus der Elektromotoren deutlich stärker belastet, was die effektive Flugzeit verkürzt hat.



**Abb. 2:** Blockgeometrie Bildflug GSD 8 cm (links), Bildflug GSD 5 cm (rechts).

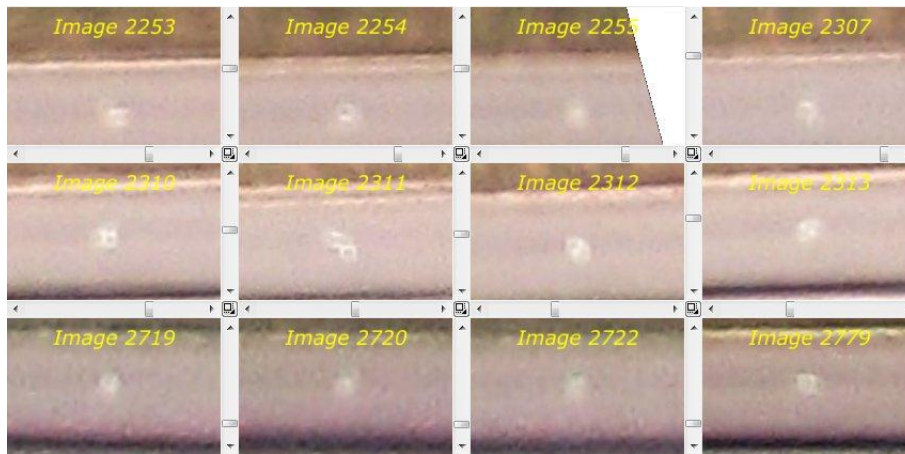
Variationen in der Fluggeschwindigkeit durch Windbeeinträchtigungen wirken sich aufgrund des konstanten Auslöseintervalls auf die Basislängen und damit auch auf die Überdeckung in Flugrichtung aus. Für die Befliegung GSD 8 cm variiert die Fluggeschwindigkeit zwischen 22 m/s für die in Ost-West-Richtung geflogenen Streifen und 18 m/s für die in Gegenrichtung geflogenen Streifen, was zu Basislängenvariationen zwischen 25 m – 35 m führt. Bei einer nominellen Bildgröße im Gelände von 240 x 320 m<sup>2</sup> (GSD 8 cm) beeinflusst diese Variation die nominelle Überdeckung um  $\pm 2\%$ , für die Befliegung mit GSD 5 cm (Bildgröße entsprechend 150 x 200 m<sup>2</sup>) variiert die Überdeckung in Flugrichtung zwischen 76 – 83%, da aufgrund der kleineren Bildgröße die vorgegebene nominelle Basislänge von 30 m einer Vorwärtsüberdeckung von 80% entspricht. Der Einfluss auf die Überdeckung aufgrund der Variation der Basislänge ist aber im Vergleich zu den Variationen der Neigungswinkel fast vernachlässigbar. Im Rahmen der späteren Auswertungen konnten Abweichungen vom Nadirfall in der Größenordnung von mehr als  $\pm 30^\circ$  (Rollwinkel) und  $\pm 10^\circ$  (Nickwinkel) nachgewiesen werden. Da sich diese Abweichungen vom Normalfall in Abhängigkeit von der Flughöhe auf die Lage der Bilder im Objektraum niederschlagen, muss für den GSD 8 cm Flug mit Variationen in einer Größenordnung von 50 m in Flugrichtung und 170 m quer dazu gerechnet werden. Die größere Dynamik um die Rollachse ist demzufolge bei der Planung der Flugstreifenabstände entsprechend zu berücksichtigen.

Die eigentliche Befliegung wurde am 04. März 2011 durchgeführt. Es war der erste Flug, der in Zusammenarbeit mit dem IFR mit dem Schwerpunkt auf der photogrammetrischen Auswertung und Genauigkeitsanalyse realisiert werden konnte. Aus dieser Erstdatenerfassung und den beiderseits noch mangelnden Erfahrungen lassen sich gewisse Defizite erklären, die die weitere Auswertung der Daten negativ beeinflusst haben. Die eigentliche Flugplanung konnte aber, wie die Blockkonfigurationen in Abb. 2 bereits gezeigt haben, gut umgesetzt werden. Bei einigen Streifen traten Ablagen von der geplanten Streifenachse in einer Größenordnung von etwa 10 m auf, was durch fehlerhafte Trimmung der Ruder verursacht werden kann. Im Vergleich zu den oben dargestellten Effekten beeinflusst diese Ablage aber die geplanten Überdeckungen in deutlich geringerem Maße.

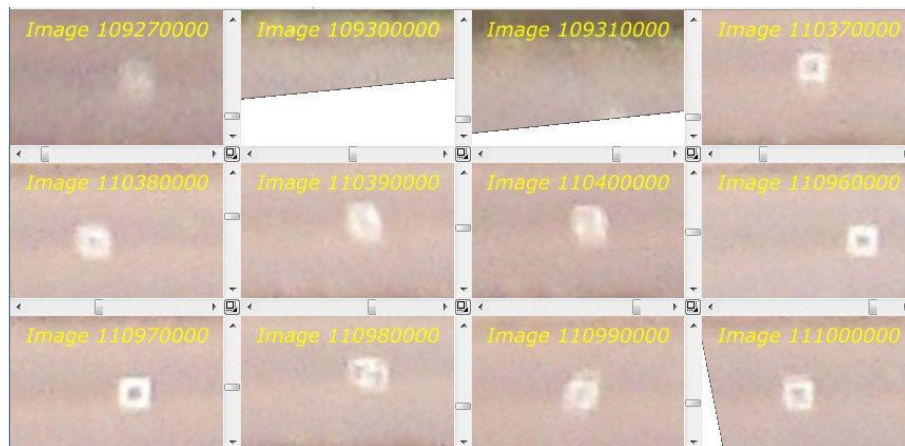
Ein wesentliches Problem bei der Bilddatenerfassung waren die deutlich zu langen Belichtungszeiten, die sich negativ auf die Bildschärfe auswirken. Aufgrund von falschen Kameraeinstellungen sind die Befliegungen mit einer Empfindlichkeit von ISO 200 durchgeführt wurden, was bei einer vorgegebenen Blendenzahl  $f/9$  in Belichtungszeiten von 1/250 s (GSD 5 cm) bzw. 1/80 s, 1/125 s, 1/160 s für die drei Flüge mit GSD 8 cm resultiert. Diese Belichtungszeiten sind dadurch verursacht, dass das Neutraldichtefilter bei dieser Kamera in der Automateinstellung standardmäßig aktiviert ist, d.h. die Kamera entscheidet je nach Beleuchtungsbedingungen selbstständig über den Einsatz des Filters. Das ND-Filter ist eigentlich für Aufnahmesituation vorgesehen, in denen bei guten Beleuchtungsbedingungen längere Belichtungszeiten erwünscht sind ohne die Kamera dafür stark abblenden zu müssen. Dieses kann in der Motivfotografie zur bewussten Erzeugung von Bewegungsunschärfen eingesetzt werden, ist aber in der UAV-Anwendung gänzlich kontraproduktiv. Eine korrekte Deaktivierung des

ND-Filters hätte bei gleicher Beleuchtung und unveränderter ISO Empfindlichkeit Belichtungszeiten von 1/640 s im Vergleich zu den realisierten 1/80 s ermöglicht.

Derartig lange Belichtungszeiten verursachen für die UAV-Anwendung schon aufgrund der reinen Fluggeschwindigkeit von 20 m/s nominelle Unschärfen im Bereich von 1 – 3 Pixel im Bild, ohne Berücksichtigung von zusätzlichen Unschärfen hervorgerufen durch Orientierungswinkeländerungen. Die Abb. 3 zeigt den Einfluss dieser Effekte. Dargestellt ist ein permanent signalisierter Passpunkt, der durch die hohe Überdeckung in mehreren Bildern gemessen werden kann. Die Passpunktmarkierung in der Örtlichkeit besteht aus einer 60 x 60 cm<sup>2</sup> großen weißen Farbmarkierung, die in ihrer Mitte eine weitere 30 x 30 cm<sup>2</sup> schwarze Markierung aufweist und auf einem asphaltierten Feldweg aufgebracht ist. Die hier exemplarisch dargestellten Bildausschnitte zeigen wie schlecht dieses eigentlich ca. 10 x 10 Pixel große Objekt in den Bildern zu erkennen ist. Neben den Unschärfen, die z.T. zu einer Art Doppelabbildung des Signals führen, fällt aber auch die insgesamt sehr schlechte radiometrische Qualität der Bilder auf, was auf die sehr kleine CCD-Pixelgröße und nicht optimale Kameraeinstellung rückführbar ist.



Passpunkt #138 in Bildflug GSD 8 cm



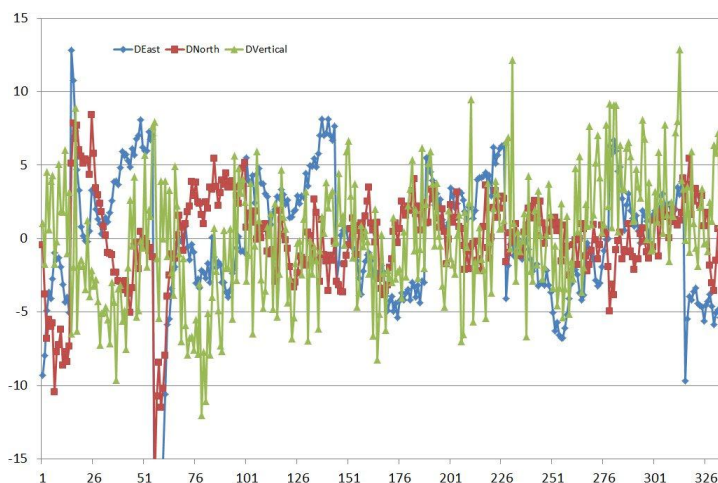
Passpunkt #138 in Bildflug GSD 5 cm

**Abb. 3:** Qualität der Abbildung eines signalisierten Passpunktes in den Bildern der UAV-Befliegung.

## 4.2 Photogrammetrische Genauigkeitsuntersuchung

Für die photogrammetrischen Auswertungen wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Wege beschritten. Im Fall der GSD 8 cm Befliegung beruht die mit Match-AT durchgeführte Aerotriangulation auf den zuvor mit Match-AT zugeordneten Verknüpfungspunkten. Die zuvor ermittelten Resultate der Bundler-Auswertung (Elemente der äußeren Orientierung) wurden nur zu Vororientierung der Bilder verwendet. Die Bilder wurden ohne Vorabverzeichnungskorrekturen in die AT eingeführt. Im Rahmen der Auswertung des GSD 5 cm Bildverbandes wurden die Bildkoordinaten aus der Bundler-Auswertung mit in das Match-AT Programm übernommen und keine weitere Verknüpfungspunktmessung durchgeführt. Das heißt, in diesem Fall beruht die AT ausschließlich auf den zuvor im Bundler zugeordneten Verknüpfungspunkten. Des Weiteren wurden die Bilder vorab um die mittlere Verzeichnung aus der Laborkalibrierung korrigiert. Die Passpunktmessung erfolgte manuell in allen Bildern, in denen die Punkte unter Berücksichtigung der bereits besprochenen Bildqualität erkennbar und messbar waren.

Zur weiteren Stabilisierung der Blockgeometrie wurden die direkt beobachteten Projektionszentrumskoordinaten aus der GPS-Messung verwendet. Die angenommene Genauigkeit der GPS-Projektionszentrumskoordinaten aus den Systemspezifikationen liegt bei 3 m (RMS). Diese Genauigkeit konnte durch die Vergleich mit den im Rahmen der AT geschätzten Projektionszentren bestätigt werden. Die Abb. 4 zeigt die Differenzen an den geschätzten 334 Kamerastationen der GSD 5 cm Befliegung. Die AT wurde dafür als freies Netz ohne Verwendung von Passpunkten bzw. weiteren Zusatzparametern durchgeführt. Die RMS-Werte der Differenzen sind 4.6 m, 3.1 m bzw. 4.2 m für die Ost, Nord und Vertikalkomponente. Für die späteren AT-Läufe wurden die GPS-Projektionszentren mit einer Genauigkeit (Std.Abw.) von 4 m eingeführt.

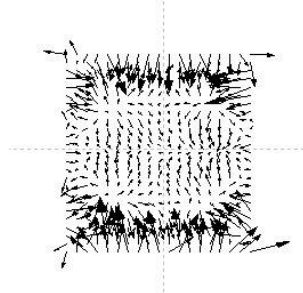
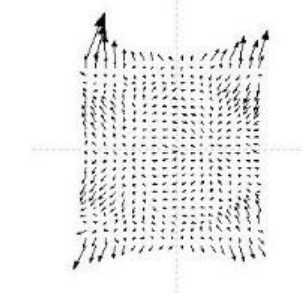


**Abb. 4:** Differenzen der GPS und AT-Projektionszentren aller Bilder (in [m]).

Die Bündelausgleichung wurde als GPS-gestützte AT mit Passpunkten für die Bildverbände beider Flughöhen getrennt durchgeführt. In beiden Fällen wurden zusätzliche Parameter zur Selbstkalibrierung gemäß dem 44-Parametermodell von Grün (1978) eingeführt. Die wesentlichen Ergebnisse der Ausgleichungen (Residuen im Bildraum, Residuen der Kontrollpunkte, geschätzte Genauigkeit Objektpunkte) sind in der Tab. 1 aufgeführt. Des Weiteren zeigt die Tabelle die mittlere Restverzeichnung, die nach der Korrektur durch die 44 Parameter in den Bildern noch vorhanden ist.

Die RMS-Werte der Bildpunktmessung zeigen die Unterschiede zwischen den automatischen und manuell gemessenen Punkten, was auf die Probleme der Punktidentifikation zur Messung der signalisierten Passpunkte rückführbar ist. Da die Passpunkte im Objektraum für die GSD 5 cm Befliegung mit einer höheren Gewichtung eingeführt wurden (Std.Abw.: GSD 8 cm X,Y=0.5 m, Z=0.8 m; GSD 5 cm X,Y=0.011 m, Z=0.035 m), zeigen sich für diesen Flug auch größere Residuen an den manuellen Messungen im Bildraum. Analog ergeben sich auch größere Verbesserungen im Objektraum.

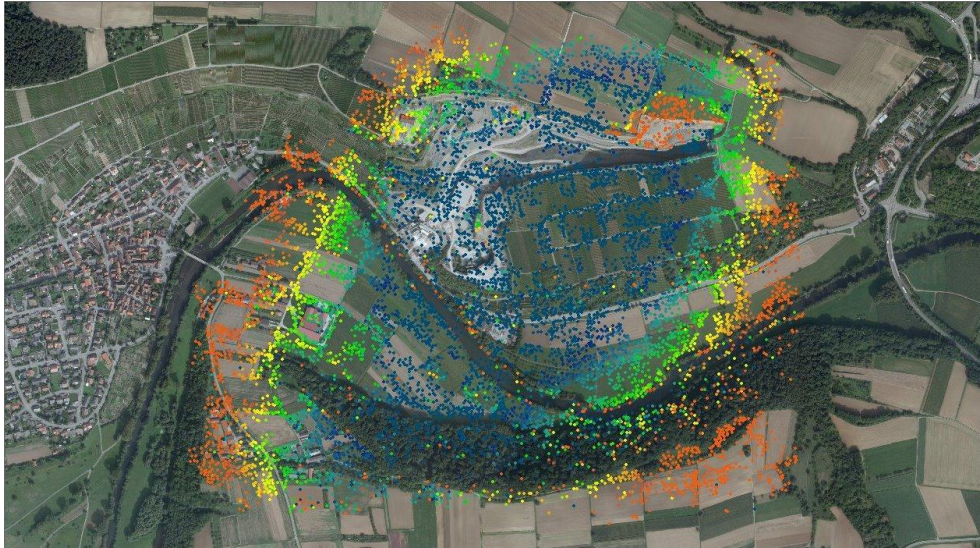
**Tab. 1:** Genauigkeit der GPS-gestützten AT mit Match-AT

	GSD 8 cm 621 Bilder, 9483 Blockpunkte	GSD 5 cm 334 Bilder, 1321732 Blockpunkte
Sigma0 (a posteriori)	2.2	1.6
Residuen Bildpunkte (RMS) Manuelle Messung Automatische Messung	x= 8.4 $\mu\text{m}$ , y=10.2 $\mu\text{m}$ x= 1.5 $\mu\text{m}$ , y=1.5 $\mu\text{m}$	x=15.5 $\mu\text{m}$ , y=17.6 $\mu\text{m}$ x= 1.3 $\mu\text{m}$ , y=1.3 $\mu\text{m}$
Residuen (RMS) 3D Kontrollpunkte	X= 1.64 m, Y=1.52 m, Z= 1.69 m	X= 0.01 m, Y= 0.04 m, Z= 0.27 m
Genauigkeit (Std.Abw.) Neupunkte Objektraum	X=0.04 m, Y= 0.05 m, Z= 0.12 m	X=0.03 m, Y=0.05 m, Z= 0.15m
Restsystematik im Bildraum nach Selbstkalibrierung	 Max. Residuum 3.5 $\mu\text{m}$	 Max. Residuum 3.2 $\mu\text{m}$

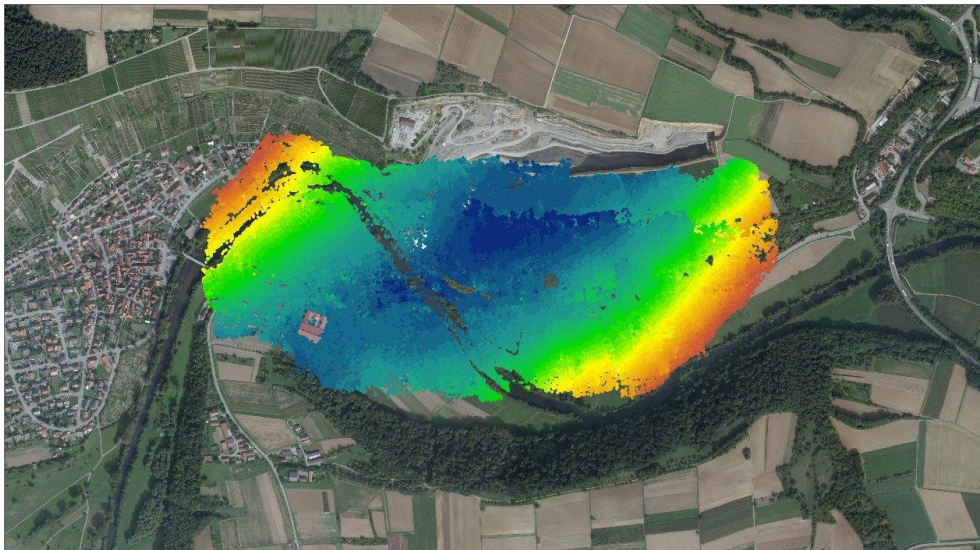
Die theoretische Genauigkeit (Std.Abw.) der Objektpunktbestimmung liegt im Bereich von einem Pixel für die Lagekoordinate, in der Vertikalkoordinate wird eine theoretische Genauigkeit im Bereich von 1.5 – 3 pix erreicht. Dieses deutet darauf hin, dass die Daten noch mit gewissen systematischen Effekten überlagert sind, die auch nicht durch die in der AT eingeführten 44 Zusatzparameter kompensierbar sind. Die entsprechenden Vektorplots zeigen die gemittelten Residuen im Bildraum an 25 x 25 Gitterpunkten in der Bildebene. Die maximalen Residuen sind vergleichbar, die Struktur des Vektorfeldes ist aber unterschiedlich. Für den Flug GSD 8 cm zeigt sich ein irreguläreres Bild, für den GSD 5 cm ist das Vektorfeld wesentlich regelmäßiger. Für den Fall GSD 8 cm wurde für den gesamten Block, der ja aus drei Einzelflügen zusammengesetzt ist, nur ein Satz von 44 Parametern eingeführt. Nach den Resultaten der Laborkalibrierung, wonach die Reproduzierbarkeit der Kalibrierung der Kamera nach Ein- und Ausschaltvorgängen nicht gewährleistet ist, hätten diese Zusatzparameter individuell für die Befliegung jedes Fluges angesetzt werden müssen. Die GSD 5 cm Befliegung besteht nur aus einem Flug, sodass das vorige Kriterium hier erfüllt wurde. Hinzu kommt, dass an den Bildern der GSD 5 cm Befliegung eine mittlere Verzeichnungskorrektur aus der Laborkalibrierung bereits angebracht wurde. Dennoch zeigen sich auch hier noch deutliche Restsystematiken, die durch eine Veränderung der Kamerageometrie während des Fluges verursacht sein könnten, u.U. verursacht durch den optischen Bildstabilisator.

Aufgrund der nur geringen Passpunktanzahl mussten alle verfügbaren Punkte als Passpunkte in den Ausgleichungen behandelt werden. Damit sind keine absoluten Genauigkeitsabschätzungen durch Vergleiche an Kontrollpunkten möglich. Stattdessen wurde das vorhandene Laser-DOM herangezogen, das im Rahmen der DGPF-Testbefliegungen als Referenzdatensatz erfasst und zur Verfügung gestellt wurde. Dieses DOM liegt mit einer Rasterweite von 25 cm mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern vor. Für die im Rahmen der Bündelausgleichung bestimmten Geländekoordinaten der Verknüpfungspunkte wurden die korrespondierenden Höhenwerte aus dem Laser-DOM interpoliert und dann die Differenzen statistisch analysiert. Eine farbkodierte Darstellung dieser Höhendifferenzen ist mit der Abb. 5 gegeben. Die Differenzen sind für die Punkte aus der GSD 8 cm und GSD 5 cm Befliegung gesondert dargestellt. Die Farbkodierung für beide Grafiken ist identisch.





Bildflug GSD 8 cm



Bildflug GSD 5 cm

**Abb. 5:** Vertikaldifferenzen der Verknüpfungspunkte durch Vergleich mit Laser-DOM.

Die Differenzen sind in ca. 30 gleichabständige Klassen der Weite von 20 cm eingeteilt. Die maximalen negativen Differenzen liegen in der Klasse  $d_{\text{Vertikal}} < -3.40$  m (braun-rot) die maximalen positiven Differenzen sind der Klasse  $d_{\text{Vertikal}} > 1.80$  m (dunkel-blau) zugewiesen. Die grünen Bereiche zeigen demnach diejenigen Bereiche, in denen die geringsten Differenzen auftreten.

Für den GSD 8 cm Flug treten auch größere Differenzen auf (max. Abweichung 51.8 m, min. Abweichung -55.4 m), die für die Abbildung aber der niedrigsten bzw. größten Klasse zugeschlagen wurden. Diese Differenzen lassen sich tlw. auf den Einfluss von Vegetation (Zuordnungen in Bäumen) oder tatsächliche Änderungen der Geländeoberfläche (Steinbruchbereich) zurückführen. Ein weiterer Grund können aber auch fehlerhaft bzw. ungenau zugeordnete Punkte sein, da bei der Match-AT Verknüpfungspunktmessung auch auf 2-Strahlpunkte zugegriffen wird, die für die Bundler-

Verknüpfungspunkte in der modifizierten Implementierung ausgeschlossen worden sind. Dieses wirkt sich vor allem auch für Zuordnungen in der Vegetation bzw. auf Gebäuden aus. Für die GSD 5 cm Auswertungen werden in diesen Bereichen keine Punkte zugeordnet, was auch in der Differenzpunktswolke zu sehen ist. Für das große landwirtschaftliche Gebäude und auch einzelne kleinere Baumgruppen innerhalb des Testgebiets können daher keine Höhendifferenzen berechnet werden.

Deutlich ist in beiden Blöcken eine systematische Aufwölbung im Bereich der Blockmitte zu sehen, was darauf hindeutet, dass trotz der durchgeführten Selbstkalibrierung nicht kompensierbare Systematiken in der Kamera verbleiben, die sich dann in dieser Aufwölbung niederschlagen. Dieses ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die nicht reproduzierbare und ggf. nicht stabile Kamerageometrie rückführbar, die sich schon in den vorigen Untersuchungen und der Laborkalibrierung gezeigt hat. Vor diesem Hintergrund führt auch eine a priori Korrektur von Verzeichnungswerten aus der Laborkalibrierung zu keiner Verbesserung der Auswertungen. Die maximalen Differenzen für den Block GSD 8 cm sind zwar größer (Std.Abw. 4.57 m, im Vergleich zu 0.75 m Std.Abw. GSD 5 cm), es handelt sich aber auch um den größeren Bildverband mit kleinerem Bildmaßstab.

Da für den GSD 5 cm Block sehr viel mehr Punkte zugeordnet wurden und somit eine quasi flächendeckende Kontrolle der Vertikalgenauigkeit möglich ist, erkennt man in der Differenzpunktswolke weitere Effekte, wie die deutlichen Höhengsprünge. Dieser Höhenversatz im nord-östlichen Bereich ist eindeutig den Flugstreifen zuzuordnen und kann durch unzureichende Verknüpfung zwischen den Streifen bzw. ungenauere Punktzuordnungen verursacht sein.

### 4.3 DOM-Generierung und Orthophoto

Basierend auf den Ergebnissen der AT war die weitere photogrammetrische Auswertung der erfassten Bilddaten mittels Standardsoftware problemlos möglich. Die DOM-Generierung durch MATCH-T war aufgrund der hohen Bildüberdeckung und der daraus resultierenden großen Redundanz trotz der relativ geringen radiometrischen Bildqualität gut möglich. Während sich die diskutierten systematischen Fehler der AT negativ auf die Absolutgenauigkeit des DOM auswirkten, konnte eine vergleichsweise gute Detailliertheit und Relativgenauigkeit erreicht werden. Dadurch war auch die Berechnung geometrisch korrekter Orthophotos gewährleistet. Die radiometrische Qualität der Orthophotos ist durch das relativ große Rauschen und die diskutierte Bewegungsunschärfe der zugrundeliegenden Bilder im Vergleich zu Daten großformatiger Luftbildkamerasysteme limitiert. Dennoch ist das Ergebnis visuell ansprechend und für viele Anwendungen absolut ausreichend (Haala et al., 2010).

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen der hier vorgestellten Auswertungen konnten elementare Schwachpunkte kommerzieller Kompaktkameras aufgezeigt werden, die für zukünftige Testflüge abgestellt werden müssen.

- Der limitierende Faktor ist die offensichtlich nicht stabile Kamerageometrie, die eine Vorabkalibrierung im Labor bzw. klassische Selbstkalibrierung nicht zulässt. Vor allem der optische Bildstabilisator spielt neben der veränderlichen Brennweite eine entscheidende Rolle. In entsprechenden Internet-Foren wird daher die mechanische Fixierung des Stabilisators empfohlen. Dieses soll auch für die Canon Ixus 100 durchgeführt werden. Alternativ wären Verfahren zur bildvarianten Kalibrierung denkbar (Luhmann, 2010).
- Die richtige Einstellung der Kamera ist entscheidend für die Bildqualität. Bei entsprechend kurzen Belichtungszeiten ist eine deutlich bessere Bildqualität zu erwarten. Zukünftig soll jedoch eine Kamera verwendet werden, die über größere CCD-Pixel verfügt, was sich positiv auf die radiometrische Qualität auswirkt.
- Die neu am Markt verfügbaren Systemkameras bieten die Möglichkeit ein kompaktes und damit leichtes Kameragehäuse mit professionellen Objektiven zu verbinden. Durch entsprechende Adapter können sogar klassische Festbrennweitenobjektive mit diesen Kameras kombiniert werden.
- Im Prinzip sind auch Industriekameras denkbar. Diese haben aber im Vergleich zu den Kompaktkameras den Nachteil, dass sie eine direkte Rechneranbindung zur Datenspeicherung und Stromversorgung benötigen, was das Bordsystem zusätzlich belastet. Hinzu kommt die i.d.R. deutlich geringere Pixelanzahl.

Trotz dieser Defizite und Probleme war es aber möglich die prinzipielle Machbarkeit und damit das Potenzial photogrammetrischer Auswertung von UAV-Daten nachzuweisen. Erneute Testbefliegungen mit einem modifizierten System sind für das Frühjahr 2012 geplant. Anhand dieser Auswertungen wird dann auch das Genauigkeitspotenzial nachweisbar sein.

### **Dank**

Die Autoren bedanken sich sehr herzlich bei Florian Weimer und Martin Trittler, beide Mitarbeiter am IFR, die mit ihrer Flugplattform nicht nur die Befliegungen ermöglicht haben, sondern bei Auswertung der empirischen Datensätze auch immer sehr unkompliziert und allseits kooperativ zur Seite standen. Des Weiteren bedanken wir uns herzlich bei den Studierenden Beatrice Appenzeller, Gesine Gleffe, Roman Hasert und Benedikt Leinss, die sich in unterschiedlichster Weise in die Vorbereitung und Durchführung der Flüge und Auswertung dieser Datensätze eingebracht haben. Ohne die Unterstützung dieser Personen wäre die Durchführung und Auswertung dieser Testflüge kaum möglich gewesen!

### **Literatur**

- ABDEL-WAHAB, M., WENZEL, K. & FRITSCH D. (2011): Reconstruction of Orientation and Geometry from large Unordered Datasets for Low Cost Applications. Proceedings LC3D Workshop, Berlin, Dezember 2011.
- BROWN, D., 1976: The bundle method – progress and prospects, – International Archives of Photogrammetry, 21(3), ISP congress, Helsinki, 1-33.
- CRAMER, M. (2010): The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation – Overview and Test Design, Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG). Heft 2(2010), pp. 75-84, online verfügbar unter <http://www.dgpf.de/neu/WWW-Projekt-Seite/PDF/01-PFG02-2010-Ueberblick-FinalVersion-20100112.pdf> (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- CRAMER, M. (2005): 10 Years ifp Test Site Vaihingen/Enz: An Independent Performance Study. Photogrammetric Week '05, Wichmann, Heidelberg, pp. 79-92, online verfügbar unter <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo05/120cramer.pdf> (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- FRASER, C. (1997): Digital camera self-calibration, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 52, Issue 4, August 1997, Pages 149–159.
- GRÜN, A. (1978): Accuracy, reliability and statistics in close-range photogrammetry, Inter-congress symposium, International Society for Photogrammetry, Com. V, Stockholm, Sweden.
- HAALA, N., CRAMER, M., WEIMER, F. & TRITTLER, M. (2011): Performance test on UAV-based photogrammetric data collection, Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), Zurich, Switzerland, September 14-16, 2011, online verfügbar unter [http://www.geometh.ethz.ch/uav\\_g/proceedings/haala](http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings/haala) (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- LOWE, D. (2004): Distinctive image features from scale-invariant keypoints, International Journal of Computer Vision. Vol. 60, No. 2, pp. 91-110.
- LUHMANN, T. (2010): Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission DGK, Reihe C, Heft 645, online verfügbar unter <http://dgk.badw.de/fileadmin/docs/c-645.pdf> (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- SIGLE, M., & HEUCHEL, T. (2001): MATCH-AT: Recent Developments and performance, Photogrammetric Week 01, Wichmann, Heidelberg, pp. 189-194. online verfügbar unter <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/Sigle.pdf> (letzter Zugriff am 27.01.2012).
- SNAVELY, N., SEITZ, S. & SZELISKI, R. (2007): Modeling the World from Internet Photo Collections. International Journal of Computer Vision, 2007.

WEIMER, F., TRITTLER, M., JOOS, A., GROS, M., POSCH, A. & FICHTER, W. (2010): FPGA-based onboard computer system for mini aerial vehicles. International Micro Air Vehicle Conference, Braunschweig, 2010.

Autorenhinweise:

Dr.-Ing. Michael Cramer, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie (ifp), 70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-685-84118, e-mail: [michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de](mailto:michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de).

Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie (ifp), 70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-685-83383, e-mail: [norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de](mailto:norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de).