

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)

Beiträge zum 156. DVW-Seminar am
9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart



Schriftenreihe des DVW
Band 86/2017

Wißner

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)

Beiträge zum 156. DVW-Seminar am
9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart

Redaktion:
Aiham Hassan

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e.V.



Schriftenreihe des DVW
Band 86
Wißner-Verlag

Herausgeber:
DVW – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement e. V.

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 86

Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

Die PDF enthält zur Navigation Lesezeichen und Hyperlinks.
Der Mausklick auf ein Lesezeichen führt zur ersten Seite des angewählten Beitrags.
Der Mausklick auf einen dunkelblau markierten Abbildungs- oder Tabellenverweis im Text führt zur verknüpften Abbildung oder Tabelle. Zurück zur ursprünglichen Stelle im Text gelangt man mit dem Klick auf den dunkelblau markierten Verweis in der Abbildungsunterschrift oder Tabellenüberschrift.
Webadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodesie.info.

Zitierhinweis:

[Vorname Nachname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe,
Band 86/2017, Wißner-Verlag, Augsburg, 2017, S. x-y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95786-107-8
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2017
www.geodesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover:
Institut für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart (IIGS)
Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart (IFP)

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede
Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen
bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlags.

Inhalt

Vorwort	5
---------	---

Session 1: Grundlagen

Norbert Haala Volker Schwieger	
UAV – Anforderungen und Möglichkeiten	9
Andreas Strohmayer	
Unmanned Aerial Systems – Auslegung, Einsatzbereiche und operative Rahmenbedingungen	27
Erwin V. Lauschner	
Deutsches Erprobungsgelände für UAS (DEU) – Chancen und Testmöglichkeiten	45

Session 2: Kalibrierung und Auswertung

Heinz-Jürgen Przybilla	
Kameras für UAS – Eine Marktübersicht	51
Michael Cramer Heinz-Jürgen Przybilla Henry Meißner Karsten Stebner	
Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme	67
Christoph Strecha	
Photogrammetrische Auswertung von Drohnen-Bildflügen	85

Session 3: Erfahrungen aus der Praxis

Oliver Schmechtig	
UAV in der Ingenieurvermessung – Anwendungen, Möglichkeiten und Erfahrungswerte aus der Praxis gesehen	95
Daniel Stier Mario Haupt	
UAV-Photogrammetrie: Von der Flugplanung zum fertigen 3D-Modell – Erkenntnisse und praktische Herausforderungen	111

Inhalt

Ulrich Völter
Aktuelle Photo Based Scanning Projekte aus dem Ingenieuralltag _____ 129

Session 4: Innovationen und Zukunft

Thomas Gaisecker | Ursula Riegl | Philipp Amon | Martin Pfennigbauer
RIEGL LiDAR-Lösungen für die UAV-basierte Vermessung _____ 135

Artyom Maxim | Otto Lerke | Marshall Prado | Moritz Dörstelmann |
Achim Menges | Volker Schwieger
UAV Guidance with Robotic Total Station for Architectural Fabrication
Processes _____ 145

Dieter Genschow
Anwendung von Radarsensoren in UAV _____ 163

Vorwort

Die Erfassung dreidimensionaler geometrischer Daten ist eine der Hauptaufgaben der Geodäsie, die von unbewegten oder kinematischen Plattformen aus geschehen kann. Seit einigen Jahren werden Unbemannte Flugsysteme (Unmanned Aerial Systems oder Vehicles, UAS oder UAV) als fliegende Plattformen eingesetzt. Sie beherrschen inzwischen die INTERGEO® und diesbezügliche Forschungen und Entwicklungen sind Themen wissenschaftlicher Tagungen. Wesentliche Vorteile der UAV für den Praktiker sind deren universelle Einsetzbarkeit und die kostengünstige Einstiegsmöglichkeit.

Mit diesem 156. DVW-Seminar „Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)“ wollen die Veranstalter das Thema praxisnah vermitteln. Neben Überblicksvorträgen und einem Beitrag zum Deutschen Erprobungsgelände für UAS fokussiert das Seminar auf den meistgenutzten Sensor zur 3D-Datenerfassung, die Kamera. Marktübersicht, Kalibrierung, photogrammetrische Auswertung mit und ohne Nutzung von Passpunkten sind dabei die Themen. Einen Schwerpunkt bilden Vorträge aus Ingenieurbüros, bei denen Praktiker einen Einblick in ihre Arbeit und hierdurch praxisrelevante Anregungen für die Seminarteilnehmer geben. Den Abschluss bildet ein Vortragsblock, der sich den im UAV-Bereich in der Entwicklung befindlichen Sensoren Laserscanner, Radar und Robot-Tachymeter widmet.

Besonders erwähnenswert ist, dass das Seminar nicht nur im Rahmen der GEODÄSIE-AKADEMIE realisiert wird, sondern fachlich neben dem DVW AK 3 „Messmethoden und Systeme“ und dem BILDUNGSWERK VDV FG 2 „Messverfahren“ auch von den DGPF AKs „Sensoren und Plattformen“ und „Optische 3D-Messtechnik“ gestaltet wird.

Wir hoffen, dass dem Seminar ein ähnlich großer Erfolg beschieden ist wie der letztyährigen teilnehmerstarken Veranstaltung an der Universität Bonn. Wir wünschen einen guten Verlauf, interessante Vorträge und Diskussionen sowie einen hohen Erkenntnisgewinn sowohl für die Praxis als auch für die Forschung und Entwicklung.

Volker Schwieger (Universität Stuttgart)

Uwe Sörgel (Universität Stuttgart)

Klaus Fritzensmeier (Leica Geosystems GmbH Vertrieb)

Norbert Haala (Universität Stuttgart)

Danilo Schneider (TU Dresden)

Session 1: Grundlagen

UAV – Anforderungen und Möglichkeiten

Norbert Haala | Volker Schwieger

1 Einführung

Unbemannte Fluggeräte (unmanned aerial vehicles/UAV) oder unbemannte Flugsysteme (unmanned aerial systems/UAS), auch mit dem Namen Drohnen bezeichnet, lassen sich aus verschiedenen Gründen nicht aus den täglichen Nachrichten verbannen. Ein typisches, leider negatives Beispiel ist der Beinahe-Zusammenstoß von Drohne und Marcel Hirscher beim Slalom 2015 in Madonna di Campiglio (Tagesschau 2015). Amazon bereitet dagegen aktiv die Zukunft vor und hat in diesem Jahr in Großbritannien eine Genehmigung für einen Feldversuch zur Auslieferung von Waren erhalten (Spiegel 2016). Diese Zusammenhänge haben jedoch, wenn überhaupt, nur in sehr geringem Maße eine Verbindung zur Geodäsie. Trotzdem ist es so, dass auf der INTERGEO® seit einigen Jahren die Anzahl der vorgestellten Flugsysteme ohne Piloten immer höhere Zahlen annimmt: anlässlich der diesjährigen INTERGEO® 2016 in Hamburg wurden mehr als 130 Aussteller identifiziert (TUM 2016), die UAVs vorgestellt haben. In diesem Beitrag soll implizit aufgezeigt werden, aus welchem Grunde der Einsatz von UAVs in der Geodäsie Schule gemacht hat und, aller Voraussicht nach, auch weiterhin machen wird. Die Autoren werden für typische Anwendungsbereiche der Geodäsie die Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit, Echtzeit und Objektausdehnung diskutieren, um anschließend auf die Charakteristika der UAVs einzugehen. Abschließend werden beide Abschnitte zusammengeführt, um den Lesern Anregungen für aktuelle und zukünftige Nutzungsmöglichkeiten dieser als Vermessungsinstrumente aufzufassenden Flugsysteme zu geben. Natürlich soll nicht unerwähnt bleiben, dass es für einige Anwendungen noch keine effizienten UAV-Einsatzszenarien gibt.

2 Anforderungen an die Geodäsie

2.1 Topographische Aufnahme und Kartenerstellung

Eine historisch gewachsene Aufgabe der Geodäsie ist die Kartierung der Landesfläche eines Staates. Diese sogenannte topographische Landesaufnahme stellt die Basis einer jeden Landesvermessung dar und begründet auch das Vorhandensein eines Festpunktfeldes. In der Regel war sie ursprünglich militärisch getrie-

ben. In Deutschland ist fast flächendeckend die Deutsche Grundkarte (DGK5) im Maßstab 1:5.000 vorhanden; die alternative Karte stellt das Messtischblatt, die Topographische Karte im Maßstab 1:25.000 (TK25) dar. Setzt man eine typische Kartiergenauigkeit von 0,2 mm voraus, so ergeben sich notwendige Erfassungsgenauigkeiten von 1 m beziehungsweise 5 m. Die abzuleitenden Karten benötigen selbstverständlich keine Echtzeit-Veröffentlichung. Die üblichen Aktualisierungsperiode der zuständigen Vermessungsbehörden von etwa fünf Jahren, entsprechen jedoch nicht mehr den aktuellen Bedürfnissen der Bevölkerung, trotzdem stellt eine zeitlich verzögerte Auswertung kein Problem dar.

Digitale Oberflächenmodelle (DOM) und daraus abgeleitete Digitale Geländemodelle (DGM) sind eine der wichtigsten Datengrundlagen für topographische Aufnahmen. Als Alternative zur flugzeuggestützen DOM-Aufnahme mittels LiDAR stehen Softwaresysteme für die automatisierte Stereoauswertung von Luftbildern schon seit mehr als 20 Jahren zur Verfügung. Dabei wurden insbesondere in den letzten Jahren große Fortschritte bei der geometrischen Erfassung komplexer 3D-Szenen aus großen Bildblöcken erzielt. Getrieben durch die Verfügbarkeit ausgereifter Digitaler Luftbildkameras und der Entwicklung leistungsfähiger Algorithmen im Bereich der Computer Vision wurden erhebliche Fortschritte bei der 3D-Datenerfassung aus Luftbildern bezüglich Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Auswertegeschwindigkeit und Auflösung erreicht. Softwaresysteme zur dichten Mehrbild-Stereozuordnung beinhalten Schritte wie die Bestimmung von Parallaxen- bzw. Entfernungsdaten sowie die Triangulierung, Filterung und Vermaschung von 3D-Punkten. Das Potenzial solcher dichten Bildzuordnungsverfahren für die DOM-Erfassung aus Standardluftbildaufnahmen wurde beispielsweise im Rahmen der ISPRS/EuroSDR Benchmark on High Density Aerial Image Matching (Haala 2014) diskutiert. Aktuelle Verfahren der dichten Mehrbildzuordnung erlauben eine Erzeugung von DOM mit der Rasterweite, die der Auflösung (ground sampling distance, GSD) der ursprünglichen Bilder entspricht, die Genauigkeit der 3D-Punktbestimmung und die Vertikalgenauigkeit des DOM liegen dabei ebenfalls in der Größenordnung der erfassten Bildauflösung.

Neben der kompletten Neuaufnahme der Landesfläche werden selbstverständlich auch einzelne Bereiche bei offensichtlichen Änderungen der Topographie oder der Nutzung neu aufgenommen. Für Neubaumaßnahmen werden lokale Planunterlagen bis hinunter zum Maßstab 1:50 gefordert. Die Genauigkeitsforderungen liegen unter Berücksichtigung der Kartiergenauigkeit bei maximal 1 cm.

2.2 Kataster

Eine Kernkompetenz des Geodäten stellt die Eigentumssicherung und damit das Kataster dar. Messverfahren, die dem Kataster zuzuordnen sind, werden als Liegenschaftsvermessungen bezeichnet und lassen sich in Katastervermessungen und Grenzfeststellungen unterteilen. Nach dem Vermessungsgesetz für Baden-Württemberg (VermG 2010) dienen Katastervermessungen der Fortführung des Liegenschaftskatasters. Insbesondere handelt es sich um die Festlegung neuer Flurstücksgrenzen und die Aufnahme neuer und veränderter Gebäude. Dagegen sind Grenzfeststellungen Vermessungen für die Übertragung der Festlegung von Flurstücksgrenzen im Liegenschaftskataster in die Örtlichkeit zur Abmarkung. Sie weisen damit den Charakter einer Absteckung auf, können aber auch zur Prüfung der Abmarkung auf Übereinstimmung mit der Festlegung im Liegenschaftskataster herangezogen werden. In Baden-Württemberg wird beispielsweise bei den Genauigkeitsanforderungen nach dem eingesetzten Instrumentarium unterschieden. Die Werte bewegen sich im Bereich zwischen einem Zentimeter Positionsstandardabweichung für RTK-GNSS und zwei Zentimetern für mit Kreuzscheibe und Bandmaß bestimmte Punkte (VwVLV 2012). Andere Bundesländer weisen zum Teil geringfügige Abweichungen hinsichtlich der Anforderungen an die Messungsgenauigkeit auf. Die Größenordnung ist jedoch sehr ähnlich. Besonderer Wert wird aufgrund der rechtlichen Verbindlichkeit der Messergebnisse auf die Kontrolle, zum Beispiel mittels Spannmaßen oder Doppelmessungen, derselben gelegt. Die Ergebnisse der Liegenschaftsvermessungen müssen für Grenzfeststellungen naturgemäß in Echtzeit vorliegen, dagegen können bei Katastervermessungen auch Post-Processing-Lösungen in Betracht gezogen werden. Die zu vermessende Fläche umfasst meist ein oder mehrere benachbarte Grundstücke, so dass in der Regel keine übermäßig großen Flächen zu erfassen sind.

2.3 Hoch- und Tiefbau

Die Kooperation mit dem Bauwesen stellt eine der Hauptbeschäftigung der Ingenieurgeodäsie dar. Immer wenn ein Bauwerk erstellt werden muss, ist es erforderlich Planunterlagen (vgl. Kap. 2.2) zu erstellen, Planungen per Absteckung in die Örtlichkeit zu übertragen, sowie Abschlussvermessungen durchzuführen (Kuhlmann et al. 2013). Im Prinzip ist die Ingenieurgeodäsie daher während des gesamten Bauprozesses, aber insbesondere während der Bauausführung aktiv (Möhlenbrink und Schwieger 2007). Im Zuge der Bauausführung sind, selbstverständlich in Echtzeit, Baumaschinen wie zum Beispiel Asphaltfertiger zu steuern (Beetz 2012). Die geplante und gemessene Geometrie stellt darüber hinausgehend die Basis und die Verknüpfungspunkte des Building Information

Modelling (BIM) dar (z. B. Borrmann und Koch 2013). Der Baufortschritt sollte dabei fortlaufend dokumentiert und kontrolliert werden. Dabei beziehen sich die Messungen in der Regel auf ein klar abgegrenztes Gebiet der Erdoberfläche. Die Ausdehnung der Baufläche variiert jedoch von Projekt zu Projekt sehr stark, man betrachte nur beispielweise ein Einfamilienhaus im Gegensatz zu einem Industriekomplex oder einer Autobahn. Die Ergebnisse der Messungen während der Bautätigkeit sind überwiegend in Echtzeit oder in Naher-Echtzeit zu erledigen. Vor- oder nachlaufende Vermessungen können dagegen auch mit zeitlicherer Verzögerung ausgewertet werden. Die Genauigkeitsanforderungen sind stark projektabhängig; als Orientierungsmaß seien die Toleranzen im Hochbau (DIN 2005) genannt, die für diesen Bereich einzuhalten sind. Beispielsweise ist für eine zu erstellende Wand mit einer Länge von 10 m im Rohbau eine Toleranz von 4 cm einzuhalten. Für diese kann nach Witte und Sparda (2015) bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % eine Messstandardabweichung von 0,8 cm grob abgeschätzt werden. Für Straßenbau gibt Beetz (2012) Anforderungen zwischen 5 mm und 2 cm für die Erfassung beziehungsweise Absteckung in der Höhe an; hinsichtlich Bauwerkspunkten im Straßenbau werden zum Teil Absteckstandardabweichungen von besser 2 mm gefordert (RAS-Verm 2001). Für den Eisenbahnbau sind bei der Festen Fahrbahn extrem hohe Genauigkeitsanforderungen unter 1 mm Standardabweichung gefordert (Möhlenbrink et al. 2002). Die müssen außerdem in Naher-Echtzeit erfüllt werden, da die Gleise nur vor der Aushärtung des Betons für sehr kurze Zeit endgültig ausrichtbar sind.

2.4 Landwirtschaft

Landwirtschaft und Geodäsie stehen gleichfalls in engem Zusammenhang. In Baden-Württemberg dokumentiert sich das bereits in der Zuordnung der Geodäsie zum Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz. Die ländliche Neuordnung ist dabei traditionell eine Hauptaufgabe des Geodäten. Hier übernimmt er neben der wesentlichen planenden Rolle natürlich auch die Aufgabe der Geometrie und Nutzungserfassung sowie der Absteckung neuer Grenzen, Gewässer und Wege (FlurbG 1976). Die Genauigkeitsforderungen entsprechen zum Teil den kadastral Anforderungen, da die Messergebnisse Eingang in den Liegenschaftsnachweis finden. Unabhängig von der ländlichen Neuordnung benötigt die Landwirtschaft Informationen zur Geometrie der Anbauflächen; dabei liegt ein Schwerpunkt natürlich auf der Größe der genutzten Fläche, aber in Hanglagen auch auf deren Exposition und Neigung. Die Fläche der agrarisch genutzten Grundstücke ist unter anderem für Zahlungen aus dem EU-Agrarfonds von Bedeutung. Darüber hinaus lassen sich Änderungen des Bewuchses und insbesondere das Wachstum der Nutzpflanzen bestimmen. In diesen Fällen werden häufig Verfahren der Fernerkundung eingesetzt. Aus

diesen Aufnahmen kann beispielsweise zukünftig der Düngemitteleinsatz zur Unterstützung des Wachstumsprozesses dosiert werden. All diese Aufgaben erfordern keine Echtzeitprozessierung. Abweichend hiervon ergibt sich eine weitere Aufgabe für Geodäten analog zur Baumaschinensteuerung, die Steuerung von Landwirtschaftlichen Maschinen. Die geforderte Echtzeit-Genauigkeit hängt für die Steuerung sehr deutlich von der Anwendung ab: die Düngung erfordert eine Positionsstandardabweichung von etwa 30 cm, wogegen für Säen, Pflanzen und Hacken bereits 2 cm notwendig sind (Böhrnsen 2009). Im Unterschied zum Bausektor ist die Höhe von geringerer Bedeutung.

2.5 Monitoring

Für den Ingenieurgeodäten ist die Planung, die Durchführung, die Auswertung und die Analyse und die Interpretation von Überwachungsmessungen, kurz das Monitoring, eine Hauptaufgabe. Die Autoren könnten diese Aufgabe auch dem Hoch- und Tiefbau zuordnen. Da aber zum einen auch Objekte wie Rutschhänge, die nicht dem Bauwesen zugeordnet werden können, überwacht werden und da zum anderen häufig eine höhere Messgenauigkeit als bei den Standardbauaufgaben erwartet wird, soll diese Applikation in diesem Abschnitt gesondert aufgeführt werden. Bei den zu überwachenden Objekten handelt es sich in der Regel um klar abgegrenzte Bereiche wie eine Brücke, eine Staumauer oder ein Rutschhang. Schwieriger wird die Festlegung von eindeutigen Überwachungsbereichen, wenn es sich zum Beispiel um Senkungsgebiete oder auch tektonische Platten handelt. Die notwendige Messgenauigkeit kann nach Pelzer (1988) aus den zu erwartenden Bewegungen und Deformationen sowie deren Änderungsraten abgeleitet werden. Für periodische Einflüsse ergeben sich bis zu 2 cm Bewegung für Talsperren (Britz et al. 2002). Bei Rutschungsvorgängen ergeben sich aperiodische Bewegungen zwischen 1 mm pro Jahr und mehreren Metern pro Sekunde im Katastrophenfall (Terzaghi 1959, Chatwin et al. 1994). Zur Aufdeckung sind offensichtlich zum Teil Standardabweichungen von Sub-Zentimetern bis hin zu Sub-Millimetern erforderlich. In den meisten Fällen sind Ergebnisse einer Deformationsanalyse nur im Postprocessing zu liefern. Sind allerdings die Überwachungsmessungen und deren Auswertung und Analyse in ein Frühwarnsystems oder ein Notfallsystem integriert, so sind Nahe-Echtzeit oder sogar Echtzeitergebnisse unverzichtbar (Kötter et al. 2006).

In engem Zusammenhang mit den klassischen Überwachungsmessungen steht die visuelle Inspektion von Bauwerken, beispielsweise Straßenoberflächen hinsichtlich Rissen (z.B. Al-Mistarehi und Schwieger 2016). Hier sind die Anforderungen meist nicht bezüglich der Genauigkeit, sondern in Bezug auf die korrekte Identifikation und Klassifikation der Risse sowie deren Verortung und deren geometrischer Parameter wie zum Beispiel Länge und Breite, definiert.

Eine weiterer Zusammenhang besteht zum sogenannten „Change Detection“ (Veränderungserfassung), die in der Regel größere Gebiete wie eine Stadt oder eine Region komplett erfasst. Hierbei wird entschieden, ob sich ein Teilbereich z. B. in der Höhe verändert hat (Stilla et al. 2014). Die Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit sind gering und können sich im dm-Bereich bewegen. Typische Anwendungen ergeben sich neben dem urbanen Bereich auch im Agrarsektor, zum Beispiel beim Erkennen von Nutzungsänderungen.

2.6 3D-Stadtmodelle

Anwendungen wie die Erfassung von Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) basieren häufig auf Luftbildern, die auch mittels UAV als traditionelle Bildblöcke



Abb. 1:
Farbige 3D-Punkt-
wolke aus UAV-
Befliegung

mit einer Blickrichtung senkrecht nach unten erfasst wurden. Bei einer entsprechend hohen Bildüberdeckung, beispielsweise von 80 % in Flugrichtung und 60 % quer zur Flugrichtung, stehen insbesondere in offenen Bereichen eine genügend große Anzahl möglicher Stereokonfigurationen zur Verfügung, die eine geometrische Erfassung in einer Auflösung und Genauigkeit ermöglicht, die der Auflösung der erfassten Bilder entspricht. Dadurch ist beispielsweise auch die geometrische Erfassung von Dachformen in einer Auflösung von wenigen Zentimetern möglich. Daneben stellen jedoch insbesondere die Fassaden der Gebäude einen wichtigen Bestandteil von Stadtmodellen dar. Um auch für solche Elemente Daten hoher Auflösung zu erzeugen, werden für die bildbasierte Erfassung von Oberflächengeometrie in dicht bebauten Stadtgebieten häufig Schrägaufnahmen genutzt. Diese können mittels UAV effektiv zur Verfügung gestellt werden. Ein Beispiel zur Auswertung solcher Daten insbesondere im Hinblick

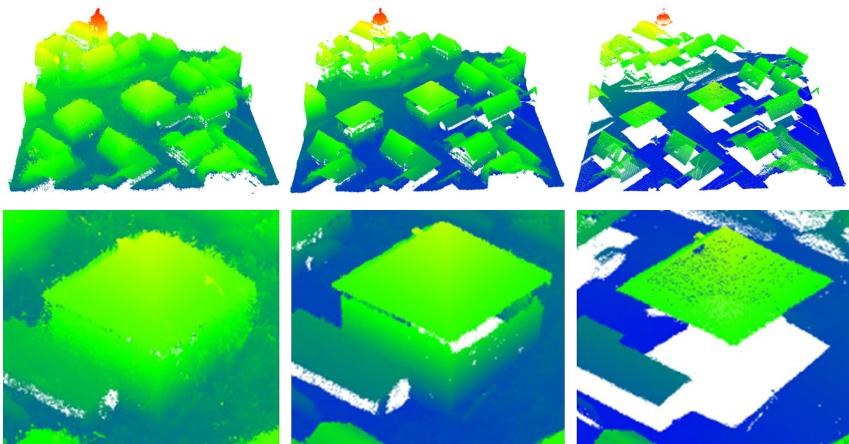


Abb. 2: Filtern von 3D-Punktwolken aus der Stereobildzuordnung für eine größere Szene (oben) und einem kleineren Ausschnitt (unten). Punktwolken aus Mehrfachzuordnungen (links) nach der Filterung mittels redundanter Strahlenschnitte (Mitte) und DSM-Rasterung (rechts)

auf die Filterung der dabei entstehenden 3D-Punktwolken diskutiert Rothermel et al. (2014).

Generell entsteht bei der Stereo-Zuordnung eines Bildes zu allen seinen Nachbarbildern eine sehr dichte 3D-Punktwolke. Diese kann, wie Abb. 1 am Beispiel der Auswertung von Aufnahmen eines UAV-Systems zeigt, zumindest in eingeschränktem Maße für die Visualisierung verwendet werden. Häufig ist jedoch eine Filterung notwendig, die in Abb. 2 für einen größeren (oben) und kleineren (unten) Bereich dargestellt sind. Wie die beiden Beispiele links in Abb. 2 zeigen, können mittels Stereozuordnung sehr dichte Punktwolken erzeugt werden. Diese sind jedoch insbesondere bei der Verwendung kostengünstiger Kameras, wie sie häufig bei UAV zum Einsatz kommen, relativ stark verrauscht. Dieses Rauschen kann jedoch durch die Ausnutzung redundanter Messungen erheblich reduziert werden.

Wie die mittleren Bildbeispiele in Abb. 2 zeigen, wird dadurch die geometrische Qualität der erfassten 3D-Punktwolke erheblich gesteigert. Das Ergebnis einer DOM-Rasterisierung als optionalen weiteren Auswerteschritt zeigt Abb. 2 (rechts). Dabei ist der Verlust an Information für die Gebäudefassaden durch die Ableitung des 2.5D-DOM-Rasters deutlich sichtbar. Demgegenüber liefert eine Vermischung der Punktwolke eine echte 3D-Repräsentation. Eine beispielhafte Auswertung für ein urbanes Gebiet mit dem in Rothermel et al. (2014) beschriebenen Verfahren zeigt Abb. 3. Dieses Verfahren liefert unter anderem klar definierte Gebäudekanten (grünes Rechteck) zudem werden kleine dreidimen-



Abb. 3:
Vermischte
3D-Punktwolke aus
dichter Mehrbild-
zuordnung für ein
urbanes Gebiet

sionale Details wie Stangen auf den Dächern (rote Kreise) erfolgreich rekonstruiert. Während die Auswertung dieser Daten auf Bildern in einer Auflösung von einigen Zentimetern beruhen, sind auch Befliegungen mit UAV mit einer Auflösung im Bereich von Sub-Zentimetern geeignet, wie sie unter anderem für die Datenerfassung im Bereich der Denkmalpflege angestrebt werden.

2.7 Denkmalpflege

Gegenstand der Denkmalpflege sind die Erfassung und Dokumentation von Baudenkmälern. Aktuelles Beispiel hierfür ist die virtuelle Rekonstruktion von antiken Bauwerken in Syrien, die in den letzten Jahren leider komplett zerstört wurden (Vincent und Coughenour 2016). Neben der zeichnerischen Erfassung spielen vor allem photogrammetrische Methoden und terrestrisches Laser-scanning eine entscheidende Rolle (Christofori 2007). Natürlich werden auch in Deutschland unterschiedliche Bauwerke, wie zum Beispiel Kirchen, mit den unterschiedlichsten dreidimensionalen Methoden (Pilhatsch et al. 2015) digital erfasst. UAV sind gut zur Befliegung solcher vertikalen Strukturen geeignet, die dann kreisförmig erfolgen kann. Eine solche UAV-basierte Datenerfassung der Domkirche St. Martin in Rottenburg (Wenzel et al. 2013) ist beispielhaft in Abb. 4 dargestellt. Ziel der Befliegung des 70 m hohen Turms war die Erstellung eines hochauflösenden Orthophotos, das zur Erstellung eines Schadensplans herangezogen wurde. Dargestellt sind die einzelnen Schritte von der Befliegung mit einem Oktokopter über die Bildorientierung, der Erzeugung der dichten Punktwolke und des Orthophotos bis hin zur Schadenskartierung.

Anwendungen im Bereich der Denkmalpflege profitieren insbesondere von der Möglichkeit einer im Prinzip pixelgenauen geometrischen Objekterfassung, die es bei einer entsprechenden Auflösung ermöglicht bis in den Bereich von Sub-Zentimetern vorzudringen. Die Anforderungen richten sich hier an eine

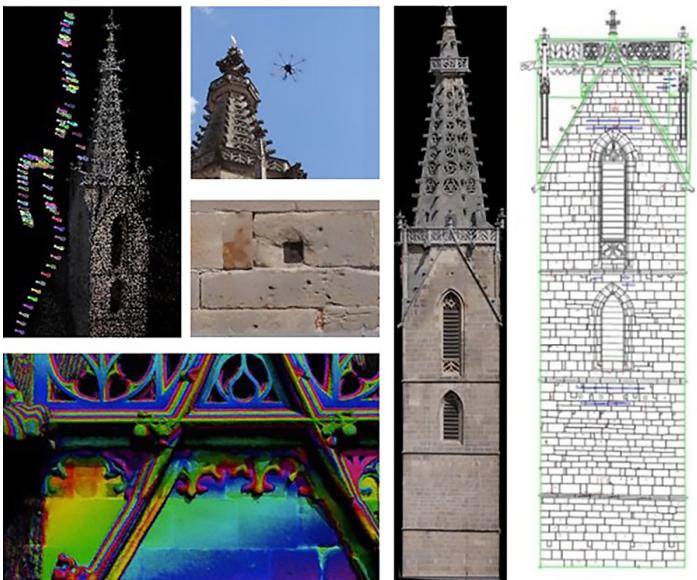


Abb. 4:
UAV-basierte
Datener-
fassung am
Beispiel der
Domkirche
Rottenburg

hohe Detailtreue und somit einer hohen Auflösung, um ein Denkmal exakt zu visualisieren. Eine explizite Genauigkeitsforderung kann nicht angegeben werden. Sie ist stark projektbezogen zu definieren.

Sollen Veränderungen erfasst werden, wenn zum Beispiel durch äußere Einflüsse geometrische Änderungen am Objekt auftreten, so besteht wiederum eine Verbindung zum [Kap. 2.5 Monitoring](#). Ein Beispiel sind hydro-thermisch induzierte Ablösungen bei Sandsteinmonumenten (Zheng et al. 2013). Die aufzunehmenden oder zu überwachenden Denkmale können sowohl innerhalb von Gebäuden als auch außerhalb derselben zu erfassen sein. Die Ergebnisse dürfen in der Regel Wochen nach der Datenerfassung zur Verfügung stehen; Echtzeit-Anforderungen bestehen hier folglich nicht.

3 Charakteristika von UAV

UAV werden in der Regel anhand von Charakteristika wie Gewicht, Reichweite, Flughöhe oder Anwendung eingeteilt. Die Regelanwendung zur Datenerfassung ist die Photogrammetrie, die üblicherweise UAV-Systeme nutzt beziehungsweise nutzen muss, die vergleichsweise klein, leicht, kostengünstig und einfach zu bedienen sind. Die Steuerung der Systeme kann manuell oder automatisch per Fernbedienung, aber auch autonom erfolgen, wobei teilweise auch eine Kombination dieser Verfahren erfolgt. In der Regel wird eine vordefinierte Trajektorie

mittels automatischer Steuerung beflogen. Dabei erfolgt die Navigation entlang vorgegebener Wegpunkte anhand vorprogrammierter Flugmanöver. Diese umfassen auch Start und Landung, wobei dies auch durch den Piloten übernommen werden kann. Dieser hat in einem solchen Szenario generell immer die Möglichkeit einer Intervention per Fernbedienung. Im Gegensatz dazu erfordern autonome Flüge zwingend die komplette Datenauswertungen an Bord des UAV und machen somit das Eingreifen von außen durch einen Piloten überflüssig. In der Regel müssen UAV für photogrammetrische Anwendungen jedoch unter Sichtflugbedingungen betrieben werden.

3.1 UAV-Komponenten

UAV-Systeme besitzen ein Bodenkontroll- und eine Flugsegment (van Blyenburgh 2016). Das Flugsegment besteht aus der Trägerplattform einschließlich

- der Avionik, deren Navigations- und Lenksysteme über Onboard-Prozessoren die Kontrolle und das Management des Fluges über den Autopiloten übernimmt,
- den Navigationssensoren wie GNSS, IMU, Barometer, Kompass und Navigationskamera, oder auch zielverfolgende Tachymeter,
- den Sensoren zur Datenerfassung, üblicherweise einer Kamera, wobei neben sichtbarem Licht optional auch Aufnahmen im NIR, thermal, multi-spektral, oder hyperspektral erfolgen kann, möglich sind aber auch Sensoren wie Laserscanner oder RADAR,
- dem Antriebssystem wie Motoren und dem Energiesystemen wie Batterien,
- der Telekommunikationseinheit zur Übertragung der Telemetriedaten, der Steuerungs- und Kontrollbefehle des UAV und anderer Information wie der Kamerabilder an die Bodenstation.

Diese Bodenstation besteht aus

- einer Telekommunikationseinheit zum Senden der Kontrollkommandos und Empfang der Telemetrie- und Bilddaten von dem Flugsegment,
- einem Kontrollsysteem zur Überwachung der Navigationskomponenten und des Ladezustands der Batterien,
- dem System für Planung, Management und Überwachung einschließlich der Anzeige des Flugpfades und seiner Elemente wie Wegpunkte und Fluglinien (dieses System dient häufig auch als Schnittstelle zum menschlichen Operateur),
- dem System zur Steuerung der Aufnahmesysteme beispielsweise durch Auslösung der Bildaufnahme.

3.2 UAV-Plattformen

Als Flugplattformen für UAV kommen sowohl Flächenflügler als auch mit mehreren Rotoren bestückte Multikopter zum Einsatz, möglich sind aber auch Paraglider oder Luftschiefe. Eine umfangreiche Übersicht gibt beispielsweise von Blyenburgh (2016). Flächenflügler bieten aufgrund ihrer vergleichsweise großen Flugdauer und Fluggeschwindigkeit eine höhere Reichweite. Sie ermöglichen zudem höhere Nutzlasten und sie fliegen selbst bei schwierigen Flugbedingungen wie starkem Wind relativ stabil. Damit ist ein wichtiges Anwendungsfeld von Flächenflüglern die flexible, aktuelle und hochauflösende Erfassung von Luftbildern in einer Standard-Blockkonfiguration für kleinräumige Gebiete. Be mannte Bildflüge mit klassischen Luftbildflugzeugen und großformatigen Kamerasystemen lassen sich aus Kostengründen für derartige Anwendungen kaum einsetzen. Diese Lücke kann durch UAVs sinnvoll geschlossen werden.

Ein solches Beispiel zeigt Abb. 5 für die UAV-Befliegung eines ca. $1.000 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ großen Gebietes, welches in einem klassischen photogrammetrischen Bildverband erfasst wurde und für das DOM-Genaugkeiten in der Größenordnung der erfassten Bildauflösung von 6 cm erreicht wurden (Cramer et al. 2013). Dazu wurden insgesamt fünf Längsstreifen und zwei Querstreifen mit hohen Überdeckungsverhältnissen von ca. 80 % innerhalb des Streifens und ca. 70 % zwischen benachbarten Streifen geplant. Diese hohe Überdeckung dient auch dazu, die für einen UAV-Flug relativ großen Abweichungen von der Flugplanung durch die große Bewegungsdynamik solcher Systeme aufzufangen. Vor allem bei geringeren Querüberdeckungen kann es sonst zu ungenügender Verknüpfung zwischen Nachbarstreifen kommen. Zudem ist die hohe Überlappung auch für die spätere DOM-Generierung hilfreich.

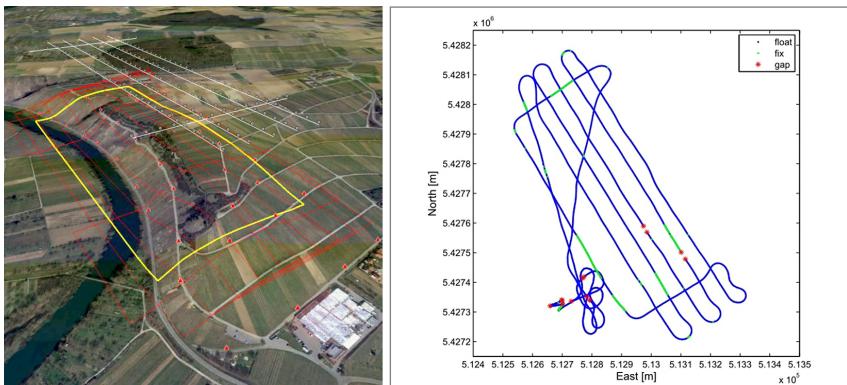


Abb. 5: Flugplanung und Streifenabdeckung für eine UAV-Befliegung durch Flächenflügler als klassischer photogrammetrischer Bildverband

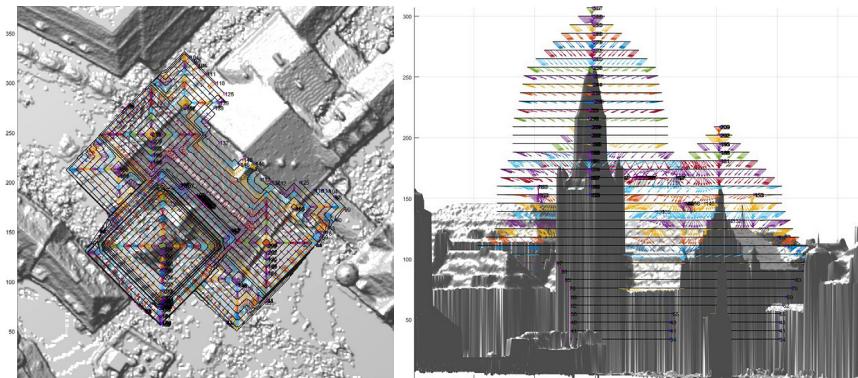


Abb. 6: Planung einer Flugtrajektorie für einen Multikopter mit Aufnahmestandpunkten und Blickrichtungen in einem dicht bebauten Gebiet

Multikopter ermöglichen einen senkrechten Steig- und Sinkflug, was neben platzsparenden Start- und Landemanövern insbesondere bei der Erfassung vertikaler Strukturen wie dem in Abb. 4 dargestellten Kirchturm von Vorteil ist. Hierbei kann die Befliegung dann kreisförmig erfolgen. Eine solche geplante Befliegung für die Datenerfassung in einem städtischen Bereich mit einer angestrebten Auflösung im Bereich von Sub-Zentimetern ist in Abb. 6 dargestellt.

Die große Manövriertauglichkeit und die bei Bedarf sehr langsame Fluggeschwindigkeit eines Kopters sind insbesondere für die Datenerfassung in engen begrenzten Umgebungen von Vorteil. Dies erleichtert auch die Kombination einer UAV-Bildaufnahme mit terrestrischen Bildern für die Erfassung eines virtuellen Modells, wie es in Abb. 7 dargestellt ist. Eine solche kombinierte terrestrische und UAV-basierte Erfassung nutzt Strecha et al. (2015) zur Erfassung

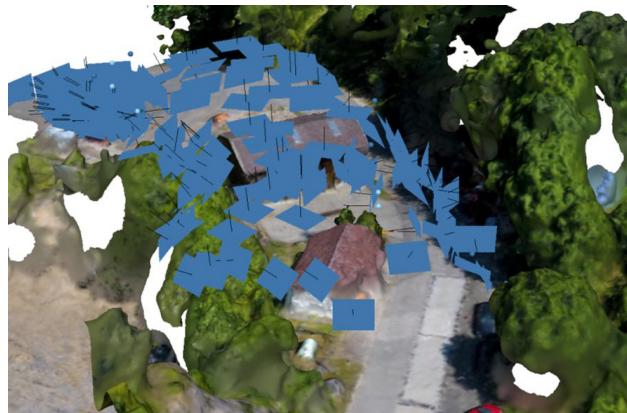


Abb. 7:
Kombinierte
terrestrische und
UAV-basierte
Bildaufnahme mit
einem Multikopter

von Schloss Chillon. Der dort durchgeführte Vergleich eines aus Bildern unterschiedlicher Kameras erzeugten photogrammetrischen 3D-Modells mit einer Punktwolke aus terrestrischem Laserscanning zeigt, dass die Genauigkeit der beiden Methoden vergleichbar ist, wobei der Aufwand für die reine Datenerfassung bei den bildbasierten Verfahren signifikant geringer ist.

4 Möglichkeiten

4.1 Aktuelle Einsatzbereiche und -möglichkeiten

Derzeit basieren vielen UAV-Projekte auf einer streifenweisen Befliegung, wie sie üblicherweise auch bei der Erfassung mit Standard-Luftbildkameras realisiert wird. Die auf Basis solcher Szenarien erfassten Geodaten entsprechen dabei häufig den mit traditionellen Befliegungen generierten Standardprodukten wie Orthophoto und Digitalem Oberflächenmodell. Die diesem Produktionsprozess zugrundeliegenden Verarbeitungsschritte des UAV-Bildblocks entsprechen damit den in traditioneller photogrammetrischer Software realisierten Schritten und machen nur geringe Modifikationen in existierenden Softwaresystemen erforderlich (Colomina und Molina 2014). Demgegenüber ist die Auswertung von UAV-Bildblöcken, die ähnlich zu einer terrestrischen Datenerfassung beflogen werden, eng mit der Entwicklung von Structure-from-Motion (SfM) Verfahren verbunden. Diese haben sich insbesondere im Bereich der Computer Vision zu einer Standardanwendung entwickelt (Schönberger und Frahm 2016) und werden dabei auch erfolgreich zur Auswertung von UAV-Daten genutzt. Dabei erfolgt zunächst eine Punktzuordnung anhand von Merkmalen, die beispielsweise durch den SIFT-Operator erzeugt werden. Nachdem die potenziellen gegenseitigen Überdeckungen der erfassten Bilder bestimmt sind, werden in einem zweiten Schritt die Koordinaten der Verknüpfungspunkte (structure) und die jeweiligen Kamerapose (motion) simultan geschätzt. Diese Optimierung beruht auf der bekannten Bündelblockausgleichung. Solche SfM-Verfahren sind in kommerziellen Softwarepaketen zur Auswertung von UAV-Bilddaten wie Agisoft Photoscan (Agisoft 2016) oder Pix4D (Pix4D 2016) realisiert, wobei derzeitige Verfahren die Ergebnisse für geodätische UAV-Auswertungen im Post-Processing und nicht in Echtzeit erreichen.

Nach Rose (2016) erreicht man im Katasterbereich beispielsweise für die Bestimmung von Aufnahmepunkten oder Gebäudeeinmessungen Koordinatenstandardabweichung von 3 cm mittels UAV; auch die Feststellung der tatsächlichen Nutzung ist möglich. Kersten (2016) stellt Ergebnisse für die Denkmalpflege vor und vergleicht sie mit terrestrischem Laserscanning. Dabei erreicht er zum Teil Abweichungen von unter 2,4 cm. Eine Vielzahl an ingenieurgeodätischen

Tab. 1: Aktuelle Anwendungsmöglichkeiten von UAVs

Anwendung	Flächenflügler	Multikopter	Bemerkung
Topographische Aufnahme	ja	z. T.	nur für Teilaufnahmen, z. T. auch zu genau
Kataster	z. T.	ja	Flächenflügler nur bei großen Flächen
Hoch- und Tiefbau	z. T.	ja	Flächenflügler bei lang-gestreckten Objekten
Landwirtschaft	ja	z. T.	Einsatz von Multi-spektralkameras
Monitoring	nein	ja	Genauigkeitsschranke vorhanden
3D-Stadtmodelle	ja	ja	Kombination mit anderen Messverfahren
Denkmalpflege	nein	ja	Genauigkeitsschranke vorhanden

Anwendungen werden beispielsweise von Fick (2016), Bertels (2016) und Burger et al. (2016) vorgestellt. Auch in diesem Tagungsband werden wieder eine Vielzahl an verschiedenen Anwendungen vorgestellt, insbesondere, aber nicht ausschließlich, hinsichtlich ingenieurgeodätischer Applikationen. Es sollen in diesem Abschnitt nicht alle möglichen Anwendungen aufgeführt werden, sondern in verkürzter und generalisierter Form dargestellt werden, für welche Anwendungen UAV zum aktuellen Zeitpunkt geeignet sind oder mit welchen Einschränkungen sie einsetzbar sind. Hierfür haben die Autoren die Tab. 1 aufgestellt, die anhand der Anwendungen des Kap. 2 und den beiden UAV-Plattformen „Flächenflügler“ und „Multikopter“, die in Kap. 3 erläutert sind, gegliedert ist. Vorab ist festzustellen, dass alle Echtzeitanwendungen wie Absteckungen und Maschinensteuerungen zurzeit im geodätischen Genauigkeitsniveau nicht möglich sind. Diese werden in Tab. 1 daher nicht berücksichtigt.

4.2 Zukünftige Entwicklungen und Einsatzmöglichkeiten

UAV setzen sich derzeit auf breiter Basis für die unterschiedlichsten Anwendungen in der Ingenieurvermessung durch. Das ist ein gutes Beispiel, wie Anwendungen von Entwicklungen in anderen Fachbereichen profitieren können – innerhalb kürzester Zeit stehen einfach zu bedienende, kostengünstige UAV-Plattformen zur Verfügung, die Auswertung großer, auch geometrisch komplexer Bildverbände wird möglich. Hinsichtlich zukünftiger Einsatzmöglichkeiten

ist ein Ziel insbesondere die weitere Steigerung der Genauigkeit, um beispielsweise hochgenaues Monitoring auch mit UAVs durchführen zu können. Dieses kann beispielsweise unter Nutzung metrischer Kameras erfolgen, die eine deutliche verbesserte Stabilität der Kalibrierwerte aufweisen.

Die Nutzung von Sensorik zur Datenerfassung und zur Trajektorienbestimmung hängt dabei auch von der rechtlich erlaubten Zuladung für die UAVs ab; würden hier die Grenzen erhöht, könnten schwerere, teurere und damit auch qualitativ hochwertigere Kameras oder auch Laserscanner verwendet werden. In diesem Beitrag wird hinsichtlich Datenerfassung von der Nutzung von Kameras ausgegangen, es zeichnet sich jedoch auch der Einsatz von Laserscannern (Gais-ecker et al. 2017) und Radar (Genschow 2017) ab, wobei sowohl Datenerfassung

Foto: A. Maxim, ICD & ILGS



Abb. 8:
Mutikopter im Anzeigebereich eines Tachymeters

als auch Kollisionsvermeidung das Ziel des Einbaus sein können. Innerhalb von Gebäuden kann das zielverfolgende Tachymeter eine erfolgversprechende Alternative darstellen (Abb. 8; Maxim et al. 2017), wenn es um die Bestimmung der geflogenen Trajektorie und der Steuerung des UAVs geht. Auch die Erstellung von dreidimensionalen Modellen und die Ableitung aller gewünschten Informationen wie z. B. Katastergrenzen oder signifikante Bauwerksdeformationen in Echtzeit auf Basis sogenannter SLAM-Algorithmen (Schöps et al. 2014) ist ein Ziel.

Literatur

Agisoft (2016): Agisoft PhotoScan, www.agisoft.com.

Al-Mistarehi, B.; Schwieger, V. (2016): Automatic Classification for Pavement Cracks for Mobile Mapping Data. FIG Working Week 2016, Christchurch, New Zealand, 02.– 06.05.2016.

- Beetz, A. (2012): Ein modulares Simulationskonzept zur Evaluierung von Positionssensoren sowie Filter- und Regelalgorithmen am Beispiel des automatisierten Straßenbaus. Bayerische Akademie der Wissenschaften, DGK, Reihe C, Nr. 688.
- Bertels, U. (2016): Bauwerksinspektion und Vermessungen mit dem Multikopter – Welche Ergebnisse sind möglich? In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Böhrnsen, A. (2009): Mit Spuranzeige fahren oder automatisch lenken. Profi 07/2009. www.profi.de, 2009, letzter Zugriff 5.1.2015.
- Borrmann, A.; Koch, C. (2013): Building Information Modeling – Durchgängige Planung, Realisierung und Bewirtschaftung auf Basis eines digitalen Gebäudemodells. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS 2013). DVW-Schriftenreihe, Band 72/2013, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Britz, U.; Eling, U.; Fahland, S. (2002): Statische und strukturmechanische Auswertungen von Überwachungsmessungen an Talsperren: In: Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- Burger, S.; Elflein, A.; Völter, U. (2016): Photo-based-scanning als Erweiterung des ingenieurgeodätischen Leistungsspektrums. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Christofori, E. (2007): Anwendungsberichte TLS in der Denkmalpflege. Technisch sinnvoll? Wirtschaftlich? In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2007 (TLS 2007). DVW-Schriftenreihe, Band 53/2007, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Chatwin, S. C.; Howes, D. E.; Schwab, J. B.; Swanston, D. N. (1994): A Guide for Management Landslide Prone Terrain in the Pacific Northwest. Land Management Handbook 18. Crown Publications Inc., Victoria, Canada.
- Colomina, I.; Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. (92), Elsevier B.V., Amsterdam.
- Cramer, M.; Haala, N.; Rothermel, M.; Leinss, B.; Fritsch, D. (2013): UAV@LGL – Pilotstudie zum Einsatz von UAV im Rahmen der Landesvermessung in Deutschland. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG). Heft 5, Schweizerbart, Stuttgart.
- DIN (2005): DIN 18202:2005-10, Toleranzen im Hochbau. Beuth Verlag, Berlin.
- Engel, J.; Schöps, T.; Cremers, D. (2014): LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM. European Conference on Computer Vision (ECCV), Springer, Berlin-Heidelberg-New York.
- Fick, S. (2016): 4 Jahre Erfahrung in der Drohnenvermessung. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg.
- FlurbG (1976): Flurbereinigungsgesetz Baden-Württemberg. 16.03.1976.
- Gaisecker, T.; Riegler, U.; Amon, P.; Pfennigbauer, M. (2017): Riegl LidAR-Lösungen für die UAV-basierte Vermessung. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86/2017, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).

- Genschow, D. (2017): Anwendung von Radar-Sensoren in UAV. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86/2017, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Haala, N. (2014): Dense Image Matching. Final Report, EuroSDR Official Publication №64. Ernst Becvar, Vienna, Austria.
- Kersten, T. (2016): Auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Kötter, T.; Friescke, F.; Schwieger, V.; Altan, O.; Müller, H. (2006): The Contribution of the Surveying Profession to Disaster Risk Management. Publication No. 38 of the FIG, Working Group 8.4, Frederiksberg, Dänemark.
- Kuhlmann, H.; Schwieger, V.; Wieser, A.; Niemeier, W. (2013): Ingenieurgeodäsie – Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2013, 138. Jahrgang. Wißner-Verlag, Augsburg.
- Maxim, A.; Lerke, O.; Prado, M.; Dörstelmann, M.; Menges, A.; Schwieger, V. (2017): UAV Guidance with Robotic Total Station for Architectural Fabrication Processes. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86/2017, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Möhlenbrink, W.; Kuhlmann, H.; Dünisch, M. (2002): Vermessung „Feste Fahrbahn“, Verfahren für die Vermessung der Bauart „Feste Fahrbahn“. In: Eisenbahn-Ingenieur-Kalender 2002, Tetzlaff-Verlag, Hamburg.
- Möhlenbrink, W.; Schwieger, V. (2007): Zur Prozessintegration der geodätischen Messtechnik. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 11–12, Wichmann Verlag im VDE VERLAG, Offenbach.
- Pelzer, H. (Red., 1988): Ingenieurvermessung – Deformationsmessungen, Massenberechnung. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- Pilhatsch, M.; Müller, F.; Riegel, K.; Effkemann, C. (2015): 3D-Laserscanning des Bonner Münster. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015). DVW-Schriftenreihe, Band 81/2015, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Pix4D (2016): Pix4D – Drone mapping software, <https://pix4d.com>, letzter Zugriff 19.01.2017.
- RAS-Verm (20001): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Vermessung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Verlag, Köln.
- Rose, A. (2016): Einsatz von UAV bei Katastervermessungen – ein Update. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Rothermel, M.; Bulatov, D.; Haala, N.; Wenzel, K. (2014): Fast and Robust Generation of Semantic Urban Terrain Models from UAV Video Streams. In: 22nd International Conference on Pattern Recognition. Stockholm.
- Schönberger, J.; Frahm, J.-M. (2016): Structure-from-Motion Revisited, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
- Spiegel (2016): Amazon lotet Paketlieferung per Drohne aus. Spiegel Online: www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/amazon-testet-paket-lieferung-per-drohne-in-grossbritannien-a-1104751.html, letzter Zugriff 9.12.2016.

- Stillà, U.; Tuttas, S.; Hebel, M. (2014): Change Detection of Urban Objects Using point Clouds. In: Karpik, A.; Schwieger, V.; Novitskaya, A.; Lerke, O. (Hrsg.): Proceedings on International Workshop on Integration of Point- and Area-wise Geodetic Monitoring for Structures and Natural Objects. SSGA, Novosibirsk, Russia.
- Strecha, C.; Zoller, R.; Rutishauser, S.; Brot, B.; Schneider-Zapp, K.; Chovancova, V.; Krull, M.; Glassey, L. (2015): Quality Assessment of 3d Reconstruction Using Fisheye and Perspective Sensors. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-3/W4, Copernicus Publications, Göttingen.
- Tagesschau (2015): Drohne verfehlt Ski-Star Hirscher – Haarscharf an der Katastrophe vorbei. Tagesschau.de: www.tagesschau.de/ausland/drohne-hirscher-101.html, letzter Zugriff 9.12.2016.
- Terzaghi, K. (1950): Mechanism of Landslides. Engineering Geology Volume. Geological Society of America, New York.
- TUM (2016): Wissenschaftliche Mitarbeiter und Studierende der TU München: Trennanalyse INTERGEO® 2016. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2016, 141. Jahrgang, Wißner-Verlag, Augsburg.
- van Blyenburgh, P. (2016): RPAS – Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective. Blyenburgh and Co, Paris, France.
- VermG (2010): Vermessungsgesetz für Baden-Württemberg. 30.11.2010.
- Vincent, M.; Coughenour, C. (2016): REKREI, Project Mosul. www.ifp.uni-stuttgart.de/forschung/Photogrammetry_ComputerVision/Rekrei/index.en.html, letzter Zugriff 12.12.2016.
- VwVfV (2012): Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz für die Durchführung von Liegenschaftsvermessungen. 5.12.2012.
- Wenzel, K.; Rothermel, M.; Fritsch, D.; Haala, N. (2013): Image Acquisition and Model Selection for Multi-View Stereo. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W1, Copernicus Publications, Göttingen.
- Witte, B.; Sparda, P. (2015): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. Wichmann Verlag, Offenbach.
- Zheng, B.; Schwieger, V.; Grassegger-Schön, G. (2013): Detection of hydrothermal deformations of sandstone using laser scanning. 2nd Joint Symposium on Deformation Monitoring, Nottingham, UK, 09.–10.09.2013.

Kontakt

Norbert Haala
Universität Stuttgart, Institut für Photogrammerie
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

Volker Schwieger
Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
volker.schwieger@ingeo.uni-stuttgart.de

Unmanned Aerial Systems – Auslegung, Einsatzbereiche und operative Rahmenbedingungen

Andreas Strohmayer

1 Einführung

Mit großem gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Potential eröffnen „Unmanned Aerial Systems“ (UAS) heute kontinuierlich neue Einsatzfelder und Geschäftsmodelle. Aus der Sicht des Luftfahrtgenieurs werden die wesentlichen Aspekte der Auslegung eines UAS erläutert und – eng verbunden mit der gewählten Konfiguration des Fluggeräts – vielversprechende Anwendungen vorgestellt. Abschließend wird auf die Versuche des Gesetzgebers eingegangen, angesichts einer stark zunehmenden Zahl an UAS-Flugbewegungen weiterhin einen sicheren Flugbetrieb für alle Teilnehmer im Luftverkehr sicherzustellen.

Während der weit verbreitete Begriff „Unmanned Aircraft Vehicle“ (UAV) – oder auch der häufig verwendete Begriff „Drohne“ – den Schwerpunkt auf das Fluggerät selbst legt, trägt der Begriff „UAS“ dem Systemgedanken Rechnung und umfasst neben dem Fluggerät auch die Kontrollstation und den Datenlink für Steuerung und Informationsübertragung.

Lange Zeit einer militärischen Verwendung vorbehalten sind UAS heute in zivilen Anwendungen mit großen Wachstumsraten auf dem Vormarsch. Miniaturisierung und Massenproduktion von Komponenten wie Platinen, Steuerungselementen und Energiespeichern insbesondere auch in Asien ermöglicht die Herstellung in einem Kostenrahmen, der UAS heute auch für zivile Nutzer bis hin zu Hobbypiloten erschwinglich macht. So entstehen aus der technologischen Machbarkeit ständig neue Ideen für Anwendungen und Einsatzszenarien.

Im Gegensatz zur klassischen Flugzeugentwicklung kommen die Ideengeber für neue UAS häufig aus dem Kreis der Anwender und sind keine ausgebildeten Luftfahrttechniker. Dies „beflügelt“ zwar einerseits sichtlich die Kreativität der Entwickler, andererseits werden aber auch Luftfahrtstandards in Entwicklung und Konstruktion sowie die vorausschauende Berücksichtigung möglicher Zulassungsrichtlinien schlichtweg ignoriert. Dieses Vorgehen mag kurzfristig der schnellen Vermarktung einer Idee dienlich sein, langfristig werden aber auch in diesem Sektor Zulassungsstandards zu berücksichtigen sein, nicht zuletzt, um die Lufttüchtigkeit der Fluggeräte sicherzustellen.

Nach (Bruno 2016) beträgt der Marktwert für zivile UAS laut einer Teal-Studie im Jahr 2016 2,6 Mrd. Dollar, für das Jahr 2025 soll er auf 10,9 Mrd. Dollar anwachsen. Im selben Bericht wird eine PwC-Studie vorgestellt, die den potentiellen Markt für UAS-Anwendungen in verschiedenen Industrie-sektoren für das Jahr 2015 bereits auf über 127 Mrd. Dollar schätzt. Die wesentlichen Sektoren zeigt dabei Abb. 1.

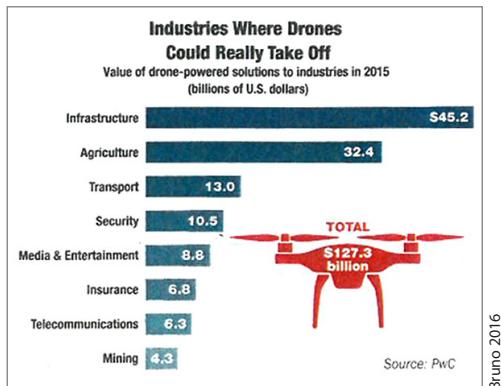


Abb. 1: Potentieller Markt für UAS im Jahr 2015
[Mrd. US-Dollar]

Bruno 2016

Dieses enorme Marktwachstum geht einher mit einer explosionsartigen Zunahme der unbemannten Flugbewegungen im Privatbereich und in zivilen Anwendungen, zusätzlich zum gleichermaßen stark wachsenden Einsatz von UAS im militärischen Bereich. Dieser „Überfüllung“ des Luftraums muss mit neuen Regelungen und gegebenenfalls mit einer neuen Luftraumstruktur Rechnung getragen werden, um Sicherheit für den Luftverkehr und auch am Boden weiterhin zu gewährleisten.

2 Auslegung eines Unbemannten Fluggeräts

Je nach Aufgabe und Einsatzumgebung kommen für die Auslegung eines neuen UAS verschiedene Konfigurationen in Frage, welche die klar formulierten und in einem Pflichtenheft zusammengestellten Anforderungen mehr oder weniger gut erfüllen können. Diese Anforderungen werden entweder vom Kunden formuliert oder aber sie ergeben sich aus einer Analyse konkurrierender Modelle im UAS-Markt. Wesentliche Anforderungsparameter sind:

- Nutzlast
 - Masse
 - Geometrie
 - Energiebedarf
- Flugzeit
- Flugprofil
 - Start & Landung (Startstrecke, Senkrechtstart & -landung)
 - Schwebeflug
 - Anflugstrecken
 - Missionsstrecken

- Geschwindigkeit
- Einsatzumgebung
 - Temperaturbereich
 - Staub
 - Feuchtigkeit
 - Lärmanforderungen

Im Folgenden werden zunächst die grundsätzlichen Konfigurationstypen vorgestellt, anschließend wird darauf eingegangen, welche Anforderungsparameter den Entwurf in der Auslegung entscheidend bestimmen. Gängige Möglichkeiten der Nutzlastintegration werden vorgestellt, bevor ein kurzer Einblick in die Fertigungsaspekte von UAS die „konstruktive“ Betrachtung abschließt.

2.1 Konfigurationen

Angesichts der bereits angesprochenen großen Kreativität der „UAS-Community“ ist eine verbindliche, detaillierte Einteilung aller heute anzutreffenden Konfigurationen ein schwieriges Unterfangen. Aus diesem Grund wird hier nur eine Einteilung anhand der Auftriebserzeugung als wesentlichem Konfigurationsmerkmal vorgenommen. Damit lassen sich UAS in Starrflügelsysteme, also Flächenflugzeuge, und Drehflügelsysteme, also Fluggeräte mit Senkrechtstart- und -landefähigkeit einteilen. Letztere werden als „Vertical Take-off & Landing“-Systeme (VTOL) bezeichnet und können wiederum in Helikopter und Multikopter unterteilt werden.

2.1.1 Flächenflugzeug

Bei Starrflügel-UAV (Abb. 2) wird der Auftrieb von aerodynamischen Flächen erzeugt, typischerweise von einem Tragflügel. Verantwortlich für den Vortrieb ist das Antriebssystem, das über Propeller Antriebsleistung bzw. in selteneren Fällen über kleine Strahltriebwerke eine Schubkraft generiert. Die Wellenleistung für die bei UAV weit verbreitete Propellerlösung kann von einer Reihe von Antrieben kommen:

- Verbrennungskraftmaschine (Kolbenmotor, Diesel),
- Propellerturbine,
- Elektromotor mit verschiedenen Stromquellen (Batterie, Hybridantrieb, Brennstoffzelle, Solargenerator).

Flächenflugzeuge haben im Vergleich zu Drehflüglern eine hohe Zuladungskapazität und können sehr hohe Geschwindigkeiten und große Reichweiten bzw. Flugzeiten erreichen. Auch können sie im Regelfall vergleichsweise wirt-

schaftlich betrieben werden. Ein Nachteil von konventionellen Flächenflugzeugen ist die eingeschränkte Manövriertbarkeit, die mit einem minimal erforderlichen Kurvenradius insbesondere in stark bebauten Gebieten Probleme bereiten kann.



Abb. 2: Starrflügel-UAS „Vela“ des IFB zur Erprobung einer unkonventionellen „Blended-Wing-Body“-Konfiguration

Konventionelle Flächenflugzeuge sind auf Start- und Landebahnen beschränkt, es gibt jedoch auch UAS, welche mittels Kippflügel oder schwenkbaren Antrieben die Vorteile des Starrflüglers mit den VTOL-Fähigkeiten eines Drehflügelsystems kombinieren. Dies geht häufig zu Lasten der Zuladung und Effizienz im Schwebeflug, es können aber weiterhin hohe Fluggeschwindigkeiten und große Reichweiten erreicht werden.

2.1.2 Helikopter

Helikopter (Abb. 3) generieren Auftrieb mit einem Rotor, der im Vergleich zu Propellern eine relativ geringe Kreisflächenbelastung aufweist. Dieser Rotor erzeugt mit zyklischer Blattverstellung gleichzeitig auch den Vortrieb des Fluggeräts und kann bei Motorausfall durch das Prinzip der „Autorotation“ eine sichere Landung gewährleisten.

Ein mechanisch angetriebener Rotor erzeugt ein Drehmoment, das den Helikopter entgegen der Rotorrichtung drehen will und dem mit geeigneten Maßnahmen wie z.B. einem Heckrotor entgegengewirkt werden muss. Alternativ können zwei gegenläufige Rotoren in Koaxial-, Tandem-, oder „Intermeshing“-Anordnung momentenfrei am Fluggerät angebracht werden.



Abb. 3:
Helikopter-UAS
„Ampair“ des IFB
bei der Vermessung
des Windfeldes vor
einer Windkraft-
anlage

Helikopter sind sehr manövrierfähig und können im Gegensatz zum Flächenflugzeug im Schwebeflug eine feste Position halten. Die benötigte Antriebsleistung im Schwebeflug P_0 bestimmt sich in idealer Betrachtung als Funktion des Abfluggewichts G und der Rotorfläche S – bzw. der daraus abgeleiteten Kreisflächenbelastung G/S – und der Luftdichte ρ als Funktion der Flughöhe (nach Bittner 2009):

$$P_0 = G \cdot \sqrt{\frac{1}{2\rho} \cdot \frac{G}{S}}. \quad (1)$$

Die Effizienz eines Drehflügels steigt also mit seinem Durchmesser. Ein Nachteil des Helikopters ist allerdings die Strahlbeaufschlagung der unter dem Rotor liegenden Komponenten des Fluggeräts, die vor allem im Schwebeflug Abtrieb erzeugt. Damit wird in realer Betrachtung eine etwas größere Antriebsleistung erforderlich, als mit Gl. 1 berechnet.

2.1.3 Multikopter

Multikopter-UAV haben mindestens drei Rotoren („Tricopter“), üblicherweise aber eine gerade Anzahl von Rotoren („Quad-“, „Hexa-“, „Octocopter“, ...), wobei eine Hälfte im Uhrzeigersinn dreht und die andere Hälfte gegenläufig installiert wird (vgl. Abb. 4). Im Gegensatz zum Helikopter können bei einem Multikopter die Drehmomente, die die Rotoren auf die Struktur ausüben, durch

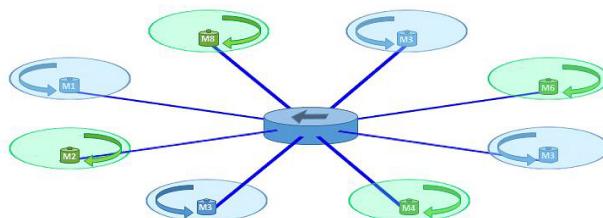


Abb. 4:
Schema der
Ansteuerung eines
Octocopters in fla-
cher Ausführung

die gegenläufigen Motoren ausgeglichen und darüber hinaus als Stellgröße zur Giersteuerung eingesetzt werden. Auch beschränken sich die Verluste durch Strahlbeaufschlagung auf die Arme der Rotorträgers und fallen damit im Regelfall geringer aus als bei einem Helikopter.

Alternativ zur Anordnung aller Rotoren in einer Ebene („flache“ Anordnung) können die Rotoren paarweise koaxial angeordnet werden („Koaxialanordnung“). Mit dieser in Abb. 5 dargestellten Anordnung können bei Bedarf die Außenabmessungen des UAV verringert werden (Reiser 2016).

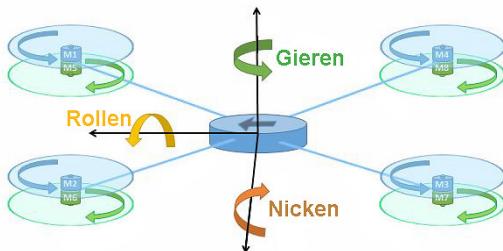


Abb. 5:

Schema der Ansteuerung eines Octocopters in koaxialer Ausführung

Die Steuerung des Multikopters erfolgt über verschiedene Drehzahlen der einzelnen Motoren, die Rotoren selbst sind im Gegensatz zur Blattverstellung beim Helikopter starr ausgeführt. Das Steuerungssystem besteht damit aus wenigen Teilen und kann sehr einfach umgesetzt werden. Um die Rotoren vor Fremdbberührung (z. B. Gebäude oder Menschen) zu schützen wird an den Enden der Rotorträger häufig ein Rotorschutz, z. B. in Form eines einfachen Bügels bis hin zu kompletten Einhausungen des Rotors angebracht.

Grundsätzlich steigt mit der Anzahl der Rotoren die Ausfallsicherheit des Gesamtsystems, da der Ausfall eines Rotors durch redundante Rotoren kompensiert werden kann. Dagegen ist aber zu beachten, dass die Wahrscheinlichkeit eines Rotorausfalls während eines Fluges mit der Anzahl der Rotoren ansteigt (Gundlach 2016). Im Gegensatz zum Helikopter haben Multikopter starre Rotoren, eine Autorotation im Fall eines Motorausfalls ist damit nicht möglich. Stattdessen wird Ausfallsicherheit mittels Redundanz von Antrieb und Stromversorgung erreicht. Die Steuerung erkennt dabei den Ausfall einer Komponente und verteilt die Steuereingaben auf die verbleibenden Antriebseinheiten. Damit wird eine sichere Landung ermöglicht, bei einer ausreichend großen Anzahl an Antrieben kann die Mission – mit verminderter Flugdauer – fortgeführt werden.

2.2 Auslegungsgrößen

Für die Auslegung eines Flächenflugzeugs gibt es eine Reihe von Anforderungen für die einzelnen Missionsabschnitte wie Start, Horizontalflug und Landung. Dominierend für UAS ist die Auslegung für den Horizontalflug, also den schnellen Anflug zum Einsatzgebiet und ggf. den Langsamflug während der Datenaufnahme. Für die erforderliche „Leistungsbelastung“ P/G_0 , also das Verhältnis der erforderlichen Leistung zum Abfluggewicht gilt:

$$\frac{P}{G_0} = \frac{\nu_{Cr}}{\eta_p} \frac{P}{P_{Cr}} \left(\frac{C_{W0} \cdot q_{Cr}}{(G_0/S)} + \frac{(G_0/S)}{q_{Cr} \cdot k} \left(\frac{G_{Cr}}{G_0} \right)^2 \right). \quad (2)$$

Analog zur Kreisflächenbelastung beim Drehflügler (Gl. 1) spielt beim Flächenflugzeug also die Flächenbelastung G_0/S , d. h. das Gewicht pro Flügelfläche eine entscheidende Rolle. Die Geschwindigkeit v_{Cr} geht sowohl direkt, als auch über den Staudruck $q_{Cr} = \frac{1}{2} \rho v_{Cr}^2$ in den Leistungsbedarf ein. Günstig für den Leistungsbedarf wirken sich auch ein hoher Antriebswirkungsgrad η_p und eine geeignete Wahl der Flügelparameter aus, die im Faktor k zusammengefasst wird. Der „schädliche Widerstand“ dagegen erhöht über den Beiwert c_{W0} naturgemäß den Leistungsbedarf. Mit dem Faktor G_{Cr}/G_0 wird für Verbrennungskraftmotoren der Gewichtsabnahme durch Kraftstoffverbrauch Rechnung getragen. Für batteriebetriebene Starrflügler entfällt dieser positive Effekt, da das Batteriegewicht während der Mission konstant bleibt.

Eine wichtige Zielgröße für die Auslegung eines UAS ist die Flugdauer T , die sich abgeleitet von der „Breguet'schen Reichweitenformel“ für Fluggeräte mit Verbrennungsmotor nach Gl. 3 bestimmen lässt:

$$T_{Kr} = \frac{\eta}{\nu} \cdot \frac{A}{W} \cdot \frac{E_{s,Kr}}{g} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - m_{Kr}/m_0} \right). \quad (3)$$

Für batteriebetriebene Fluggeräte ändert sich diese Gleichung zu:

$$T_{Bat} = \frac{\eta}{\nu} \cdot \frac{A}{W} \cdot \frac{E_{s,Bat}}{g} \cdot \frac{m_{Bat}}{m_0}. \quad (4)$$

Der Wirkungsgrad η umfasst hier den Vortriebswirkungsgrad des Propellers, den Integrationswirkungsgrad des Antriebssystems und den Wirkungsgrad des Verbrennungs- bzw. Elektromotors. Diese Wirkungsgradkette fällt für batteriebetriebene Fluggeräte insbesondere wegen des deutlich höheren Motorwirkungsgrad positiv aus. Allerdings ist mit heutigem Stand der Technologie die spezifische Energiedichte E_s für fossile Kraftstoffe etwa um den Faktor 50 höher als die von Batterien. Die erforderliche Masse der mitzuführenden Batterien ist damit der begrenzende Auslegungsfaktor für elektrisch betriebene UAV. Unabhängig vom Antriebskonzept ist das Verhältnis Auftrieb zu Widerstand A/W ein Maß für die aerodynamische Güte des UAV, eine widerstandsarme Auslegung erhöht also direkt die mögliche Einsatzdauer.

Im Gegensatz zum Flächenflugzeug erzeugen Multikopter, abgesehen von den an den Rotoren entstehenden Verlusten, keinen aerodynamisch bedingten Widerstand. Bei translatorischen Flugbewegungen dominiert der schädliche Widerstand, insbesondere da die Strukturkomponenten nur selten aerodynamisch verkleidet sind. Dies liegt daran, dass Multikopter nicht primär für den translatorischen Flug ausgelegt werden und dort auch nicht effizient zu betreiben sind. Vielmehr stehen beim Entwurf eines Multikopters eine sinnvolle Auslegung der

Kombination von Regler, Motoren und Rotoren im Mittelpunkt. Hier gelten, wie bei einem konventionellen Hubschrauber, die gleichen physikalischen Grundlagen im Hinblick auf Kreisflächenbelastung, Drehzahlen und Blattprofilierung.

2.3 Nutzlastintegration

Je nach Mission kann die Nutzlast eines UAS stark in Geometrie, Masse, Leistungsbedarf und Integrationsanforderungen variieren. Insbesondere bei Einsatz elektromagnetischer Wellen ist dabei auf elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) der Nutzlast mit den UAS-Komponenten zu achten, um Steuerbarkeit und Flugsicherheit nicht zu gefährden.

Das UAV dient der Nutzlast wie z.B. Kameras, Sensoren oder Paketen als Plattform, die keine eigene Funktion hat und unter Umständen aus Schwerpunktsgründen ohne Nutzlast sogar nicht flugfähig sein kann. Die Integration der Nutzlast in ein UAV kann rein zweckgebunden erfolgen, das UAS ist in diesem Fall speziell auf eine Mission ausgelegt und bleibt auf diese beschränkt. Alternativ kann die Auslegung multifunktional erfolgen, die Plattform kann dabei eine Reihe verschiedener Nutzlasten tragen.

Häufig werden Kameras oder Sensoren in einem „Gimbal“, also in einer kardanisch gelagerten Aufhängung installiert. Die Nutzlast kann damit dreidimensional bewegt und auf ein Ziel ausgerichtet werden. Bewegt von Elektromotoren und verbunden mit Trägheitsnavigationssensoren kann so z.B. eine Kamera auf der Basis von Sensor- und Lagedaten in einer definierten Position gehalten werden. Weniger aufwendig ist die Nutzlastintegration in einfachen Nutzlastbehältern, sogenannten „Pods“.

Neben einer ausreichenden Energie- und Datenversorgung und Berücksichtigung von EMV ist bei der Integration einer Nutzlast der Schwerpunkt des Gesamtsystems zu beachten, um Stabilität und Manövriertfähigkeit sicherzustellen. Auch die Zugänglichkeit aller System- und Nutzlastkomponenten im Rahmen der Inbetriebnahme und Wartung ist ein wesentlicher Integrationsaspekt.

2.4 Fertigung

Im Regelfall liefert der UAS-Hersteller das integrierte Gesamtsystem an den Endanwender aus. Das auszuliefernde UAS besteht dabei aus

- dem Fluggerät und seiner Struktur,
- der Bodenstation,
- den Systemkomponenten der Datenverbindung,
- der Nutzlast und
- zusätzlicher Ausrüstung (z. B. Startrampe, Wartungsausrüstung, ...).

Der Hersteller des UAS muss für jede dieser Komponenten entscheiden, ob er sie selbst entwickelt, oder ob er auf spezialisierte Zulieferer zurückgreift. Im Idealfall können Standardkomponenten („Off the Shelf“ (OTS)) bezogen werden, häufig werden solche OTS-Komponenten – bis hin zum Fluggerät selbst – vom UAS-Hersteller für die speziellen Missionsanforderungen modifiziert.

Die Entscheidung für einen Eigenbau wird von der Verfügbarkeit geeigneter Komponenten im Zuliefermarkt bestimmt, abhängig von der geplanten Stückzahl kann die „make or buy“-Entscheidung aber auch dann für eine in-house Fertigung ausfallen, wenn Komponenten bereits am Markt angeboten werden.

Typische Fertigungstechnologien für die Strukturkomponenten kommen aus dem Faserverbundsektor, auch hier hängt die eingesetzte Technologie (Nasslaminat, Flechten, automatisiertes Legen) stark von der Stückzahl ab. Im UAS-Bereich haben dabei neue 3D-Druckverfahren großes Potential, lastoptimierte Geometrien ohne große Werkzeugkosten schnell herzustellen.

3 Einsatzbereiche

Mit ihren stark unterschiedlichen Eigenschaften lassen sich die verschiedenen UAS-Typen für diverse Missionsszenarien einsetzen. Für lokal begrenzte Missionen sind dabei vor allem Multikopter im Trend, die durch einfache Steuerbarkeit auch ungeübten Piloten schnelle Flugerfolge ermöglichen. Ihre VTOL-Fähigkeit bietet außerdem einfache Start- und Landemöglichkeiten. Starrflügel-UAS finden dagegen Anwendung bei der Befliegung und Überwachung größerer bzw. weiter von der Basis entfernter Einsatzgebiete.

3.1 Überwachung und Vermessung

Im klassischen Überwachungs- und Vermessungeinsatz fungiert das UAS als „fliegendes Auge“ und lässt sich dabei je nach Einsatzszenario mit unterschiedlicher Überwachungssensorik ausrüsten. Sehr häufig ist dies ein optisches Kamerasystem, das Aufnahmen zur nachträglichen Analyse speichert oder aber dem Operator ein Livebild des zu überwachenden Bereiches überträgt. Mit photogrammetrischen Verfahren können dabei aus überlappenden Perspektiven geometrische Eigenschaften eines Zielgebiets oder -objekts wie z. B. Höheninformationen ermittelt werden.

Neben optischen Sensoren sind aber auch andere Funktionsprinzipien möglich, wie z. B. thermische Sensoren zum Lokalisieren von Waldbränden oder chemische Sensoren zur Überwachung von Giftstoffen in der Luft, wie sie etwa bei Industrieunfällen auftreten können.

Mit verringriger Baugröße werden heute auch Lidar und Radarsysteme in UAS integriert, die analog zu optischen Systemen mit Licht- und Radiowellen aus der reflektierten Punktwolke ein Bild des Einsatzgebiets erstellen können.

Neben diesen Anwendungen zur Überwachung und Vermessung von Oberflächen gibt es auch eine Reihe von Funktionsprinzipien, die eine Vermessung der unter der Erdoberfläche liegenden Schichten erlauben (Gundlach 2016):

- Magnetometer zur Ermittlung von Variationen im magnetischen Feld,
- elektromagnetische Sensoren zur Messung elektrischer Ströme,
- gravimetrische Sensoren zur Bestimmung von Dichteunterschieden.

Eine vollständige Beschreibung aller UAS-Anwendungen würde den gegebenen Rahmen bei weitem sprengen, im Folgenden sind daher einige wichtige Einsatzbereiche exemplarisch herausgestellt.

3.1.1 Infrastruktur

UAS können bei fehlender oder zerstörter Infrastruktur als Relaisstationen zur Datenübertragung dienen und so Kommunikationsaufgaben für die betroffenen Gebiete übernehmen (z. B. Telekommunikation, Mobilfunk, Internet). Kann dabei nicht auf Satellitenübertragung zurückgegriffen werden, so wird die Übertragung von der Sichtlinie zwischen dem UAS und der Bodenstation bzw. dem Zielgebiet beschränkt. Mit größeren Flughöhen wächst dabei der vom UAS abgedeckte Bereich, das Fluggerät wird aber auch komplexer und damit teurer.

Weit verbreitet ist der Einsatz von UAS zur Inspektion von weitläufigen Infrastruktursnetzen wie Pipelines, Stromleitungen, Schienen, Straßen oder Kanäle. Das UAS kann dabei den entsprechenden Korridor zu einer ersten Bestandsaufnahme abfliegen und in anschließenden periodischen Überflügen Veränderungen zu diesem Basiszustand ermitteln. Auf diese Weise können sehr schnell Schäden an den Netzwerken ermittelt und beurteilt werden.

Nach demselben Prinzip können auch Gebäude, Anlagen (z. B. Windkraftanlagen), Brücken und Dämme auf Schadensbildung überwacht werden.

3.1.2 Landwirtschaft

Großflächige landwirtschaftliche Anbauflächen sind ein ideales Einsatzgebiet für UAS, die in vergleichsweise geringer Flughöhe den Zustand von Boden und Bewuchs sehr effizient ermitteln können. So kann im „Precision Farming“ beispielsweise der Bewässerungszustand, die Nährstoffversorgung oder ein Schädlings- bzw. Unkrautbefall genau lokalisiert werden; anschließend ermöglichen UAS das gezielte Ausbringen von Mitteln zur Düngung, Schädlingsbekämpfung oder Unkrautvernichtung auf den ermittelten Flächen.

Im Vergleich zu vielen anderen Einsatzbereichen sind die operativen Rahmenbedingungen für UAS in der Landwirtschaft besonders rau, vor allem wegen der Lagerung in staubiger Umgebung und der „robusten“ Herangehensweise der Anwender an das UAS als landwirtschaftliches Gerät.

3.1.3 Geodäsie und Vermessung

Im Bereich der Geodäsie werden UAS zur photogrammetrischen Erfassung und Vermessung von Geländen und Objekten eingesetzt. Topografische Vermessungen erlauben z. B. eine Beurteilung von Überschwemmungs- oder Erdrutschgefährdung oder die Überwachung von Gletschern.

Mit bathymetrischen Verfahren können UAS zur Bestimmung von Wassertiefen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu schiffbasierten Systemen können luftgestützt mit UAS auch seichtere Küstengewässer vermessen werden, welche ihre Topologie mit der Zeit verändern und so den Schiffen eine sichere Navigation erschweren können.

Mit UAS können archäologische Ausgrabungsstätten identifiziert, katalogisiert und vermessen werden, der große Vorteil gegenüber bemannten Fluggeräten liegt dabei in der großen Einsatzflexibilität. Auch die Vermessung von Gebäuden, Grundstücksgrenzen, Baustellen oder Halden mit Hilfe von UAS findet aus diesem Grund weite Verbreitung, darüber hinaus sind die Aufnahmen gegenüber Satellitenbildern genauer und tagesaktuell.

3.2 Logistik

Mit dem Einsatz seines „Paketkopters“ in einer Bergregion im bayrischen Reit im Winkel konnte DHL in diesem Jahr sehr eindrucksvoll die Praxistauglichkeit eines UAS bei der Auslieferung von Paketen in schwierigem Terrain nachweisen. Zum Einsatz kam ein Flächenflugzeug mit Kippflügel, das in einer Packstation als Teil des Gesamtsystems gelagert und beladen wird ([Abb. 6](#)).

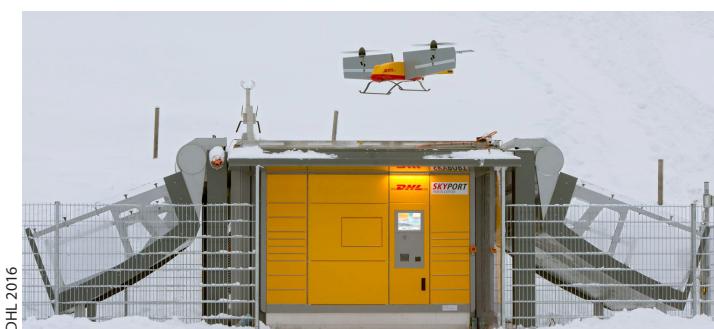


Abb. 6:
DHL Paket-
kopter 3.0
mit Pack-
station

UAS können Zubringerdienste von wichtigen Lieferungen wie beispielsweise Medikamenten immer dann übernehmen, wenn die vorhandene Infrastruktur eine konventionelle Zustellung erschwert (unwegsames Gelände, Insellagen) oder aber keine Infrastruktur vorhanden ist. Angesichts der damit verbundenen erforderlichen Reichweite des Fluggeräts werden für diese Missionen üblicherweise Flächenflugzeuge vorgesehen.

Zubringerdienste über kurze Strecken könnten auch von Multikoptern übernommen werden, allerdings stellt sich die Frage, ob die in der aktuellen Diskussion medienwirksam angesprochenen Anwendungen wie Paket- oder Pizza-lieferungen eine zusätzliche Belastung des ohnehin knappen Luftraums in den Ballungsbereichen rechtfertigen können.

4 Operative Rahmenbedingungen

Der Luftraum ist heute in Klassen unterteilt, die den Teilnehmern am Luftverkehr jeweils bestimmte Regeln auferlegen. UAS als relativ neue Teilnehmer am Luftverkehr müssen sich grundsätzlich ebenfalls an diese Luftraumordnung halten, allerdings werden die anzuwendenden Regelungen aktuell national wie europäisch bzw. international noch diskutiert. Oberziele einer Integration von UAS in den gemeinsamen Luftraum sind:

- der Schutz anderer Luftverkehrsteilnehmer,
- der Schutz der Bevölkerung am Boden, insbesondere in Ballungsräumen,
- die Beschränkung von Lärm- und Schadstoffemissionen des UAS.

4.1 Nationale Richtlinien

Nationale Richtlinien sind in einer Reihe von Gesetzen und Verordnungen festgehalten, insbesondere sind dies im Zusammenhang mit UAS:

- Luftverkehrsgesetz (LuftVG),
- Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO),
- Nachrichten für Luftfahrer (NfL).

Eine Übersichtsdarstellung der anwendbaren Regelungen für die Nutzung von UAS gibt (BMVI 2016). UAS werden dabei von Flugmodellen ausschließlich anhand der Nutzung abgegrenzt:

„Bei der Kategorie der unbemannten Luftfahrtssysteme (UAS) handelt es sich um unbemannte Fluggeräte, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden.“ (BMVI 2016)

Damit handelt es sich bei einem Fluggerät immer dann um ein UAS, wenn es zu einem gewerblichen Zweck eingesetzt wird. Andernfalls gelten die Regelungen für Flugmodelle.

Gemäß LuftVO bedarf der Betrieb von UAS grundsätzlich einer Erlaubnis, deren Grundlagen in den NfL 1-786-16 (DFS 2016) festgehalten sind. Demnach sind zunächst folgende Bedingungen für eine UAS-Aufstiegserlaubnis zu erfüllen:

- Betrieb in Sichtweite des Piloten,
- Betrieb nicht ausschließlich zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung,
- Gesamtmasse bis zu 25 kg.

4.1.1 Allgemeinerlaubnis

Für UAS ohne Verbrennungsmotor und mit einer Gesamtmasse unter 10 kg kann eine allgemeine Aufstiegserlaubnis erteilt werden, es sei denn, der Betrieb ist geplant

- in einer Flughöhe über 100 m über Grund,
- über Menschenansammlungen,
- über Unglücksorten, Katastrophengebieten und anderen Einsatzorten von Polizei oder anderen Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben,
- über Justizvollzugsanstalten, militärischen Anlagen oder anderen schützenswerten Einrichtungen,
- in Luftsperrgebieten oder Gebieten mit Flugbeschränkungen.

4.1.2 Einzelerlaubnis

In Ausnahmefällen kann von den Landesbehörden eine Einzelerlaubnis erteilt werden, wenn das UAS einen Verbrennungsmotor besitzt, die Gesamtmasse über 10 kg liegt oder der beabsichtigte Betrieb mit einem erhöhten Gefährdungspotential verbunden ist. Die Gesamtmasse darf in diesem Fall bis zu 25 kg betragen, weiterhin bestehen bleiben die für eine Allgemeinerlaubnis gültigen Beschränkungen der Einsatzgebiete, es sei denn, der Betrieb des UAS über diesen Gebieten wird von den entsprechenden Stellen oder Einrichtungen ausdrücklich gestattet.

Für den Antrag einer Einzelerlaubnis muss der UAS-Betreiber unter anderem folgende Nachweise erbringen:

- Beschreibung von Nutzlast und Fluggerät einschließlich der Sicherheitseinrichtungen für den Fall des Versagens von Systemkomponenten,
- Erfahrungs- bzw. Schulungsnachweis des UAS-Piloten,
- Unbedenklichkeitserklärung der zuständigen Behörde/Polizeidienststelle,

- In Naturschutzgebieten: Unbedenklichkeitserklärung der zuständigen Naturschutzbehörde,
- Gefährdungsanalyse bei einem Betrieb über Menschenansammlungen.

Bei der Erteilung einer Einzelerlaubnis wird auch geprüft, dass durch die beabsichtigte Nutzung keine datenschutzrechtliche Bestimmungen, sowie Urheber- oder Persönlichkeitsrechte verletzt werden.

4.2 Europäische Richtlinien

In Europa gibt es eine Vielzahl nationaler Vorgaben, die den vorgestellten deutschen Regelungen in der Struktur ähnlich sind, sich aber dennoch so weit unterscheiden, dass der grenzüberschreitende kommerzielle Einsatz eines UAS deutlich erschwert wird.

Auf europäischer Ebene ist die „European Aviation Safety Agency“ (EASA) für die zivile Luftfahrt zuständig, ihre Mission definiert sie wie folgt (EASA 2016):

- Sicherstellen des höchstmöglichen gemeinsamen Niveaus an Sicherheit für EU-Bürger,
- Sicherstellen des höchstmöglichen gemeinsamen Niveaus an Umweltschutz;
- ein einziger Ordnungsrahmen und Zulassungsprozess innerhalb der Mitgliedsstaaten,
- ermöglichen eines gemeinsamen Luftfahrt-Binnenmarkts und Schaffung gleicher Wettbewerbsbedingungen,
- Zusammenarbeit mit anderen internationalen Organisationen und Regulierungsbehörden.

Mit jedem dieser Punkte formuliert die EASA ganz klar ihren Zuständigkeitsanspruch im Bereich der UAS, auch wenn dieser heute noch auf unbemannte Fluggeräte mit mehr als 150 kg beschränkt ist. Ihren Antritt, auch für kleinere UAS die Regelungen auf europäischer Ebene zu harmonisieren hat die EASA in einer „Technical Opinion“ ausgearbeitet (EASA 2015).

Dieses Dokument umfasst UAS aller Größen und unterscheidet auch nicht mehr zwischen gewerblicher und privater Nutzung. Der regulatorische Rahmen für den Betrieb folgt klaren Grundsätzen:

- *Proportional*: die Anforderungen an ein UAS sind auf das Risiko zugeschnitten, das mit dem geplanten Betrieb verbunden ist,
- *Operationsorientiert*: Betrieb des UAS in unbewohnten Gebieten oder aber in Ballungsräumen bzw. nahe an Flughäfen,
- *Risikobasiert*: das Risiko bemisst sich nach der Energie (kinetisch, potentiell und intern), der Größe und der Komplexität des UAS, außerdem nach der



Abb. 7:
Die drei vorgeschlagenen UAS-Kategorien

Luftraumstruktur und der Verkehrsichte. Dieser Ansatz führt zu den drei UAS-Kategorien „open“, „specific“ und „certified“ (Abb. 7),

- **Leistungsbasiert:** der Aufbau des Regelwerks orientiert sich an gewünschten und messbaren Ergebnissen,
- **Progressiv:** UAS-Betreiber arbeiten sich beginnend mit „open“-UAS mit zunehmender Erfahrung nach und nach vor zu „specific“ und „certified“ UAS,
- **Reibungslos:** andere Teilnehmer am Luftverkehr, die UAS als Eindringlinge in das bestehende System ansehen, sollen durch die Regelungen nicht übermäßig belastet werden.

Kern des vorgeschlagenen Regelwerks sind die drei neuen UAS-Kategorien (Abb. 7). Die Obergrenze für die „open“-Kategorie soll wie in der deutschen Richtlinie bei 25 kg liegen. Im Bereich dieser Kategorie wird seitens der EASA zudem überlegt, eine Unterkategorie „harmless“ für sehr kleine UAS mit geringem Risiko einzuführen, die einen Großteil des bisherigen Hobbybereichs umfassen soll. Die Grenze könnte dabei – wie im neuen Regelwerk der US-Luftfahrtbehörde FAA – bei 250 g liegen.

Neben der Regulierung des UAS wird auch eine neue Luftraumstruktur vorgeschlagen, in welcher die nationalen Behörden Modellflugzonen, eingeschränkte Zonen und Flugverbotszonen für UAS festlegen. Diese Zonen sollen von UAS künftig automatisiert erkannt und eingehalten werden.

Schließlich wird auch je nach UAS-Kategorie die Ausbildung des UAS-Piloten reguliert, beginnend mit Informationsblättern für die „harmless“-Kategorie bis hin zu Schulungsprogrammen in der „specific“-Kategorie, wie sie für Piloten bemannter Flugzeuge üblich sind. UAS und Betreiber sollen künftig registriert werden, um ein UAS jederzeit seinem Betreiber zuordnen zu können.

4.3 Internationale Richtlinien

Selbst wenn die in der Technical Opinion der EASA vorgestellten Regelungen europaweit umgesetzt werden gibt es immer noch kein global gültiges Regelwerk, das einen weltweit standardisierten UAS-Betrieb erlauben würde. Die internationale Koordination des Luftverkehrs und damit auch die Spezifikation von UAS liegt in der Zuständigkeit der „International Civil Aviation Organization“ (ICAO), die seit 2005 an einem international verbindlich gültigen, harmonisierten Regelwerk arbeitet (Luther 2016). Nach (EASA 2015) wird ein ICAO-Entwurf für UAS-Standards und -Empfehlungen für das Jahr 2018 erwartet.

4.3.1 FAA Part 107

Häufig werden im internationalen Rahmen bei fehlenden nationalen Vorgaben die Vorschriften der US-Luftfahrtbehörde FAA (“Federal Aviation Administration“) als Vorbild für die Ausarbeitung nationaler Regelungen herangezogen. Ende August 2016 wurde hier mit dem neuen „Part 107“ (FAA 2016) die weltweit erste verbindliche UAS-Regelung eingeführt, die den Routinebetrieb für „small UAS“ bis zu 55 lb (25 kg) ermöglicht.

Wesentliche Eckpunkte dieses Part 107 sind:

- Flug bei Tag,
- Betrieb in Sichtweite des Piloten,
- Flug über dünn besiedelten Gebieten und unter 400 ft (122 m),
- Flug im unkontrollierten Luftraum (G),
- Geschwindigkeit bis zu 100 mph (161 km/h).

Sonderfreigaben abweichend von diesen Eckpunkten sind möglich, wenn für die FAA akzeptable Vorkehrungen zur Risikominderung vorgelegt werden.

4.3.2 Nächste Schritte ausgehend von FAA Part 107

Part 107 soll nun schrittweise ergänzt werden (Warwick 2016):

- Flug über Menschenansammlungen (abgestuft nach vier Risikokategorien, wobei es für UAS kleiner als 250 g keine Beschränkungen mehr geben soll): erwartet für Dezember 2016.
- Erweiterter Betrieb von „small UAS“ (Nachtflüge, außer Sichtweite, ggf. mehr als 55 lb): erwartet für Ende 2017.
- Aufhebung der Luftraumbeschränkung (nur für „large UAS“): mit Einzelgenehmigung.
- Paketauslieferung in Ballungsräumen: Forschungsauftrag für UAS-Flugführung vergeben an die NASA.

- Kollisionsanalysen: Forschung im Bereich Luft-Luft- und Luft-Boden-Kollisionen beauftragt.
- „Micro-UAS“ unter 4,4 lb (2 kg) mit reduzierten Anforderungen: zur Wiedervorlage im Jahr 2017.
- „Large UAS“ über 55 lb: möglich mit Ausnahmegenehmigung für kommerziellen Betrieb oder mit Testfluggenehmigung.
- Modellflugzeuge und Datenschutz: Richtlinien in Vorbereitung, um Regeln und Strafen auch für Hobbypiloten klar zu kommunizieren.

Diese FAA-Vorgaben könnten auch im internationalen Rahmen dazu dienen, ggf. noch bestehende Lücken im bestehenden bzw. geplanten Regelwerk zu schließen und so einen sicheren UAS-Betrieb im privaten wie im kommerziellen Bereich weltweit einheitlich sicherzustellen.

Literatur

- Bittner, W. (2009): Flugmechanik der Hubschrauber – Technologie, das flugdynamische System Hubschrauber, Flugstabilitäten, Steuerbarkeit. 3., aktualisierte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): Kurzinformation über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtssystemen. Quelle: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LF/unbemannte-luftfahrtssysteme.html, 1. März 2016.
- Bruno, M. (2016): Droning On – not all trips through the UAV market will be smooth, but flightpath is still looking up. Aviation Week & Space Technology, October 10–23, 2016.
- DFS – Deutsche Flugsicherung (2016): Neufassung der Gemeinsamen Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtssystemen gemäß § 20 Absatz 1 Nummer 7 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). Nachrichten für Luftfahrer 1-786-16: 13 S., Bonn, 20. Juli 2016.
- DHL (2016): DHL Paketkopter 3.0. Quelle: www.dpdhl.com/de/presse/specials/paketkopter.html.
- EASA – European Aviation Safety Agency (2015): Technical Opinion – Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft. Quelle: www.easa.europa.eu/document-library/opinions/opinion-technical-nature. Köln, 18. Dezember 2015.
- EASA – European Aviation Safety Agency (2016): The Agency – Facts and figures. Quelle: www.easa.europa.eu/the-agency/the-agency.
- FAA – Federal Aviation Administration (2016): RIN 2120-AJ60 – Operation and Certification of Small Unmanned Aircraft Systems. Quelle: www.faa.gov/news/fact_sheets/news_story.cfm?newsId=20516.
- Gundlach, J. (2016): Civil and Commercial Unmanned Aircraft Systems. AIAA Education Series, Reston (VA), 2016.
- Luther, P. (2016): Drohnenflug im Ausland – Andere Länder, andere Sitten. In: Drohnenmagazin 1/2016, S. 38f.

Warwick, G. (2016): Unmanned Unleashed – Years in the making, the FAA's first regulations for unmanned aircraft meet with industry welcome. Aviation Week & Space Technology, September 12–25, 2016.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Andreas Strohmayer
Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau (IFB)
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart
strohmayer@ifb.uni-stuttgart.de

Deutsches Erprobungsgelände für UAS (DEU) – Chancen und Testmöglichkeiten

Erwin V. Lauschner

1 Einleitung

In dem Beitrag werden bavAIRia, der bayerische Aerospace Cluster vorgestellt, die bavAIRia Ziele für unbemanntes Fliegen abgeleitet sowie die Kriterien für die Suche von Erprobungszentren für UAS (Unmanned Aircraft Systems) erarbeitet. Die erfolgte Auswahl für zwei Erprobungszentren wird erläutert sowie die Rahmenbedingungen für den Betrieb dargestellt. Erste Erfahrungen werden berichtet sowie der Ausblick auf weitere Anforderungen an UAS-Erprobungszentren in Bayern skizziert.

2 bavAIRia, der bayerische Aerospace Cluster

Der bavAIRia e. V. feiert 2016 sein zehnjähriges Bestehen. Er wurde 2006 im Rahmen der Clusteroffensive des Bayerischen Wirtschaftsministeriums gegründet, um die bayerischen Kompetenzträger in Luftfahrt, Raumfahrt und Raumfahrtanwendungen stärker miteinander zu vernetzen. Heute hat bavAIRia über 270 Mitglieder, davon über 90 Prozent Mittelständische Unternehmen und zählt zu den größten Luft- und Raumfahrtclustern in Deutschland und Europa. Die vier aktuellen Schwerpunkte für die Unterstützung unserer Mitglieder in der Luftfahrt, die alle zwei Jahre überprüft und evtl. angepasst werden, sind: 1. Unterstützung bei der Internationalisierung, 2. Verbesserung der Effizienz und Effektivität in der internationalen Zulieferkette (Supply Chain Excellence) 3. Förderung von Innovation und Kooperation sowie 4. Förderung des Bereiches „Unbemanntes Fliegen“. Ebenso bestehen detaillierte Ziele zur Stärkung der existierenden Kompetenzen für die Luft- und Raumfahrtanwendungen von bavAIRia.

2013 erteilt der Beirat bavAIRia e. V. den Auftrag ein UAS-Forum einzurichten. Grundlage für diesen Beschluss bildete das Positionspapier zur Bayerischen Luftfahrtstrategie 2030, das zusammen mit Stakeholdern der bayerischen Luftfahrtindustrie erarbeitet worden war. Darin wird dem „Unbemannten Fliegen“ ein wachsender Markt für neue Technologien und Anwendungen vorhergesagt.

3 Chancen und Ziele des bavAIRia UAS-Forums für unbemanntes Fliegen

Die Bayerische Luftfahrstrategie 2030 vom 14.1.2015 stellt dazu fest: „Unbemannte Flugsysteme werden in Zukunft einen erheblichen Wachstumsmarkt darstellen. Das Aufgabenspektrum von unbemannten, fliegenden Plattformen ist aufgrund ihrer spezifischen Fähigkeiten nahezu unbegrenzt und heute noch bei weitem nicht ausgeschöpft.“

Diese Chance nutzt bavAIRia mit der Einrichtung des bavAIRia Forums „Unbemanntes Fliegen“ seit 2013. Dieses Forum hat bisher in 18 Sitzungen des Steuerausschusses sowie sieben teilweise öffentliche, auch in der Presse viel beachtete Foren mit über 400 fachkundigen Teilnehmern aus Politik, Industrie, Hochschulen, Verbänden und Behörden durchgeführt.

Die Ziele des UAS-Forums sind vielfältig:

1. Beitrag zur strukturierten Entwicklung des Zukunftsthemas „Unbemanntes Fliegen“ in Bayern leisten.
2. Schaffen eines konkreten Mehrwerts für unsere Mitglieder.
3. Keine Duplizierung der Arbeiten, die bereits in anderen Gremien geleistet werden. Daher intensive Zusammenarbeit mit dem Verein UAV DACH
4. Förderung der Akzeptanz des Themas „Unbemanntes Fliegen“ in Gesellschaft und Politik durch Sichtbarmachen des Nutzens vom Einsatz von Unmanned Aircraft Systems (UAS)
5. Unterstützung eines Kongresses zum Thema UAS während Luftfahrtzuliefermessen in München

Zur Koordinierung der Arbeit sowie zur fachlichen Beratung wurde eine Steuergruppe eingerichtet, mit vier Vertretern der bavAIRia e. V., zwei Vertretern von Universitäten (Technische Universität München, Universität der Bundeswehr München) sowie zwei Vertretern bayerischer UAS-Hersteller (EMT, ESG).

4 Suche nach Erprobungsgelände für unbemanntes Fliegen in Bayern – Kriterien und Vorgehen

Bei dem ersten UAS-Forum im Januar 2014 haben die Teilnehmer für die Einrichtung eines UAS-Erprobungsgeländes als erste, wichtige Aktivität votiert. Der Bereich Luftfahrt von bavAIRia wurde mit der Einrichtung eines UAS-Testgeländes noch im Jahr 2014 in Bayern beauftragt. Schwerpunkte waren im Frühjahr 2014 die Arbeiten am Konzept, die Identifizierung potenzieller Standorte, die Erarbeitung eines Kriterienkatalogs und darauf basierend die Auswahl des Firmenflugplatz Grob in Mattsies/Mindelheim sowie das Absetzgelände in Manching.

Als wichtigste Kriterien für die Auswahl des Erprobungsgeländes wurden folgende vier Kriterien gewählt. 1. Nutzbare Infrastruktur. 2. Zugang/Lage/Ereichbarkeit. 3. Politische Akzeptanz/Unterstützung. 4. Vertragliche Regelungen. Nach Besichtigung und Bewertung von zwölf möglichen Standorten wurde die oben genannten beiden Standorte ausgewählt und die Rahmenbedingungen für eine praxisorientierte Nutzung erarbeitet.

5 Rahmenbedingung für Betrieb des Erprobungsgeländes DEU

Neben der Auswahl der Standorte wurde ein Nutzungskonzept für das Erprobungsgelände erarbeitet. Es muss eine einfache Nutzung ermöglichen, die zu standardisierten Abläufen und festen Preisen unseren bavAIRia Mitgliedern die Möglichkeit der Erprobung ihrer neuen UAS-Technologien, aber auch von verschiedenen Anwendungen bietet. Dazu gehören Nutzungsverträge mit dem Anbieter des Erprobungsgeländes, Verträge mit bavAIRia als Inhaber der Aufstiegsgenehmigung und Koordinator des Betriebes, einer notwendigen Versicherung, abgestimmt auf verschiedenen Risiken je nach Gewichtsklasse und als Basis eine allgemeine Aufstiegsgenehmigung, damit nicht jedes mal eine Einzogenehmigung benötigt wird. Dazu wurde vom Luftamt Süd der Regierung von Oberbayern der bavAIRia eine allgemeine Aufstiegsgenehmigung (bis 150 kg) erteilt. Diese beschränkt sich auf das genehmigungsfähige Fliegen unter Visual Line of Sight (VLOS) Bedingungen. Diese Arbeiten konnten im IV. Quartal 2014 mit dem Vertragswerk einschließlich der Versicherungskomponente erfolgreich abgeschlossen werden.

6 Erste Erfahrungen aus dem Betrieb des Erprobungsgeländes DEU

Seit 2015 nutzen Mitglieder von bavAIRia das erste Deutsche Erprobungsgelände für UAS zur Erprobung unter den dargestellten Rahmenbedingungen. Immer erfolgt nach Überprüfung durch bavAIRia ein erstes Briefing auf dem Erprobungsgelände sowie die Einweisung in die Betriebsabläufe des Erprobungsplatzes. Nach einer Abstimmung der Termine wird dann die Erprobungskampagne gestartet. Bisherige Erprobungen dauerten jeweils ein bis zwei Wochen. Typisch ist das morgendliche Briefing um die Flugplatznutzung durch die Erprobung mit dem laufenden Flugbetrieb abzustimmen. Hilfreich ist, wenn der UAS-Pilot fliegerisch Erfahrung besitzt sowie über ein Flugfunkspiegelzeugnis verfügt. Das DEU wurde auch schon mehrmals zu gemeinsamen Vorführungen von verschiedenen UAS-Technologien in den Gewichtsklassen bis 5 kg, bis 25 kg und

Flugzeuge, die optional mit Piloten aber auch ferngesteuert geflogen werden, genutzt. Teilnehmer der Veranstaltungen sind vor allem interessierte Politiker, Hochschulangehörige, Industrievertreter, bavAIRia Mitglieder sowie Pressevertreter. Damit wird das Ziel, den Nutzen von unbemanntem Fliegen auch in der Öffentlichkeit bekannt zu machen, unterstützt.

7 Ausblick auf weitere Anforderungen an Erprobungszentren UAS

Nach den erfolgreichen zwei Jahren der Nutzung kommen weitere Anforderungen auf die Erprobungszentren zu. Neuerdings gibt es die Aussicht, dass auch außerhalb der Sichtweite des Piloten (BVLOS – beyond visual line of sight) es gesetzlich möglich werden wird, eine Betriebsgenehmigung im Einzelfall zu erhalten. Dazu müssen die Deutschen und Europäischen Gesetze angepasst werden. Erste Schritte dazu sind gemacht. bavAIRia unterstützt diese Aktivitäten gemeinsam mit dem UAV DACH. Die Kriterien für eine missionsbezogene Risikoabwägung werden gerade erarbeitet. Für diese BVLOS Flüge werden natürlich auch Erprobungsgelände benötigt, die jedoch weitere Kriterien an die Sicherheit im Luftverkehr erfüllen müssen. bavAIRia ist dabei in Diskussion mit weiteren Partnern, um auch diese Anforderungen seinen Mitgliedern zukünftig anbieten zu können.

8 Zusammenfassung

Mit dem ersten Angebot in Deutschland für ein Erprobungsgelände für unbemanntes Fliegen hat bavAIRia vor zwei Jahren einen ersten Meilenstein gesetzt. Die ersten guten Erfahrungen des Deutschen Erprobungsgeländes für Unbemanntes Fliegen (DEU) unterstützen das Heben des großen Potenzials dieses neuen Marktes für unsere Industrie, für neuartige, sinnvolle Anwendungen und neue Dienstleister. Gerade mittelständische Dienstleister werden zukünftig diesen Markt bedienen und viele hochwertige, technisch anspruchsvolle Arbeitsplätze schaffen. Oberstes Gebot muss dabei immer die Sicherheit im Luftraum sein, speziell auch bei dem zukünftigen Fliegen außerhalb der Sichtweite des Piloten. bavAIRia wird dazu auch wieder seinen Beitrag leisten.

Kontakt

Dipl.-Ing. Erwin V. Lauschner

bavAIRia e.V.

Sonderflughafen Oberpfaffenhofen

Friedrichshafener Straße 1, 82205 Gilching

lauschner@bavAIRia.net

Session 2: Kalibrierung und Auswertung

Kameras für UAS – Eine Marktübersicht

Heinz-Jürgen Przybilla

1 Einleitung

Bildbasierte Punktwolken sind in Verbindung mit UAS-Anwendungen zwischenzeitlich zu einem neuen „Standardprodukt“ im Bereich geodätischer Messtechnik geworden. Der vorhandene Automatisierungsgrad – vom digitalen Foto zur Punktwolke – hat dazu geführt, dass eine Vielzahl neuer Anwender die Technologien gewinnbringend nutzen. Für die Projektbearbeitung werden in der Regel Komplettsysteme eines Herstellers erworben, der somit gleichzeitig die konzeptionelle Verantwortung für die Technologie des Flugroboters, als auch für die Qualität des Sensors – der Digitalkamera – übernimmt.

Cramer (2016) beschreibt die grundlegenden Komponenten einsetzbarer Kameras, wie Sensortyp (CCD, CMOS), Sensorformat und -auflösung, Optiken mit fester und variabler Brennweite, bildstabilisierende Bauelemente etc. Die Systeme stammen nahezu vollständig aus dem sogenannten „Consumer-Segment“, der sich aus Kompaktkameras, spiegellosen System- bzw. Bridgekameras sowie klassischen Spiegelreflexkameras (DSLR) zusammensetzt. In jüngster Zeit werden jedoch auch hochwertige Mittelformatkameras für die Nutzung auf UAV angeboten. Darüber hinaus bieten multispektrale Systeme erweiterte Anwendungsmöglichkeiten, die den Bereich des sichtbaren Spektrums ins nahe und thermale Infrarot erweitern.

Aus der Perspektive der Photogrammetrie betrachtet, handelt es sich bei allen Systemen 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, die i. d. R. simultan im Rahmen einer Bündelblockausgleichung erfolgen muss. Hierzu notwendige Voraussetzungen bzw. Maßnahmen während des Bildfluges werden von Przybilla et al. (2015) sowie Gerke und Przybilla (2016) beschrieben. Verbleibende optische und mechanische Unzulänglichkeiten der Kameras, sowie damit einhergehende Bedienungsfehler durch die Nutzer, bedingen jedoch – soweit sie im Auswerteprozess nicht modelliert werden können – weitere Genauigkeitsverluste.

Der Markt der Digitalkameras ist hochdynamisch, d. h. es gibt in jedem Jahr mehrere Hundert Neuerscheinungen sowie Weiterentwicklungen vorhandener

Systeme. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick aktuell im UAS-Bereich eingesetzter Kameras, als Standard- oder optionale Systeme für spezifische Anwendungen.

2 Rahmenbedingungen

UAS aus dem Hobby- sowie semi-professionellen Bereich haben sich auch in der geodätischen Anwendung fest etabliert, da sie im Allgemeinen über ein sehr gutes Preis-Leistungsverhältnis verfügen. Hinzu kommt, dass die bisherigen gesetzlichen Regelungen in Deutschland ein Gewichtslimit von 5 kg (MTOW – maximum take-off weight) für eine Allgemeinerlaubnis zum Aufstieg derartiger Systeme festlegten. Dieser Tatsache wurde durch den konstruktiven Leichtbau der UAV Rechnung getragen, bei gleichzeitiger Beschränkung der Nutzlast (hier vorrangig des Sensors sowie der Energieversorgung). In der Folge wurden vorrangig Kameras mit einem Gewicht zwischen 200 g und 500 g, in Einzelfällen auch bis zu 1.000 g eingesetzt. Kameras oberhalb dieses Gewichtslimits reduzierten die möglichen Flugzeiten des UAV signifikant und waren daher nicht mehr wirtschaftlich einsetzbar.

Im Juli 2016 wurde das Gewichtslimit durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI 2016) auf einen MTOW-Wert von 10 kg angehoben. Dieser Fakt bietet UAS-Nutzern erweiterte Möglichkeiten in der Wahl größerer Flugroboter und der darauf implementierten Digitalkameras. Der Anbietermarkt hat zwischenzeitlich auf diese neuen gesetzlichen Vorgaben reagiert.

3 Kamerasysteme

Nachfolgend werden Kamerasysteme durch Kenngrößen, die ihren konstruktiven Aufbau wiedergeben, beschrieben. Weiterhin werden Hinweise auf eine Systemimplementierung bei unterschiedlichen Anbietern gegeben. Letztlich definieren die aus der Anwendung resultierenden Anforderungen sowie finanzielle Rahmenbedingungen die Auswahl des Sensors.

Abb. 1 zeigt typische zum Einsatz kommende Sensorformate (Breite – Höhe – Fläche). Das Sensorformat, einhergehend mit der Anzahl der Bildelemente, ist ein wesentlicher Parameter für die Qualität des zu erfassenden Bildes. Die Größe des einzelnen Pixels ist hierbei ein bestimmender Faktor für Dynamikumfang und Rauschverhalten des Sensors. Aus dem Quotienten von Flughöhe und Objektivbrennweite, multipliziert mit dem Pixelformat, leitet sich die Kenngröße GSD = Ground Sample Distance ab. Der auch Bodenauflösung genannte Para-

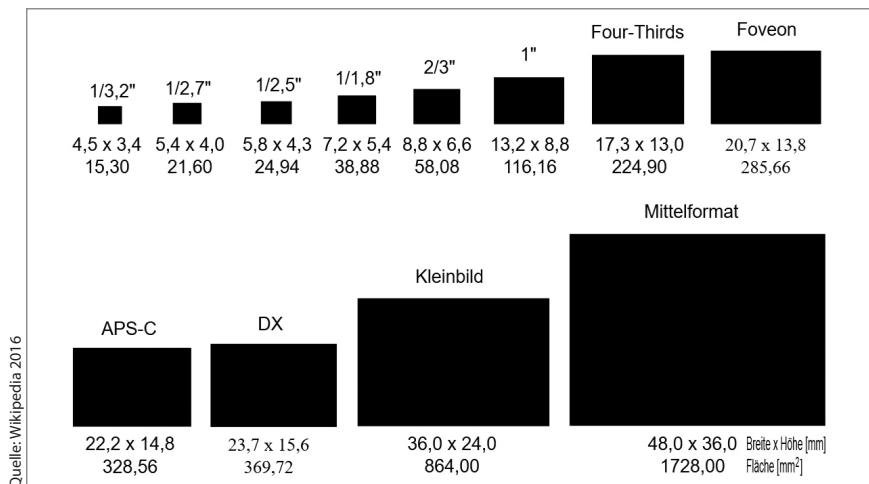


Abb. 1: Sensorformate im Vergleich

meter (allgemein in der Dimension cm angegeben) beschreibt die theoretisch erreichbare Detailauflösung im Objekt.

Aktuelle Digitalkameras verwenden vorrangig sogenannte CMOS-Sensoren. CMOS steht für „Complementary Metal Oxide Semiconductor“ und beschreibt eine bestimmte Art von elektronischer Schaltung. Genau wie die CCD-Sensoren basieren diese Sensoren auf dem fotoelektrischen Effekt und wandeln die einfallenden Photonen in elektrische Ladungen um. Der Unterschied zum CCD-Sensor ist die Art der Weiterleitung dieser Information (Vision-Doctor 2016). Die durch das einfallende Licht entstehende Ladung wird direkt durch einen in jedem Pixel integrierten Verstärker und Digitalisierbaustein verarbeitet. Es findet kein sequenzieller Ladungstransport statt und Pixel lassen sich einzeln schalten oder auslesen. Darüber hinaus besteht eine deutlich geringere Störanfälligkeit gegenüber Blooming und Transportverlusten. Neben geringeren Herstellungskosten weisen sie zudem nur $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{3}$ des Energieverbrauchs eines CCD-Sensors auf.

Die Qualität des Fotos, insbesondere mit Blick auf das „Messbild“ wird durch weitere Größen beeinflusst. Der Begriff des Messbildes wird dabei über die Parameter der Inneren Orientierung beschrieben, die sich im Wesentlichen aus den Größen Kamerakonstante, Hauptpunktlage, Verzeichnung, Affinität und Rechtwinkligkeit des Sensors sowie ggf. weiterer Bilddeformationen zusammensetzen.

Bei der Wahl des Objektivs sind weitwinkelige Optiken zu bevorzugen, da sie günstigere Strahlenschnittbedingungen ermöglichen. In die Objektive integrierte Bildstabilisatoren ermöglichen tendenziell längere Belichtungszeiten, nehmen jedoch Einfluss auf die Kamerageometrie (Veränderung der Lage des Bildhaupt-

punktes) und sind daher auf jeden Fall abzuschalten. Gleiches gilt für Einrichtungen zur Sensorreinigung. Zoom-Objektive bieten zwar ein variables Brennweiten-Spektrum, verhindern jedoch – ebenso wie ein eingeschalteter Autofokus – das definierte Festlegen einer „festen“ Brennweite, bzw. des photogrammetrischen Parameters der „Kamerakonstante“. Soweit möglich sollten daher Objektive mit Festbrennweite und einem manuellen Fokus eingesetzt werden.

Die Sensorempfindlichkeit wird über die ISO-Werte geregelt. Die Nutzung eines hohen ISO-Wertes bei der Belichtung ermöglicht i. d. R. die Verkürzung der Belichtungszeit und auch eine Reduktion der Blendenöffnung, sie steigert jedoch gleichzeitig das Rauschverhalten des Sensors und verschlechtert somit die Detailerkennbarkeit im Bild.

Der Frage des geeigneten Speicherformates wird häufig eher wenig Beachtung geschenkt, da die Voreinstellung vieler Kameras das speichersparende JPG-Format ist. Dass das JPG-Format – in Abhängigkeit des in der Kamera software verwendeten Kompressionsfaktors – verschieden verlustbehaftete Bilder speichert, ist häufig nicht bekannt bzw. wird in Folge des deutlich geringeren Speicherbedarfs auf dem Medium vernachlässigt. Moderne Kameras bieten die Möglichkeit die Daten auch im sogenannten RAW-Format zu speichern. Dies als „digitales Negativ“ bezeichnete Produkt ist verlustfrei und bietet dem Anwender alle Möglichkeiten einer erweiterten Bildvorverarbeitung. Nachteilig ist, dass das RAW-Format über den jeweiligen Hersteller definiert und daher nicht einheitlich ist.

Die Farbtiefe ist eine wichtige Kenngröße der Fotos. Sie steht für die Anzahl der möglichen Farb- oder Grauwerte (GW) des einzelnen Pixels und wird auch als radiometrische Eigenschaft bezeichnet. Je mehr Bits pro Pixel zur Verfügung stehen, desto mehr unterschiedliche Farben sind darstellbar. Typisch sind dabei Farbtiefen von 8 bit (256 GW), 12 bit (4.096 GW) bzw. für hochwertige Systeme auch 16 bit (65.536 GW).

3.1 Proprietäre Kameras

Der chinesische Hersteller DJI Innovations (DJI 2016) ist Marktführer im Bereich der UAV, mit Anwendungsschwerpunkt auf dem Hobbysektor. Er steht damit stellvertretend für eine Vielzahl alternativer Anbieter mit vergleichbarem Sortiment. Allerdings ist ein deutlicher Trend zur Entwicklung von Systemen für den professionellen Einsatz erkennbar (z. B. Filmindustrie). Die verfügbaren Flugroboter sind vorrangig mit Kameras aus eigener Entwicklung ausgestattet, die sowohl für die Erstellung hochauflösender Videos als auch von Einzelbildern geeignet sind.

Mit den Bauserien „Phantom“ und „Inspire“ werden fest verbaute Kameras in Kombination mit entsprechenden Gimbalen ausgeliefert ([Abb. 2](#), [Tab. 1](#) und [Tab. 2](#)).

Quelle (alle Abb.): Hersteller

**Abb. 2:** DJI-Kameras:

Oben, von links: Phantom 3 – Zenmuse X3 – Zenmuse X5
 Unten, von links: Phantom 4Pro – Zenmuse X4S

Tab. 1: Technische Daten DJI-Kameras (Phantom 3 und 4)

Kamera	Phantom 3	Zenmuse X3	Phantom 4 PRO/ Zenmuse X4S
Sensortyp	CMOS	CMOS	CMOS
Sensorformat	6.2 × 4.6 mm*	6.2 × 4.6 mm*	13.2 × 8.8 mm**
Sensorauflösung	12.4 MPixel	12.4 MPixel	20 Mpixel
Pixelgröße	1.55 µm	1.55 µm	2.4 µm
ISO-Empfindlichkeit	100–3200	100–3200	100–12800
Brennweite	4 mm	4–11 mm	8.8 mm
Fokus	∞ (fix)	AF / MF	AF / MF
Opt. Bildstabilisator	Nein	Nein	Nein
Max. Blende	1:2.8	1:2.8	1:2.8
Min. Verschlusszeit	1/8000 sec	1/8000 sec	1/2000 sec
Field of View (FOV)	94°	35–92°	84°
Gewicht	k. A.	ca. 260 g	ca. 530g / 580 g
Preis	ca. 400 €***	ca. 1000 €***	ca. 700 €***
Markteinführung	Oktober 2014	Oktober 2014	November 2016
RAW-Format	DNG	DNG	DNG
Farbtiefe	k. A.	12 bit	12 bit
JPG-Format	Ja****	Ja****	Ja

* 1/2.3" Sensor; ** 1" Sensor – *** Preis einschließlich Standardobjektiv und Gimbal (November 2016) – **** Im JPG-Format gespeicherte Fotos sind bzgl. radial-symmetrischer Verzeichnung korrigiert.

Tab. 2: Technische Daten DJI-Kameras (Inspire 1 und 2)

Kamera	Inspire Zenmuse X5 / X5R	Inspire Zenmuse X5S
Sensortyp	CMOS	CMOS
Sensorformat	17.3 × 13.0 mm*	17.3 × 13.0 mm*
Sensorauflösung	16 Mpixel	20,8 Mpixel
Pixelgröße	3.76 µm	3.28 µm
ISO-Empfindlichkeit	100–25600	100–25600
Brennweite	12 / 15 / 17 mm	12 / 15 / 17 mm
Fokus	AF / MF	AF / MF
Opt. Bildstabilisator	Nein	Nein
Max. Blende	1:2.0 / 1:1.7 / 1:1.8	1:2.0 / 1:1.7 / 1:1.8
Min. Verschlusszeit	1/8000 sec	1/8000 sec
Field of View (FOV)	65° / 72° / 84°	65° / 72° / 84°
Gewicht	ca. 530g / 580 g	ca. 580 g
Preis	ca. 2100 € / 2500 € **	ca. 2200 € *
Markteinführung	Oktober 2015	November 2016
RAW-Format	DNG	DNG
Farbtiefe	12 bit	12 bit
JPG-Format	Ja	Ja

* MFT – Micro-Four-Thirds – ** Preis einschließlich Standardobjektiv und Gimbal (November 2016)

Während es sich bei den Phantom Kameras und den quasi komponentengleichen Zenmuse X3/X4 um fertig konfektionierte Systeme handelt, basieren Zenmuse X5/R auf dem Micro-Four-Thirds (MFT)-Standard, der die Nutzung hochwertiger Fremdobjektive ermöglicht. „Während die DJI Zenmuse X3 Kamera eine Bildqualität auf dem Niveau von Kompaktkameras liefert, sollten die X5R und X5 mit Systemkameras gleichziehen können“ (dkamera 2016).

3.2 Kompaktkameras

Digitale Kompaktkameras sind kleine sowie vergleichsweise leichte Fotoapparate. Die in der Regel als Sucherkameras ausgeprägten Systeme verfügen über Sensoren für das Kleinbildformat (36 * 24 mm), APS-Format (23.6 * 15.7 mm) oder verschiedenste Kleinstbildformate (Abb. 3 und Tab. 3).

Quelle (alle Abb.): Hersteller



Abb. 3: Kompaktkameras:
Von links: Canon S110 –
Sigma DP1/2

Tab. 3: Technische Daten Kompaktkameras

Kamera	Canon S110	Sigma DP2**
Sensortyp	CMOS	Foveon X3 CMOS
Sensorformat	7.44 * 5.58 mm (1/1.7")	20.7 * 13.8 mm
Sensorauflösung	12.1 MPixel	14.1 MPixel (4.7 MPixel pro Farbkanal)
Pixelgröße	1.86 µm	7.8 µm
ISO-Empfindlichkeit	80–12800	100–800
Brennweite	5.2 bis 26 mm	24.2 mm
Fokus	AF / MF	AF / MF
Opt. Bildstabilisator	Ja	Nein
Max. Blende	1:2.0	1:2.8
Min. Verschlusszeit	1/2000 sec	1/2000 sec
Field of View (FOV)	103°–21°	59°
Gewicht	ca. 198 g	ca. 300 g
Preis	ca. 400 €	ca. 200 € *
Markteinführung	September 2012	Juli 2009
RAW-Format	Ja	Ja
Farbtiefe	12 bit	12 bit
JPG-Format	Ja	Ja

* Nur als Gebrauchtsystem verfügbar – ** Nachfolgemodell: Sigma dp2quattro (Foveon X3 CMOS, 23,5 × 15,7 mm mit 39.3 MPixel)

3.3 Systemkameras



Abb. 4: Systemkameras:
Oben, von links: Sony
NEX 5R – Ricoh GXR.
Unten, von links:
Sony α7R – Sony RX1RII

Quelle (alle Abb.): Hersteller

Tab. 4a: Technische Daten Systemkameras (Teil 1)

Kamera	Sony NEX 5R	Ricoh GXR*
Sensortyp	CMOS	CMOS
Sensorformat	23.6 * 15.7 mm (APS-C Sensor)	23.6 * 15.7 mm (APS-C Sensor)
Sensorauflösung	16.1 MPixel	12.3 MPixel
Pixelgröße	4.8 µm	5.5 µm
ISO-Empfindlichkeit	100–25600	200–3200
Brennweite	35 mm *	18 mm / 33 mm
Fokus	AF / MF	AF / MF
Opt. Bildstabilisator	Ja	Nein
Max. Blende	1:2.0	1:2.5
Min. Verschlusszeit	1/4000 sec	1/3200 sec
Field of View (FOV)	46°	89° / 50°
Gewicht	ca. 525 g	ca. 465 g
Preis	ca. 1850 €	ca. 1000 € **
Markteinführung	Oktober 2012	November 2009
RAW-Format	Ja	DNG
Farbtiefe	k. A.	8 bit
JPG-Format	Ja	Ja

* Zeiss Biogon 35/2.0 – ** Nur als Gebrauchtsystem verfügbar

Tab. 4b: Technische Daten Systemkameras (Teil 2)

Kamera	Sony α7R	Sony RX1RII
Sensortyp	CMOS	CMOS
Sensorformat	35.9 * 24 mm	35.9 * 24 mm
Sensorauflösung	36.2 MPixel	42.2 MPixel
Pixelgröße	4.87 µm	4.51 µm
ISO-Empfindlichkeit	50–25600	100–25600
Brennweite	35 mm **	35 mm ***
Fokus	AF / MF	AF / MF
Opt. Bildstabilisator	Ja	Nein
Max. Blende	1:2.5	1:2.8
Min. Verschlusszeit	1/8000 sec	1/4000 sec
Field of View (FOV)	67°	67°
Gewicht	ca. 600 g	ca. 610 g
Preis	ca. 2100 €	ca. 3500 €
Markteinführung	Oktober 2013	Oktober 2015
RAW-Format	Ja	Ja
Farbtiefe	14 bit	14 bit
JPG-Format	Ja	Ja

* Zeiss Biogon 35/2.0 – ** Voigtländer Skopar 35/2.5 – *** Zeiss Sonnar T* 35/2.0

Digitale Systemkameras bestehen aus einem Kameragehäuse, das mit einem Wechselobjektiv ausgestattet werden kann. Die Systeme sind „spiegellos“ und werden daher auch als DSLM-Kameras bezeichnet (DSLM – digital single lens mirrorless). Im Vergleich zu Spiegelreflexkameras verfügen die Systeme bauartbedingt über ein geringeres Gewicht ([Abb. 4](#) und [Tab. 4a/4b](#)).

3.4 Spiegelreflexkameras

Spiegelreflexkameras sind Systeme, bei denen sich zwischen Objektiv und Bildebene ein weggklappbarer Spiegel befindet. In ihrer digitalen Variante werden sie als DSLR-Kameras bezeichnet (DSLR – digital single-lens reflex). Sie sind mit einem Wechselobjektiv ausgestattet.

3.4.1 Kleinbildformat

Das typische Kleinbildfilm-Format (36 * 24 mm) wird von vielen DSLR-Kameras nicht eingehalten. Sie verwenden einen kleineren Bildsensor, so dass bei ge-

gebener Brennweite ein kleinerer Bildwinkel erzeugt wird. Um in diesem Fall eine identische Perspektive wie im Kleinbildformat zu erreichen, muss ein Objektiv eine um den Formatfaktor (CROP-Faktor) kürzere Brennweite aufweisen.

Um das volle Leistungspotenzial der Kameras auszuschöpfen werden sie häufig mit hochwertigen Weitwinkel-Optiken ausgestattet. Dies hat zur Folge, dass das Gesamtsystem über ein hohes Gewicht verfügt (ca. 1,5 kg) und damit die Leistungsgrenze vieler Flugplattformen überschreitet ([Abb. 5](#) und [Tab. 5](#)).



Quelle (alle Abb.): Hersteller

Abb. 5: Spiegelreflexkameras:
Von links: Nikon D800E –
Canon EOS 5DS R

Tab. 5: Technische Daten Spiegelreflexkameras

Kamera	Nikon D800E	Canon EOS 5DS R
Sensortyp	CMOS	CMOS
Sensorformat	35.9 * 24 mm	35.9 * 24 mm
Sensorauflösung	36.3 MPixel	50.3 MPixel
Pixelgröße	4.9 µm	4.14 µm
ISO-Empfindlichkeit	100–25600	50–12800
Brennweite	35 mm *	35 mm **
Fokus	AF/MF	AF/MF
Opt. Bildstabilisator	Nein	Ja
Max. Blende	1:1.8	1:1.8
Min. Verschlusszeit	1/8000 sec	1/8000 sec
Field of View (FOV)	63°	67°
Gewicht	ca. 1200 g	ca. 845 g ****
Preis	ca. 1600 € ***	ca. 3500 € *****
Markteinführung	April 2012	Juni 2015
RAW-Format	NEF *****	Ja
Farbtiefe	14 bit	14 bit
JPG-Format	Ja	Ja

* AF-S DX NIKKOR 35 mm 1:1,8 G – ** Zeiss Sonnar T* 35/2.0 – *** Nur als Gebrauchtsystem verfügbar – **** Gehäuse – ***** NEF – Nikon Electronic Format (RAW)

3.4.2 Mittelformat

Mittelformat-Systeme bilden die „Königsklasse“ der digitalen Fotografie, was sich nicht nur über die aktuellen Leistungsdaten, sondern auch über die Preisgestaltung ausdrückt. Interessant sind die Systeme für den UAV-Einsatz vorran-



Abb. 6: Mittelformatkameras: Von links:
Hasselblad X1D – Hasselblad A5D-80 – Phaseone IXU 1000

Tab. 6: Technische Daten Mittelformatkameras

Kamera	Hasselblad X1D	Hasselblad A5D-80	Phaseone IXU 1000
Sensortyp	CMOS	CMOS	CMOS
Sensorformat	43.8 * 32.9mm	53.7 * 40.3 mm	53.4 * 40 mm
Sensorauflösung	51.0 MPixel	80.0 MPixel	100 MPixel
Pixelgröße	5.3 µm	5.2 µm	4.6 µm
ISO-Empfindlichkeit	100–25600	80–800	50–6400
Brennweite	31 mm	24–300 mm	32–150 mm
Fokus	AF / MF	AF (auf ∞ fixiert) / MF	AF/MF
Opt. Bildstabilisator	k. A.	k. A.	k. A.
Max. Blende	1:3.5	1:3.5 *	1:2.8
Min. Verschlusszeit	1/2000 sec	1/800 sec	1/1600 sec
Field of View (FOV)	72°	104°–13°	69° **
Gewicht	ca. 1200 g *	ca. 2350 g **	ca. 1530 g ***
Preis	ca. 7900 €	k. A.	ca. 60000 €
Markteinführung	September 2015	Juni 2015	Januar 2016
RAW-Format	RAW	Hasselblad 3FR	Phaseone RAW
Farbtiefe	16 bit	16 bit	16 bit
JPG-Format	Ja	Ja	Ja

* 30 mm XCD Optik – ** mit HC 3,5/35 mm Objektiv – *** Schneider-Kreuznach fast sync 55 mm f/2.8

gig durch die Anhebung des zulässigen Gewichtslimits geworden. Tendenziell bieten sie – auf Grund erweiterter Leistungsdaten – die Möglichkeit verbesserte Genauigkeitsbereiche zu erschließen. Geeignete Trägerplattformen stehen dabei sowohl für Systeme von Phaseone (www.coptersystems.com) als auch Hasselblad (www.dji.com/newsroom/news/dji-hasselblad-aerial-package) zur Verfügung (Abb. 6 und Tab. 6).

3.5 Metrische Kameras

Die in der UAV-Anwendung zum Einsatz kommenden Kamerasyteme verfügen i. d. R. über keine feste Metrik (Teilmesskamera) und stehen damit im Gegensatz zur Nutzung metrischer Systeme im klassischen Luftbildbereich. Allerdings



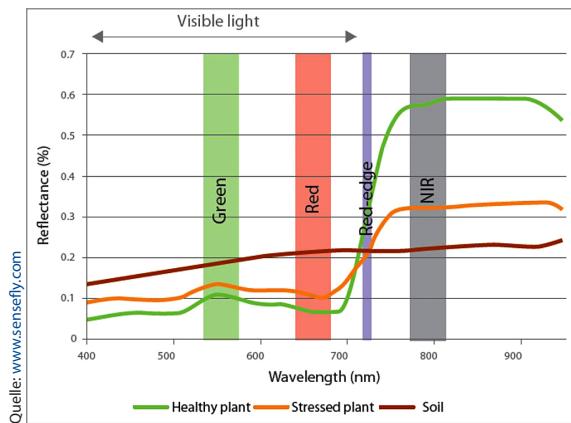
Abb. 7: Von links: MACSMicro* (DLR), IGN Camlight*, senseFly S.O.D.A. * Prototyp

erfordert die Anforderung einer „stabilen Metrik“ erhöhten Aufwand im konstruktiven Aufbau derartiger Systeme. Entwicklungen metrischer Kameras für UAS, wie von Kraft et al. (2016) beschrieben, orientieren sich an Rahmenbedingungen, die auch für Luftbildkameras Anwendung finden. Weitere Details zu derartigen Entwicklungen beschreibt Cramer (2016). Inwieweit das im Herbst 2016 von der Firma senseFly auf den Markt gebrachte System S.O.D.A den Anspruch auf ein metrisches System erfüllt, ist derzeit nicht bekannt. Beworben wird die Kamera mit dem Hinweis „die erste für professionelle Drohnen-Photogrammetrie konzipierte Kamera“ zu sein (senseFly 2016) (Abb. 7).

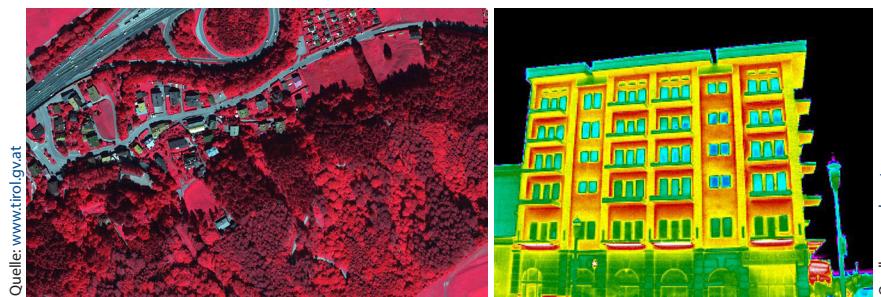
3.6 Multispektrale Kameras

Multispektrale Kameras sind bildbasierte Sensoren, die die Datenerfassung über das sichtbare Spektrum hinaus erweitern (Abb. 8).

Dabei existieren Systeme, die einerseits im Bereich des nahen Infrarot (red edge, 690–730 nm; NIR, 700–1.200 nm) und andererseits im Bereich der thermalen Strahlung (3 µm bis 14 µm) eingesetzt werden. Das NIR wird dabei zur Erfassung von Vegetationszuständen, z. B. zur Waldschadensanalyse, eingesetzt, während das thermale Infrarot zur Dokumentation von Wärmestrahlung, z. B. bei der Erfassung von Wärmebrücken in Gebäuden, Anwendung findet (Abb. 9).



→ Abb. 8:
Vegetations-Reflektionsgrad im sichtbaren und IR-Spektrum



Quelle: www.biantax.com

Für Anwendungen im UAV-Sektor stehen zwischenzeitlich verschiedenste Kameras zur Verfügung, die auch von diversen Plattform-Anbietern in die UAV-Systeme adaptiert worden sind (Abb. 10 und Tab. 7).



Abb. 10: Multispektral-kameras:
Oben: Parrot Sequoia.
Unten: Workswell WIRIS –
Zenmuse XT / (FLIR VUE PRO)

Tab. 7: Technische Daten multispektrale Kameras

Kamera	Parrot Sequoia	Workswell WIRIS	Zenmuse XT / (FLIR VUE)
Sensor	Grün – Rot – Red Edge – NIR	Thermal: Ungekühlter VOx Microbolometer	Thermal: Ungekühlter VOx Microbolometer
Spektrales Band	530–810 nm	7.5–13.5 µm	7.5–13.5 µm
Sensorauflösung	1280 * 960 (4x)	336 * 256 / 640 * 512	336 * 256 / 640 * 512
Pixelgröße	3.75 µm	17µm	17µm
RGB Sensor	4608 * 3456 pixel	1600 * 1200 pixel	–
Bildwiederhol-frequenz	2 Hz / 1 Hz (RGB)	30 Hz (NTSC); 25 Hz (PAL)	30 Hz (NTSC); 25 Hz (PAL)
Brennweite	3.98 mm / 4.9 mm (RGB)	k. A.	9–19 mm
Fokus	k. A.	MF	MF
Messgenauigkeit	–	±2 °C / ±2 %	±5 °C / ±5 %
Betriebstemperatur	–10 °C bis +45 °C	–15 °C bis +50 °C	–20 °C bis +50 °C
Field of View (FOV)	89.6° / 73.5° (RGB)	45° * 37°	62° * 49°– 32° * 24°
Maße	59 * 41 * 30 mm zzgl. ¹ 40 * 47 * 19 mm	139 * 84 * 69 mm	103 * 74 * 102mm
Gewicht	ca. 107 g	ca. 400 g	270 g
Preis	ca. 3900 €	7000–10000 €	5000–12000 €
Farbtiefe	k. A.	16 bit	8/16 bit
Bild-Format	4 bands: RAW 10-bit TIFF RGB: JPG	JPG	JPG / TIFF
Video-Format	k. A.	Ja	MOV

¹ Maße des externen Sonnenschein-Sensors

4 Fazit

Die Qualität der Sensorik ist einer der „Schlüssel“-Parameter in jeder geodätisch-photogrammetrischen Anwendung. Der Sensor ist der bestimmende Faktor für die Güte der Daten, welche wiederum die Eingangsgrößen für nachfolgende Prozessierungen darstellen. Der Wahl des Sensors – hier der digitalen Kamera – kommt folglich eine erhebliche Bedeutung zu.

Der Markt der Digitalkameras unterliegt einer enormen Entwicklungsdynamik, so dass der Nutzer häufig vor „der Qual der Wahl“ – ein bestmögliches System auszuwählen – steht, welches zudem kompatibel mit der verfügbaren oder zu beschaffenden UAV-Plattform sein soll. Der vorliegende Beitrag kategorisiert Systeme und gibt einen Überblick aktueller Kameras, die derzeit von UAS-Herstellern genutzt werden. Hierzu wird eine Vielzahl beschreibender fotografischer und technischer Parameter aufgestellt, die einen Vergleich ermöglichen sollen.

Aus Sicht der Photogrammetrie bilden die aufgeführten Parameter den Rahmen für die geometrischen und radiometrischen Eigenschaften einer Kamera. Letztlich geben sie jedoch keine Auskunft über die Stabilität und Metrik des Sensors, die entscheidend für den mathematischen Rekonstruktionsprozess im Rahmen der Bildtriangulation ist. Derartige Informationen lassen sich ausschließlich über entsprechende instrumentelle Untersuchungen beschaffen.

Literatur

- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): Neufassung der Gemeinsamen Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtssystemen gemäß § 20 Absatz 1 Nummer 7 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). In: Nachrichten für Luftfahrer, 20. Juli 2016, 1-786-16.
- Brantax.com (2016): www.brantax.com/brantax-services/services/aerial-photography/infrared-thermal-photos, letzter Zugriff 12.12.2016.
- Cramer, M.; Leinss, B. (2016): Welche ist am besten? – Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg 2016, S. 97–118.
- DJI Innovations (2016): DJI-Website. www.dji.com/de, letzter Zugriff 9.11.2016.
- dkamera (2016): Vergleich DJI-Kameras. www.dkamera.de/news/dji-stellt-die-mft-copterkameras-zenmuse-x5r-und-x5-vor, letzter Zugriff 13.11.2016.
- Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. Zeitschrift für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (PFG). Heft 1, 2016.
- Kraft, T.; Geßner, M.; Meißner, H.; Przybilla, H.-J.; Gerke, M. (2016): Introduction of a photogrammetric camera system for UAV with highly accurate GNSS/INS information for standardized workflows. Eingereichter Beitrag auf der EuroCOW 2016, Lausanne, Switzerland, 10.–12.2.2016. www.eurocow.org.
- Przybilla, H.-J.; Reuber, C.; Bäumker, M.; Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. – 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 24: 45–54.
- senseFly (2016): S.O.D.A. Kamera. www.sensfly.com/drones/accessories.html, letzter Zugriff 12.12.2016.

Tirol.gv.at (2016): https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/sicherheit/geoinformation/Orthofotos/2424_5003_2008_cir2.jpg, letzter Zugriff 12.12.2016.

Vision-Doctor (2016): CMOS-Sensoren. www.vision-doctor.de/kamera-grundlagen/cmos-sensor.html, letzter Zugriff 30.11.2016.

Wikipedia (2016): Bildsensoren. <https://de.wikipedia.org/wiki/Bildsensor>, letzter Zugriff 13.11.2016.

Kontakt

Heinz-Jürgen Przybill
Hochschule Bochum, Labor für Photogrammetrie
Lennershofstraße 140, 44801 Bochum
heinz-juergen.przybill@hs-bochum.de

Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme

Michael Cramer | Heinz-Jürgen Przybilla | Henry Meißner | Karsten Stebner

1 Einführung

Die UAV-basierte Bildaufnahme hat sich mittlerweile zu einem etablierten Aufnahmeverfahren in der Photogrammetrie etabliert und wird z.B. auch im Rahmen der Landesvermessung für die kleinräumige Kartierung verwendet. Die UAV-Technologie wird aber auch im klassisch ingenieurtechnischen Umfeld eingesetzt und ersetzt dort die bisherigen punktbasierte Objektaufnahmen mittels Tachymetern. Damit werden photogrammetrische Aufnahmeverfahren zunehmend auch in – bezogen auf die Genauigkeit – sehr anspruchsvollen ingenieurgeodätischen Anwendungsszenarien verwendet. Neben der korrekten Aufnahmegerometrie und Auswertung ist hier auch die Wahl des Kamerasystems von Bedeutung, da die Kamera als bildgebender Sensor die Beobachtungen liefert, aus denen die späteren Produkte (z.B. 3D-Objektpunkte, 3D-Punktwolken) berechnet werden. Die Qualität der Messung hat unmittelbare Auswirkungen auf die Qualität des Produkts.

Ein weiterer Punkt im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung ist die Bestimmung der Kamerageometrie. Der reale Abbildungsprozess muss genau bekannt sein, um den Strahlenverlauf mathematisch exakt zu modellieren. Erst so können die 3D-Objektdaten mit der geforderten Genauigkeit photogrammetrisch rekonstruiert werden. Die Kalibrierung der Kamera liefert diese Information. Sie wurde in der klassischen Photogrammetrie entkoppelt von der eigentlichen Bildaufnahme (i. d. R. Laborkalibrierungen), für UAV-Anwendungen sind aber Verfahren vor Ort notwendig.

Im folgenden [Kap. 2](#) wird daher zunächst grundsätzlich auf die photogrammetrische Kamerakalibrierung eingegangen. Die verschiedenen Kalibrierungsverfahren werden im Rahmen der exemplarischen Untersuchungen in [Kap. 3](#) an praktischen Beispielen illustriert. [Kap. 3.1](#) analysiert das Auflösungspotenzial von Kameras. Die geometrische Auflösung ist ein Maß für den Detailgehalt eines Bildes, unter Berücksichtigung der Optik und der Aufnahmebedingungen. Je höher das Auflösungsvermögen umso besser die radiometrische Qualität der Kamera. Gute Kameraradiometrie ist vorteilhaft für die automatische Punktmessung. Daher soll das Auflösungsvermögen auch als weiteres Qualitätskriterium zur Beurteilung einer Kamera herangezogen werden.

2 Geometrie eines Bildes

Die Erfassung von Sensordaten mittels Kamerasystemen basiert im einfachsten Fall auf dem Lochkameramodell (siehe z.B. Wolf 1974). Geraffte verlaufenden Lichtstrahlen, die von einem von einer Lichtquelle beleuchteten Objekt reflektiert werden, treffen auf die Öffnung der Lochkamera und erzeugen auf deren Rückwand eine umgekehrte Abbildung. Hier entsteht das Bild, welches durch ein auf der Rückwand platziertes lichtempfindliches Element erfasst werden kann. Die Schärfe des Bildes wird festgelegt vom Durchmesser der Öffnung. Je kleiner der Durchmesser, umso scharfer der Bildpunkt, unter Vernachlässigung von Beugungseffekten, die bei sehr kleinen Durchmessern vor allem für langwelliges Licht auftreten. Wegen der fehlenden Bündelung der Lichtstrahlen kann das Bild einer Lochkamera niemals ganz scharf sein. Das Bild ist eine ideale Projektion der 3D-Objekte, da das einfache Lochkameramodell etwaige Verzerrungen und Verwischungseffekte durch Defokussierung vernachlässigt. Objektpunkt, Bildpunkt und Öffnung der Lochkamera definieren eine gerade Linie im Raum. Die Abbildung entspricht genau der zentralen Projektion.

Das Loch hat den Nachteil, dass idealerweise nur ein einziger Strahl aus dem von dem Objektpunkt reflektierten Bündel von Lichtstrahlen den entsprechenden Bildpunkt bildet. Daher können nur sehr wenige Abbildungsstrahlen für die Abbildung genutzt werden, die entstehenden Bilder sind sehr lichtschwach bzw. erfordern lange Belichtungszeiten. Dieses ist der Hauptgrund zur Verwendung von Linsen im Rahmen der optischen Abbildung. Durch die Verwendung einer Linse (bzw. komplexeren Linsensystemen) können nun mehrere Strahlen, die von einem Objektpunkt stammen, gebündelt werden. Das erhöht die fotografische Qualität der Abbildung, durch die nicht idealen Linsen kommt es aber zu Abweichungen von der perfekten zentralen Projektion. Diese Linsenfehler müssen im Rahmen der Kalibrierung bestimmt und ggf. korrigiert werden. Im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung wird das perspektive Abbildungsmodell zugrunde gelegt. Abweichungen von diesem Modell, z.B. durch Linsenverzeichnungen, werden unmittelbar auf die Genauigkeit der Objektpunktbestimmung übertragen. In der geometrischen Kamerakalibrierung werden diese Verzeichnungseffekte bestimmt. Weitere Linsen- bzw. Abbildungsfehler wie z.B. chromatische Aberrationen, Astigmatismus oder Verschmierung sind eher der Radiometrie zuzuordnen und werden hier nicht weiter diskutiert.

2.1 Kamerakalibrierung

Laut allgemeiner Begriffsdefinition in Wikipedia bezeichnet „Kalibrierung ... in der Messtechnik“ den „Messprozess zur zuverlässig reproduzierbaren Feststellung und Dokumentation der Abweichung eines Messgerätes oder einer Maß-

verkörperung gegenüber einem anderen Gerät oder einer anderen Maßverkörperung, die in diesem Fall als Normal bezeichnet werden“ (Wikipedia 2016). Im Handbuch der Photogrammetrie (Slama et al. 1980) wird die Kalibrierung definiert als „der Akt oder der Prozess der Bestimmung bestimmter spezifischer Messungen in einer Kamera oder einem anderen Instrument oder Gerät gegenüber einem Standard, zur Verwendung bei der Korrektur oder Kompensation von Fehlern oder zum Zwecke der Aufzeichnung“. Die photogrammetrische Kamerakalibrierung als Spezialisierung des vorstehend genannten Terminus beschreibt die „Bestimmung der kalibrierten Brennweite, die Lage des Hauptpunktes, den Symmetriepunkt, die räumliche Auflösung der Linse, den Ebenheitsgrad der Brennebene und die Linsenverzerrung, die auf die jeweilige kalibrierte Brennweite bezogen ist.“ Aus photogrammetrischer Sicht soll im Rahmen der Kalibrierung der reale Abbildungsvorgang bestmöglich beschrieben werden, d. h. die Abweichungen vom idealen zentralperspektivischen Abbildungsmodell sind zu ermitteln. Sobald die Kalibrierung bekannt ist, kann ausgehend von der Bildpunktmeßung im Sensorkoordinatensystem der dreidimensionale Abbildungsstrahl zu jedem Objektpunkt rekonstruiert werden.

Im klassischen eher geometrielastigen photogrammetrischen Kontext meint Kalibrierung i. d. R. die Bestimmung der Kamerageometrie. Kamerakalibrierung erfolgt aber auch radiometrisch. Die Kalibrierung der Radiometrie ist vor allem für die fernerkundlichen Fragestellungen von Bedeutung. Klassischerweise erfolgt dazu eine Kalibrierung im Labor, bei der die Kamera auf eine definierte (Referenz-)Lichtquelle ausgerichtet wird. So kann durch einfachen „Soll-Ist-Vergleich“ die Radiometrie der Kamera bestimmt werden, die ggf. durch Feldvergleich verifiziert wird. Wie in Przybilla (2017) erwähnt, werden multi- bzw. hyperspektrale Kamerasysteme auch für UAV-Anwendungen genutzt, z. B. für Anwendungen in der Landwirtschaft. Die radiometrische Kalibrierung wird hier aber nicht weiter vertieft.

Die i. d. R. großformatigen photogrammetrischen Kameras, die speziell für photogrammetrische Anwendungen konzipiert wurden, werden oftmals an speziellen Labormessplätzen kalibriert (sog. (photo-)Goniometer bzw. speziell konzipierte (3D-)Testfelder). Die Laborkalibrierung beruht auf der Annahme, dass die Geometrie des Systems über einen bestimmten Zeitraum stabil bleibt; erst dann ist eine Vorabkalibration sinnvoll. Die laborbasierte Kalibrierung erfolgt entkoppelt von der eigentlichen Bildaufnahme im Projektgebiet. Bei Verwendung von Testfeldern mit bekannten Koordinaten und/oder Abständen wird eine Testfeld-Kalibrierung durchgeführt (Luhmann 2000). Grundsätzlich können solche Prüf- oder Testfelder aber auch im Projektgebiet, d. h. im unmittelbaren zeitlichen und räumlichen Zusammenhang mit der eigentlichen Messung eingesetzt werden. Dieses leitet über zum alternativen Verfahren der sog. Selbstkalibrierung, in dem die Kalibrierparameter bei geeigneter Aufnahmekon-

figuration aus den für die Objektmessung aufgenommenen Fotografien selbst bestimmt werden. Der Ansatz kombiniert die Kalibrierung des Testortes mit dem Objektrekonstruktionsprozess. Dies führt zu Kalibrierparametern, die für die Aufnahmekonfiguration des entsprechenden Projekts optimal sind. Andererseits ist dieses Verfahren der einzige mögliche Weg, die Geometrie solcher Kameras zu bestimmen, die aufgrund ihrer Konstruktion nicht vorab kalibrierbar sind. Dieses trifft auf fast alle Kameras zu, die im Zuge von UAV-Anwendungen heutzutage verwendet werden. Da sich die Selbstkalibrierung bzw. Testfelder vor Ort mit den vor Ort aufgenommenen Fotografien befassen, können die Verfahren als in-situ-Kalibrierungsansätze klassifiziert werden.

2.2 Kalibriermodelle

Mathematisch wird die Selbstkalibrierung als erweiterte Bündeltriangulation formuliert, in der die Kalibrierterme als zusätzliche unbekannte Parameter in den Ausgleichungsprozess integriert werden. In klassischer photogrammetrischer Notation werden die Zusatzparameter als Zuschläge $\Delta x'$, $\Delta y'$ zu den Bildkoordinaten verstanden. Die Gl. 1 zeigt die erweiterte Kollinearitätsgleichung. Werden die Abbildungsgleichungen im Sinne der projektiven Geometrie formuliert, werden die zusätzlichen Parameter in der erweiterten Kameramatrix berücksichtigt (Gl. 2).

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 - c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 - c \cdot \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}] \cdot \mathbf{X} \quad \text{mit} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} c & c \cdot s & x'_0 + \Delta x' \\ 0 & c \cdot (1+m) & y'_0 + \Delta y' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Für die Kalibrierung von Kameras in UAV-Anwendungen werden im Regelfall physikalisch motivierte Zusatzparameter angenommen. Das bedeutet, man formuliert die Zuschläge in der Art, dass sie auf physikalische Ursachen, also Fehler der realen Abbildung rückführbar sind. Die in der Regel vorgenommenen Korrekturen umfassen Änderungen in der Kamerakonstante und im Bildhauptpunkt, Verzeichnungskorrekturen (radial und tangential), ggf. ergänzt um weitere Effekte wie Affinität und Scherung und Nicht-Planlage des Sensors.

Brown (1976) entwickelte ein derartiges physikalisch motiviertes Korrekturmödell, ursprünglich für die Kalibrierung von Kameras für Nahbereichsanwendungen. Die Gesamtkorrektur setzt sich additiv aus den verschiedenen Anteilen wie folgt zusammen (Gl. 3), wobei der Index i für die Parameter der inneren Orientierung, der Index r für die Parameter der radialen Verzeichnung, der Index d für die tangentiale Verzeichnung, der Index a für Affinität und Scherung, und die Indizes f bzw. u für sonstige Verzeichnungen innerhalb bzw. außerhalb der Bildebene stehen. Die individuellen Korrekturen für radiale bzw. tangentiale Verzeichnungen sind exemplarisch in Gl. 4 angegeben. Oftmals werden für die radiale Verzeichnung drei zusätzliche Parameter K_i bzw. für die tangentiale Verzeichnung zwei Parameter P_i eingeführt.

$$\begin{aligned}\Delta x' &= \Delta x_i + \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_a + \Delta x_f + \Delta x_u + \dots \\ \Delta y' &= \Delta y_i + \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_a + \Delta y_f + \Delta y_u + \dots\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\Delta x_r &= \bar{x} \cdot (r^2 K_1 + r^4 K_1 + r^6 K_3 + \dots) \\ \Delta y_r &= \bar{y} \cdot (r^2 K_1 + r^4 K_1 + r^6 K_3 + \dots) \\ \Delta x_d &= (r^2 + 2\bar{x}^2) P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 \\ \Delta y_d &= 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2) P_2\end{aligned}\quad (4)$$

Die beiden letzten Korrekturanteile in Gl. 3 für Unebenheiten der Bildebene wurden von Brown als mathematisches Korrekturpolynom angesetzt. Dieses verknüpft das eigentlich physikalisch motivierte Modell mit denjenigen Verfahren, die sich auf rein mathematisch formulerte Korrekturen verlassen. In diesem Zusammenhang sind vor allem orthogonale Polynome (siehe Ebner 1976, Grün 1978, Tang 2013) zu nennen.

Die Abb. 1 und Abb. 2 zeigen exemplarisch die Kameradefinition in den für UAV-Auswertungen häufig verwendeten Softwarepaketen Pix4Dmapper bzw. Photoscan. Neben den Parametern der inneren Orientierung (Bildhauptpunkt bzw. kalibrierte Brennweite) werden im Rahmen der Selbstkalibrierung weitere Verzeichnungsterme eingeführt. Pix4D verwendet bis zu drei radiale Verzeichnungen R1, R2, R3 und zwei tangentiale Verzeichnungen T1 und T2. Agisoft erlaubt weitere höherwertige Korrekturen in radialer und tangentialer Richtung (zusätzliche Terme k4 bzw. p3, p4), darüber hinaus auch die Korrektur von Affinität und Scherung b1, b2. Beide Pakete implementieren das Korrekturmödell von Brown (Gl. 3 und Gl. 4), wobei die Anzahl der Korrekturen unterschiedlich sein kann.

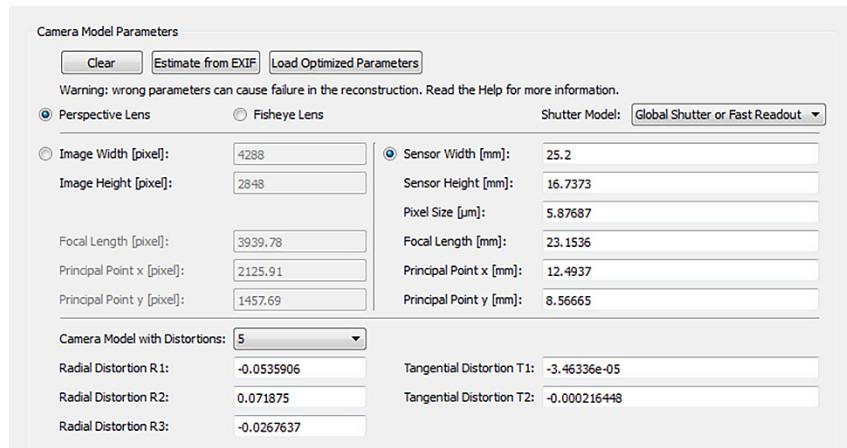


Abb. 1: Kameradefinition in Pix4D Pix4Dmapper Pro Software

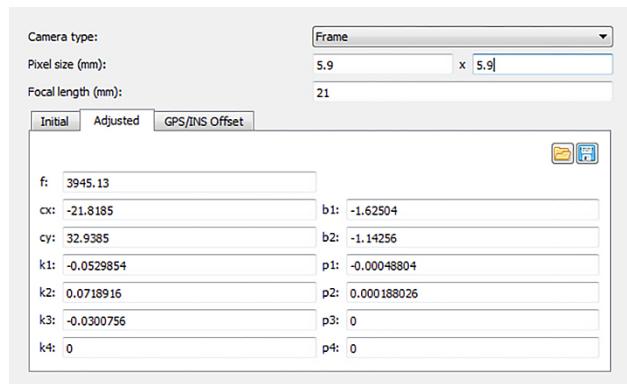


Abb. 2:
Kameradefinition in
agisoft Photoscan
Software

Darüber hinaus erlauben beide Auswerteprogramme auch die Modellierung von Fischaugen-Abbildungen. Diese unterliegen nicht mehr dem perspektiven Kameramodell und müssen daher auch mit adaptierten Korrekturen kalibriert werden. Darauf wird im Rahmen dieses Beitrags jedoch nicht weiter eingegangen.

Die Auswahl der zusätzlichen Parameter hängt nicht nur von der verwendeten Kamera, sondern auch von dem für die Selbstkalibrierung zur Verfügung stehenden Bildverband ab. Oftmals treten Korrelationen zwischen den Korrekturparametern untereinander und den Parametern der äußeren Orientierung auf. Je nach Blockgeometrie sind diese Korrelationen unterschiedlich stark ausgebildet. Die Korrelationen führen dazu, dass die geschätzten Korrekturtermen nicht für sich getrennt, sondern immer als Komplettsatz betrachtet werden

müssen. Auch ist eine Übertragbarkeit auf einen anderen Anwendungsfall nur bedingt möglich, da je nach Blockgeometrie ggf. nicht exakt zwischen Einfluss von Orientierungs- bzw. Kalibrierparametern getrennt werden kann. In Kap. 3.3 werden die speziellen Anforderungen an die Blockgeometrie diskutiert.

3 Exemplarische Untersuchung von UAV-Kameras

Im aktuellen UAV-Umfeld werden oftmals klassische Consumer-Kameras eingesetzt. Die maximale mögliche Zuladung (Nutzlast bzw. maximales Abfluggewicht MTOW) eines UAVs ist eine kritische Komponente, die dazu führt, dass bevorzugt kleine, kompakte Kameras zur Verwendung kommen. Przybilla (2017) klassifiziert die gängigen Systeme in proprietäre Kamerasysteme, Kompaktkameras, Systemkameras, Spiegelreflexkameras (DSLR) und weitere (z. B. multi-/hyperspektrale) Kameras. Hinzu kommen Kamerasysteme, die lt. Herstellerangaben speziell für photogrammetrische Anwendungen konzipiert wurden, also als „metrische“ Kameras zu bezeichnen sind (Przybilla 2017).

3.1 Auflösungsuntersuchung

Der Begriff der Auflösung beschreibt in der Fotografie die Fähigkeit eines optischen Systems zwei benachbarte Punkte oder Linienelemente zu erfassen und sie gleichzeitig eindeutig, voneinander unterscheidbar abzubilden. Die Auflösung von optischen Systemen ist durch die physikalischen Beugungseffekte des Lichts und durch sphärische Aberration begrenzt. Eine Möglichkeit zur Festlegung auf eine Größenordnung dieser Grenze ist das Rayleigh-Kriterium, das die Bedingung für den Mindestabstand zweier benachbarter Lichtquellen definiert. Werden Kameras in UAV-Anwendungen eingesetzt, dann kommen weitere die Auflösung beeinflussende Effekte hinzu, wie z. B. der Einfluss der Atmosphäre und die Unschärfe durch die Vibrationen bzw. Bewegung der Kamera während der Bildaufnahme.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der tatsächlichen Auflösung wurde von (Becker et al. 2005) vorgestellt. Dieses Verfahren berechnet für einen abgebildeten Siemensstern die Modulationstransferfunktion (MTF) und die Punktverschmierungsfunktion (PSF) durch Auswertung mehrerer, konzentrisch in den Siemensstern geschätzter Ringe. Aus MTF bzw. PSF lassen sich dann Auflösungsmaße bezogen auf den Objektraum bestimmen. Die Standardabweichung der Punktverschmierungsfunktion bezieht sich im Gegensatz dazu auf den Bildraum, und kann ebenfalls als objektives Maß für das Auflösungspotenzial des Kamerasystems herangezogen werden.

3.1.1 De-Mosaikierung

Im Regelfall werden bei den für UAV-Anwendungen eingesetzten Kameras die Farbinformationen durch die Verwendung von sog. Bayer-Filtern generiert. Die überwiegende Mehrheit der Farbkameras verwendet zum Erfassen von Farbinformation Mikrofilter, die auf jedem einzelnen Pixel des Sensors aufgebracht wurden. Die Anordnung dieser Mikrofilter wird häufig für eine Zeile im Wechsel mit einem grünen und einem roten Filter und für die nachfolgende Sensorzeile im Wechsel zwischen einem blauen und einem grünen Filter arrangiert und anschließend abwechselnd fortgesetzt. Es liegt also zunächst ein fraktales Farbmuster vor, das durch die sogenannte De-Mosaikierung (engl.: de-mosaicing) in ein echtes Farbbild überführt wird.

Um diese fraktalen Muster in ein echtes Farbbild (RGB-Bild) zu überführen, gibt es zahlreiche Algorithmen. Die einfachste Methode ist, ausgehend von einer bilinearen Nachbarschaft für jedes Pixel einen RGB-Farbwert zu interpolieren. Andere Verfahren verwenden zusätzliche Informationen, wie z. B. Farbartefakte und Aliasing-Effekte, um die Interpolationsrichtung zu bestimmen (Hirakawa und Parks 2005). Ein weiteres Beispiel ist die Methode von Malvar et al. (2004), bei der Helligkeitsänderungen, insbesondere an Farbkanten berücksichtigt werden, um auf einen RGB-Wert zu schließen. Diese Verfahren, die zusätzliche Informationen nutzen, um das Farbbild zu schärfen können mitunter Begleiterscheinungen mit sich bringen. So ist es zum Beispiel möglich, dass in homogenen Bildbereichen Farbartefakte entstehen, die sowohl bei der Aerotriangulation also auch bei der Stereoverarbeitung zu Zuordnungsfehlern führen können. Die Wahl der De-Mosaikierungsmethode ist daher nicht zwangsläufig zu Gunsten der besten Auflösung eindeutig zu treffen.

Die Abb. 3 zeigt für eine Kamera (Ricoh GXR Mount A12 mit Zeiss Biogon 21/2.8 Objektiv) den Einfluss des gewählten Verfahrens auf die Auflösung. Angegeben ist der Wert σ_{PSF} in Pixel, der den unmittelbaren Vergleich der Verfahren ermöglicht. Bei der hier untersuchten Kamera handelt es sich um eine Systemkamera, die auch in Cramer und Leinss (2016) schon Thema war.

Die folgenden unterschiedlichen Verfahren zur De-Mosaikierung wurden auf ein und dasselbe Bild der obigen Kamera angewandt. Nachfolgend sind diese Verfahren nur als Aufzählung bzw. mit kurzer Erläuterung unter Hinweis auf weiterführende Literatur angegeben:

- AHD-Verfahren, Nutzung von Farbartefakten und Aliasing-Effekten zur Bestimmung der Interpolationsrichtung (Hirakawa und Parks 2005).
- DCB-Verfahren, OpenSource Implementierung von Gózdź (2009) aus dem Bereich der Fotografie.
- Lineares Verfahren, bilineare Nachbarschaft und bilineare Interpolationsrichtung als De-Mosaiking-Methode.

- VNG-Verfahren, schwellwertbasiertes Verfahren zur Bestimmung variabler Interpolationsrichtungen und Interpolationsschritten (Chang et al. 1999).
 - PS-Auto, Automatikfunktion von Photoshop; die Parameter zur De-Mosaikierung werden komplett Photoshop überlassen.
 - PS-Cap, Photoshop-Verfahren, welches die Parameter der Kamera übernimmt, die im Rohbild hinterlegt werden und dann die De-Mosaikierung vornimmt.
- Abb. 3:** Einfluss der De-Mosaikierung auf die Auflösung σ_{PSF} [pix] (Labortest am DLR Berlin)
-
- | Method | red | green | blue |
|---------------|------|-------|------|
| libRAW_AHD | 0.32 | 0.34 | 0.33 |
| libRAW_DCB | 0.32 | 0.34 | 0.33 |
| libRAW_LINEAR | 0.48 | 0.41 | 0.48 |
| libRAW_VNG | 0.37 | 0.36 | 0.39 |
| PS_auto | 0.31 | 0.31 | 0.32 |
| PS_cap | 0.31 | 0.32 | 0.32 |

Abb. 3 zeigt deutlich, dass das Auflösungsvermögen des de-mosaikierten Bildes je nach Verfahren signifikant anders ausfallen kann. Die Variation beträgt in diesem Fall bis zu 40 %.

3.1.2 Empirische Auflösungsuntersuchungen

Nachfolgend sind für verschiedene Kamerasysteme, die häufig in UAV-Anwendungen zum Einsatz kommen, derartige Auflösungsuntersuchungen exemplarisch durchgeführt worden. Die Kameras stehen stellvertretend für proprietäre Systeme, System- bzw. Spiegelreflexkameras. Die entsprechenden Aufnahmeparameter der späteren Messung sind ebenfalls angegeben:

- dji Phantom 3 Advanced mit proprietärem DJI 3.6 f2.8 Objektiv, Bildformat 4.072×3.022 pix @ 1,55 mm, Öffnungswinkel (diagonal) 95° ; Aufnahmeparameter: Entfernung 11,7 m, ISO 100, Blendenzahl f/2.8, Belichtungszeit 100 ms.
- Sony Alpha 7R mit Voigtländer Skopar 35/2.5 Objektiv, Bildformat 7.952×5.304 pix @ 4,87 mm, Öffnungswinkel (diagonal) $67,2^\circ$; Aufnahmeparameter: Entfernung 36 m, ISO 100, Blendenzahl f/5.6, Belichtungszeit 50 ms.

- Canon EOS 5DS R mit Canon EF 35 mm f/1.4 Objektiv, Bildformat 8.688×5.792 pix @ 4,14 mm, Öffnungswinkel (diagonal) 63,4°; Aufnahmeparameter: Entfernung 42,3 m, ISO 100, Blendenzahl f/4, Belichtungszeit 25 ms.

Die Tests fanden unter kontrollierten Lichtbedingungen in einer Laborumgebung statt, um die Auflösungen direkt vergleichen zu können. Die Kameras waren jeweils auf einem Stativ montiert, um jegliche Unschärfen aufgrund von Bewegungen auszuschließen. Der Testaufbau kann aus der Abb. 4 ersehen werden. Der Abstand der Kameras zum Siemensstern wurde dabei derart gewählt,



Abb. 4: Testaufbau zur Bestimmung des geometrischen Auflösungspotenzials von UAV-Kamerasystemen (Labortest am DLR Berlin)

dass die nominelle Objektpixelgröße (GSD) für alle Kameras etwa 5 mm betrug. Um die eventuelle Veränderung der Auflösung in Abhängigkeit von der Lage des Punktes in der Fokalebene zu untersuchen, wurden pro Kamera drei Bilder aufgenommen. Im ersten Bild wurde die Kamera so ausgerichtet, dass der Siemensstern zentral in der Bildmitte abgebildet ist (siehe Abb. 4 rechts), anschließend wurde die Kamera in Richtung der Bilddiagonale verschwenkt und zwei weitere Bilder aufgenommen. Eines der Bilder bildet den Siemensstern in etwa der Mitte der halben Bildschirmdiagonale ab, das dritte Bild dann in der entsprechenden Bildecke.

Wenn im weiteren Verlauf von Qualität der Kamera geschrieben wird, so bezieht sich dieses selbstverständlich immer auf das Gesamtsystem, das heißt die Kombination von Optik im Zusammenspiel mit dem Kamerakörper. Wird die hier untersuchte Canon- bzw. Sony-Kamera mit einem anderen Objektiv kombiniert, so ergeben sich in Abhängigkeit von der Qualität der Optik andere Auflösungswerte. Dieses ist bei der Verallgemeinerung der hier ermittelten Genauigkeiten unbedingt zu beachten.

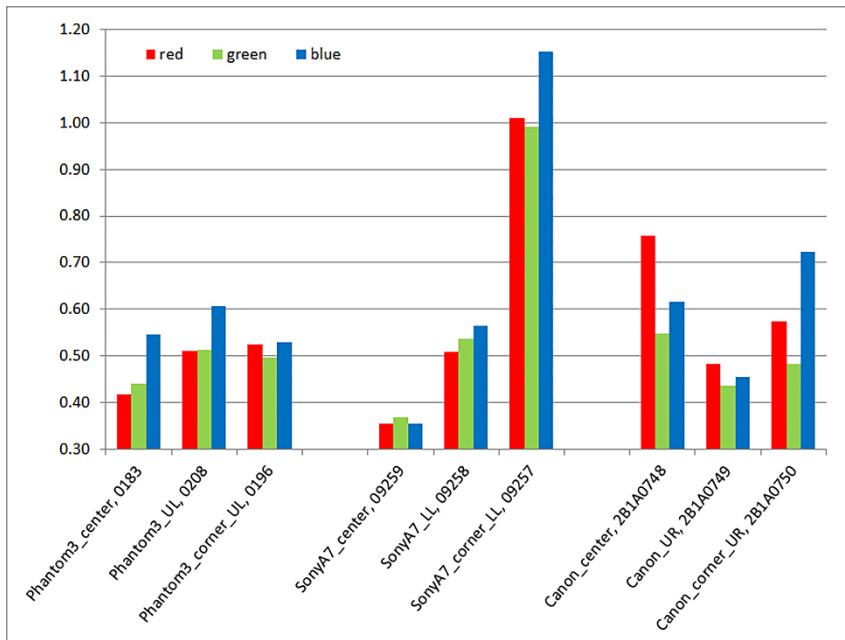


Abb. 5: Auflösung σ PSF [pix] für drei ausgewählte Kamerasyteme (Labortest am DLR Berlin)

Die Abb. 5 zeigt die resultierende Auflösungen σ PSF [pix], angegeben für die drei Farbkanäle. In allen Fällen wurde das De-Mosaikieren mit dem DCB-Verfahren unter Verwendung der libraw-Bibliothek durchgeführt (siehe Kap. 3.1.1). Das proprietäre System dji Phantom3 schneidet überraschend gut ab und zeigt vor allen Dingen kaum einen Randabfall. Die Auflösung über das gesamte Bildfeld ist ziemlich homogen. Die Kamera Sony-Alpha 7R in Kombination mit dem Voigtländer Objektiv zeigt für die Bildmitte die beste Auflösung, hat aber einen sehr starken Randabfall, was vermutlich durch die Optik verursacht wird. Die Canon EOS mit dem verwendeten 35 mm Objektiv zeigt ein etwas unerwartetes Auflösungsverhalten, hinzu kommen die vergleichsweisen schlechten Auflösungswerte. Für ein derartiges Kamerasytem sollten eigentlich kleinere σ PSF-Werte zu erwarten sein. Offensichtlich war die Kamera bei den Aufnahmen ungenau fokussiert. Die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen konnten in diesem Beitrag nicht berücksichtigt werden.

3.2 Testfeldkalibrierung im Labor

Kalibrierungen mittels Testfeld (siehe Kap. 2.1) bieten die Möglichkeit das geometrische Verhalten eines Kamerasytems über einen längeren Zeitraum oder

unter variablen Betriebsbedingungen zu prüfen. Das hier genutzte dreidimensionale Testfeld der HS Bochum hat eine Ausdehnung von ca. $14\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ und besteht aus ca. 500 räumlich verteilten, kodierten und nicht-kodierten Targets (Abb. 6). Die Bilderfassung bei der Kalibrierung erfolgt über einen höhen-gestaffelten „Halb-Rundverband“. Um eine Bestimmung der Hauptpunktlage sowie von Affinitäts- und Nicht-Orthogonalitätsparametern zu ermöglichen, beinhaltet der Datensatz um 90° , 180° und 270° gekantete Aufnahmen.

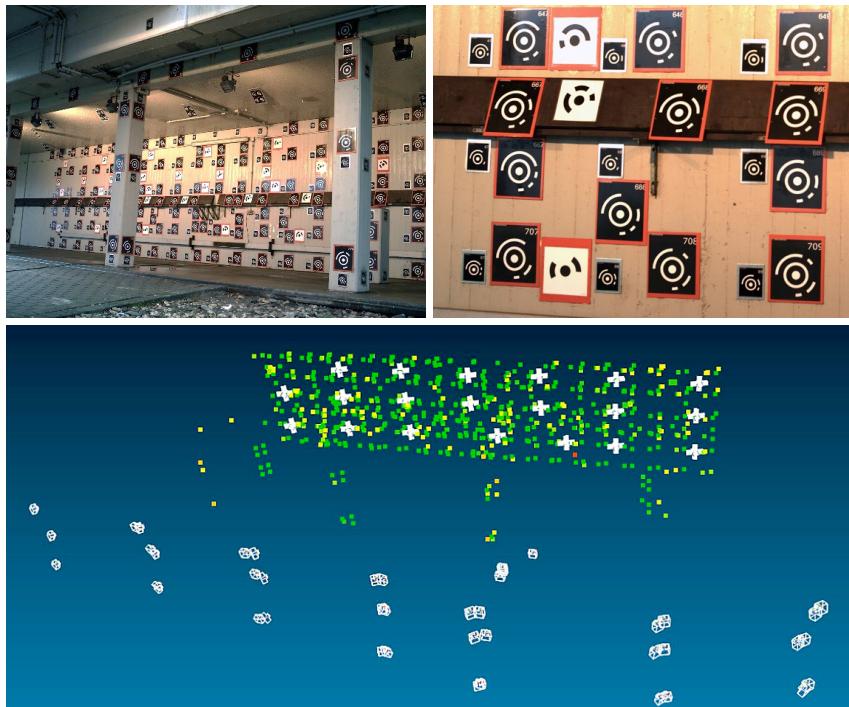


Abb. 6: Oben: 3D-Testfeld der Hochschule Bochum. Unten: Beispiel für eine Kalibrieranordnung im „Halb-Rundverband“

Die Kalibrierung erfolgt im Rahmen einer Bündelblockausgleichung mit der Software Aicon 3D-Studio. Abb. 7 zeigt am Beispiel eines DJI Inspire UAV die Mehrfachkalibrierung einer Zenmuse X5, ausgestattet mit einem Olympus Objektiv (M. Zuiko Digital ED 12 mm, siehe Przybilla 2017). Die Kamera wurde zu diesem Zweck in vier Epochen kalibriert, wobei das manuell fokussierte System – vergleichbar mit der Situation bei einer Objektvermessung – ein- und ausgeschaltet wurde („Akkuwechsel“). Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Kalibrierungen am Beispiel der Parameter „Kamerakonstante“ und „Bildhaupt-

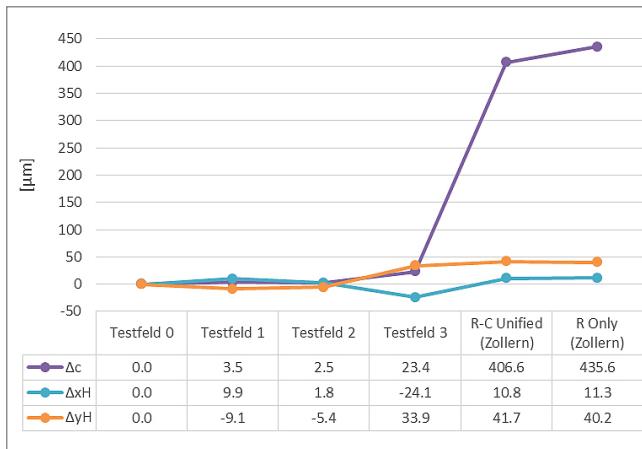


Abb. 7:
Veränderungen
der Parameter
„Kamerakonstan-
te“ und „Haupt-
punktlage“ nach
Kalibrierung am
3D-Labortestfeld
sowie aus einer
Selbstkalibrierung
beim Bildflug
(R-C Unified,
R only/Zeche
Zollern)

punktage“. Während die drei ersten Kalibrierfolgen vergleichsweise geringe Abweichungen aufzeigen, kommt es bei der vierten Kalibrierung zu erheblichen Änderungen in den Parametern, obwohl alle Aufnahmen der Testfeldkalibrierungen in einem unmittelbaren zeitlichen Zusammenhang gemacht wurden und auch die Blockgeometrie in allen vier Fällen vergleichbar ist (siehe Abb. 6 unten). Man kann diese Abweichungen als ein Indiz für die optisch-mechanische Instabilität der Kamera deuten. Die ebenfalls in Abb. 7 dargestellten Ergebnisse einer Selbstkalibrierung (siehe Kap. 2.2) im Testfeld Zollern (R-C Unified bzw. R only) bestätigen diese Annahme¹.

3.3 Selbstkalibrierung anhand von UAV-Bildflügen

Die Selbstkalibrierung ist ein Quasi-Standard bei der Triangulation von UAV-Bildverbänden, sie wird jedoch bezüglich ihrer Anforderungen auf die Geometrie des Blocks von vielen Anwendern nicht hinreichend gewürdigt. Eine zuverlässige Kalibrierung ist ausschließlich bei geeigneter Aufnahmekonfiguration möglich (Przybilla et al. 2015). Zuverlässige Kalibrierung bedeutet, dass die Kameraparameter physikalisch richtig bestimmt werden, sie also von den weiteren Unbekannten der äußeren Orientierung bestmöglich entkoppelt werden können. Nur so können die geschätzten Parameter auch für weitere Tests übernommen werden, sofern dieses beabsichtigt ist.

1 Der direkte Vergleich von Kalibrierparametern wie in Abb. 7 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.

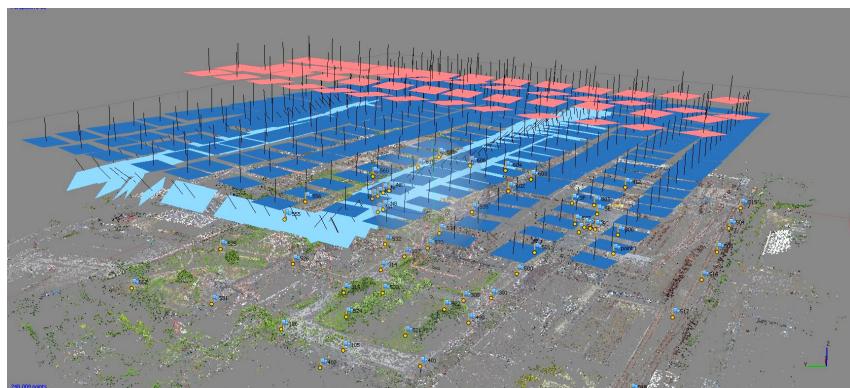


Abb. 8: Befliegungsanordnungen Testfeld Zollern: Nadir normal (**REGULAR**): dunkelblau – Nadir kreuz (**CROSS**): rot – Konvergent (**OBLIQUE**): hellblau

Abb. 8 zeigt die im Rahmen von Befliegungen mit der o. a. Zenmuse X5 ausgeführten Fluganordnungen im UAV-Testfeld „Zeche Zollern“ Dortmund. Neben der Normalanordnung (**REGULAR**) wurde der Block in unterschiedlichen Varianten um eine Kreuzanordnung (**CROSS**) und/oder konvergente Aufnahmen (**OBLIQUE**) ergänzt. Die zu bestimmenden Parameter der Inneren Orientierung wurden dabei wahlweise gruppiert (*Unified* – eine IORI für alle Bilder) bzw. separat betrachtet (*Separate* – jeweils eine IORI für die Teilblöcke). Insgesamt stehen 46 signalisierte Passpunkte zur Verfügung. Diese wurden mit einer Genauigkeit von besser 5 mm in der Ausgleichung berücksichtigt.

Die Auswirkungen der verschiedenen Konfigurationen auf die Qualität des Bildverbandes sind in **Abb. 9** dargestellt. Als Bewertungskriterien dienen die Restabweichungen (RMSE) an den Passpunkten (GCP). Alle Punkte wurden als Passpunkte verwendet, daher können keine Kontrollpunktendifferenzen ermittelt werden.

Die besten Ergebnisse liefert in der vorliegenden Anwendung die Kreuzbefliegung in Verbindung mit der Bestimmung einer gemeinsamen Inneren Orientierung (R-C Unified). Aufgrund der leicht unterschiedlichen Flughöhe können maßstabsabhängige Effekte von konstanten Offsets entkoppelt werden. Aufgrund der Nadirbildgeometrie ist auch eine gute Verknüpfung gewährleistet, was sich positiv auf die Blockgeometrie und Bestimmbarkeit der Parameter auswirkt. Vor diesem Hintergrund sollte die weitere Kombination mit dem Oblique-Block eigentlich noch bessere Ergebnisse liefern – ähnlich der Standardanordnung für die klassische Kamerakalibrierung an einem (ebenen) Testfeld. Dies ist aber nicht der Fall, wenn man die Variante R-C-O unified mit R-C unified vergleicht. Der Oblique-Winkel wurde mit etwa 45° gewählt, was ggf. zu einer geringeren Verknüpfung der schrägblickenden Bilder mit den Nadirbildern des R-C-Blocks

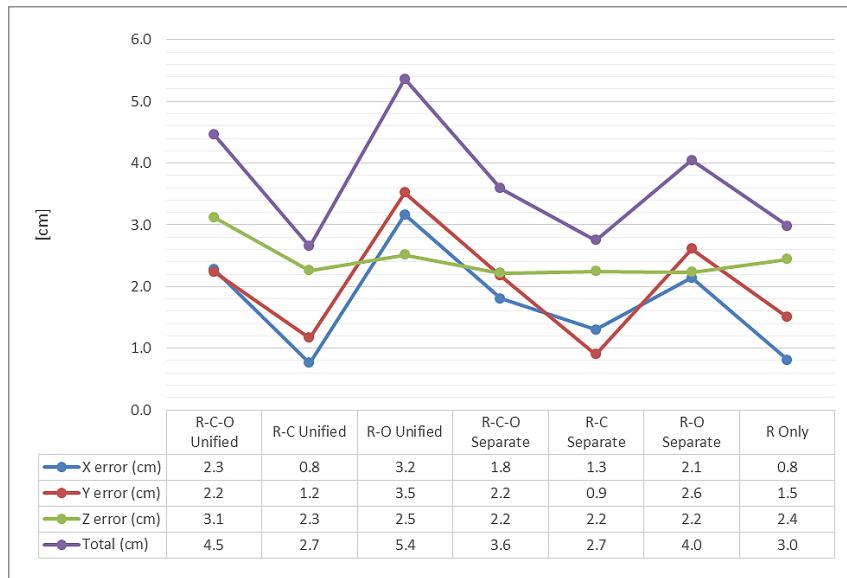


Abb. 9: Auswirkungen der Aufnahme- und Kalibrierkonfiguration auf Restabweichungen (RMSE) an Passpunkten (GCP)

führt. Werden für die Bildverbände mit Beteiligung der Oblique-Bilder je ein Satz Orientierungselemente separat eingeführt, so verbessern sich die Objektraumgenauigkeiten etwas, erreichen aber nicht die Genauigkeiten der R-C-Blockkombination. Im letzten Fall wird die Kalibrierung nur aus den Bildern der normalen Nadirbefliegung (R only) ermittelt. Die Genauigkeiten sind nur geringfügig schlechter (etwa 10 %), als die der R-C-Blockkombination. Das zeigt, dass oftmals schon die Kalibrierung aus nur einem regulären Bildverband ausreichend ist. Im Unterschied zum bemannten Bildflug weisen UAV-Bildblöcke größere Abweichungen von der Nadirrichtung auf (größere „off-nadir-Winkel“), was sich positiv auf die Geometrie und Bestimmung der Kalibrierungsparameter auswirkt.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurden die Verfahren der Kamerakalibrierung diskutiert. Zusätzlich wurde die geometrische Auflösung als ein weiteres Qualitätskriterium eines Kamerasytems bestimmt. Folgende Erkenntnisse sind für die Umsetzung in der Praxis von Relevanz:

- Fast alle der üblicherweise in UAV-Anwendungen eingesetzten Kameras zeigen signifikante Unterschiede wenn Labor- mit Testfeldkalibrierungen verglichen werden. Eine a priori Laborkalibrierung ist demnach nicht notwendig.
- Die Kalibrierung der Kamera mit den Verfahren der Vor-Ort-Selbstkalibrierung ist ausreichend, sofern der Block eine hinreichend gute Blockgeometrie vorweist. Im Regelfall sollten alle Blöcke mit einander überlagernden parallelen Streifen bzw. Rundumbildverbände mit großer Bildüberlappung aus Kopterflügen entsprechende Voraussetzungen mitbringen. Ggf. ist es hilfreich, die Kalibrierparameter nicht immer ausgehend von Nullwerten komplett neu zu bestimmen, sondern die vorherige Kalibrierung als Näherung zu verwenden. Vor allem die Verzeichnung der Optik verändert sich wenig.
- Bei den hier vorgestellten Untersuchungen zur in-situ-Kalibrierung liefert die Kombination zweier Nadirblöcke in Kreuzbefliegung mit leicht unterschiedlichen Flughöhen die besten Ergebnisse. Ein zusätzlicher hinzugefügter Oblique-Block wirkt sich nicht signifikant auf die Genauigkeit aus. Dies widerspricht zwar der Erwartung, könnte aber aufgrund nicht ausreichender blockübergreifender Bildverknüpfung verursacht sein. Dieses Problem ist auch aus Auswertungen von Befliegungen mit großformatigen Oblique-kamerasysteme (z. B. Vexcel Imaging Osprey) bekannt.
- Ist eine Befliegung mit eher unkonventioneller Blockgeometrie (z. B. einzelne Flugstreifen für Korridoranwendungen) notwendig, muss eine bestmöglich vorkalibrierte Kamera gefordert werden. Im Idealfall wird diese Kamera in unmittelbarem zeitlichen und räumlichen Zusammenhang über einem Testgebiet kalibriert und diese Parameter dann übernommen. Für derartige Anwendungen sind Kameras mit möglichst stabiler Kamerageometrie zu bevorzugen. Unter Umständen können hier proprietäre Kameras, mit fest eingebauter Optik und festem Fokus auf unendlich vorteilhaft sein; alternativ speziell für diese Anwendungen entwickelte Kameras.
- Das geometrische Auflösungspotenzial erlaubt auch Aussagen über die radiometrische Qualität des Kamerasystems. Eine gute Auflösung erlaubt nicht nur das Erkennen von Details in den Bildern sondern auch eine bessere Verknüpfungspunktmessung.
- Das geometrische Auflösungspotenzial ist wesentlich von der Wahl der Optik abhängig. Dieses wird oftmals unterschätzt, zumal wenn die Kameras keine Wechselobjektive zulassen. Die Auflösung beschreibt immer das Gesamtsystem.
- Im praktischen Einsatz kommen neben Einflüssen der Atmosphäre Vibratoren/Eigenbewegung der Trägerplattform hinzu, die sich negativ auf die Auflösungen auswirken. Diese sollten bestmöglich durch Stabilisierungen bzw. entsprechende Aufhängungen eliminiert werden. Eine korrekte Fokussierung

der Optik wird vorausgesetzt. Bei speziellen Anwendungen ist u. U. auch der Einfluss der Schärfentiefe zu beachten, vor allem wenn der Fokus nicht auf unendlich gesetzt werden kann.

Literatur

- Becker, S.; Haala, N.; Reulke, R. (2005): Determination and improvement of spatial resolution for digital aerial images. ISPRS Comm I & IV Hannover Workshop 2005, High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, Germany.
- Brown, D. C. (1976): The bundle adjustment – progress and prospects. International Archives of Photogrammetry 21(3) Paper 303:33 pp.
- Chang, E.; Cheung, S.; Pan, D. (1999): Color filter array recovery using a threshold-based variable number of gradients. Proc. SPIE 3650, Sensors, Cameras, and Applications for Digital Photography, 36 (March 22, 1999).
- Cramer, M.; Leinss, B. (2016): Welche ist am besten? – Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg 2016, S. 97–118.
- Ebner, H. (1976): Self calibrating block adjustment. In: XIIIth Congress of the International Society for Photogrammetry, Commission III, Helsinki.
- Gózdź, J. (2009): DCB Demosaicing. www.linuxphoto.org/html/dcb.html, letzter Zugriff 14.12.2016.
- Grün, A. (1978): Accuracy, reliability and statistics in close-range photogrammetry. Inter-congress symposium, International Society for Photogrammetry, Com. V, Stockholm, Sweden.
- Hirakawa, K.; Parks, T. W. (2005): Adaptive homogeneity-directed demosaicing algorithm. IEEE Trans Image Processing 2005; 14(3):360–9.
- Malvar, H.; He, L.; Cutler, R. (2004): High-quality linear interpolation for demosaicing of Bayer-patterned color images. Proc. of IEEE ICASSP, 2004.
- Luhmann, T. (2000): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86/2017, Wißner-Verlag, Augsburg 2017. (Dieser Tagungsband).
- Przybilla, H.-J.; Reuber, C.; Bäumker, M.; Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 24: 45–54.
- Slama, C. C.; Theurer, C.; Henriksen, S. W. (Eds) (1980): Manual of photogrammetry. No. Ed. 4 pp. xv + 1056 pp. ISBN 0937294012, Record Number 19830688320, The American Society of Photogrammetry.
- Tang, R. (2013): Mathematical Methods for Camera Self-Calibration in Photogrammetry and Computer Vision. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 703, München 2012, ISBN 978-3-7696-5115-7, 111 S.

Wikipedia (2016): <https://de.wikipedia.org/wiki/Kalibrierung>, letzter Zugriff 14.12.2016.
Wolf, P.R. (1974): Elements of Photogrammetry. ISBN 0-07-071337-5, MacGraw-Hill, Inc., Japan, 562 pp.

Kontakt

Michael Cramer
Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

Heinz-Jürgen Przybilla
Hochschule Bochum
Lennershofstraße 140, 44801 Bochum
heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de

Henry Meißner | Karsten Stebner
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Optische Sensorsysteme
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
henry.meissner@dlr.de
karsten.stebner@dlr.de

Photogrammetrische Auswertung von Drohnen-Bildflügen

Christoph Strecha

1 Einleitung

Leichtgewichtige Drohnen (Abb. 1) werden heute bereits für viele Anwendungsbereiche getestet und in einigen Fällen sind sie bereits ein wichtiger Teil von Verfahrensprozessen in professionellen Anwendungen.



Abb. 1: Typische, viel verwendete Hobbydrohnen: DJI Phantom 2 Vision+ (oben links), DJI Inspire 1 (oben rechts), Parrot's Bebop2 (unten links) und die DJI Mavic Pro (unten rechts)

In diesem Beitrag möchte ich auf einige Anwendungen und deren Ausführung eingehen. Der Fokus liegt dabei auf der Benutzung von kommerziell erhältlichen Drohnen, die heute zwischen 500 und 5.000 Euro kosten und bereits gute Qualität bieten und die mit der entsprechenden Kenntnis durchaus für viele professionelle Anwendungen geeignet sind. Kommerzielle Drohnen sind hauptsächlich für die Luftbildfotografie oder das Aufnehmen von Filmen aus der Luft im Hobbybereich konzipiert und ihre Eigenschaften sind somit auf diese Bereiche zugeschnitten:

- Extrem einfache Bedienung der Drohnen,
- Erstellung von hoch qualitativen, rauscharmen und visuell schönen Fotos,
- hochauflösende Videoaufnahmen mit hoher Framerate, die auch für sehr schnelle Sportszenen angewendet werden können,
- geringer Preis und einfache Kaufmöglichkeit.

Die Kameras sind in der Lage auch unter schwierigen Bedingungen gute Fotos zu generieren und die Videoeigenschaften der Kamera sind zugeschnitten auf das Filmen von Sportevents. Sie sind ähnlich zu den populären Action-Kameras, die GoPro vor einigen Jahren auf den Markt gebracht hat.

Diese für den Hobbybereich entwickelten Eigenschaften sind im großen Umfang natürlich auch für die professionelle Nutzung von Drohnen überaus interessant. Einfachheit und Preis tragen maßgeblich dazu bei, Drohnen in völlig neuen, bis heute unvorstellbaren Gebieten, einzusetzen. In der Baustellenvermessung oder Überwachung gibt es die große Chance, dass Drohnen täglich, sozusagen als gängiges Werkzeug, ähnlich einem Zollstock, eingesetzt werden.

Professionelle Anwendungen verstehen fliegende Kameras natürlich als ein Messinstrument, welches eine professionelle Kamera, in photogrammetrischem Sinne, auch ist. Die Nutzung von Hobbydrohnen stellt hier einige Ansprüche an die photogrammetrische Softwareverarbeitung, um die auf Schönheit fokussierten Kameras in ein Messinstrument verwandeln zu können. Die größte Herausforderung ist dabei die Modellierung des Rolling Shutter Effektes, der bei den meisten Hobbykameras auftritt (Vautherin et al. 2016).

In diesem Beitrag soll kurz auf die wichtigen Schritte bei der Erstellung von 3D-Informationen mit Hilfe von Hobbydrohnen eingegangen werden. Dies beinhaltet die Flugplanung ([Kap. 2](#)) sowie die photogrammetrische Auswertung und Fehleranalysen ([Kap. 3](#)). Dies wird hier am Beispiel einer Genauigkeitsanalyse gezeigt, die 2016 in Griechenland vorgenommen wurde.

2 Flugplanung

Heutzutage gibt es einige Flugplanungs-Apps, die größtenteils die DJI Drohnen unterstützen. Pix4Dcapture ist eine freie Flugplanungssoftware für iOS und Android Mobiltelefone und Tablets. Sie unterstützt eine Vielzahl von gängigen Hobbydrohnen: DJI Phantom's, DJI Inspire1, DJI matrice, DJI Mavic, Parrot Bebop2 und 3DR Solo. Pix4Dcapture übernimmt die Flugplanung und macht es möglich, dass eine Drohne automatisch den definierten Flugplan ausführt.

Drei generelle Flugplanmodi sind in Pix4Dcapture implementiert (siehe auch [Abb. 2](#)):

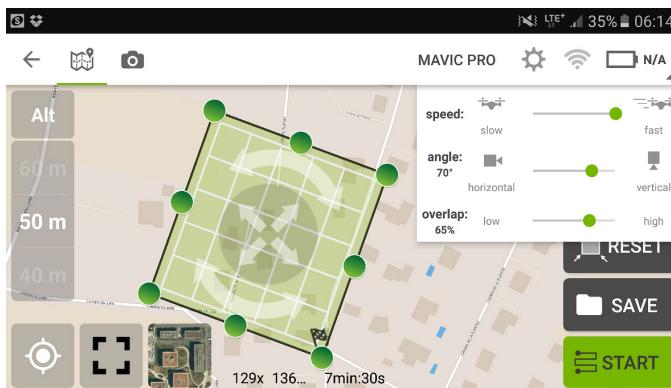
- Grid Mission
 - Traditioneller Flugplan für Nadir Befliegung.
 - Geeignet für die effiziente Befliegung von größeren Flächen zur Generierung von Orthofotos und 2+1/2D-DSM oder DTMs.
- Double Grid Mission
 - Diese Flugpläne sind sehr populär in neueren Anwendungen.



Abb. 2: Flugplanungsmodi implementiert in Pix4Dcapture

- Oftmals wird die Kamera nicht nadir, sondern in einem Winkel geflogen, so dass auch Fassaden mit genügend Bildpixeln aufgenommen werden können.
- Das double grid gewährleistet, dass (für ein Gebäude) alle vier Fassaden aufgenommen sind.
- Circular Mission
 - Ähnlich wie beim double grid ist die Kamera leicht geneigt und erlaubt ein einzelnes Gebäude optimal mit den Fassaden zu modellieren.

Jeder Flugplan kann mit Hilfe eines Rechtecks, dessen Größe und Orientierung einfach über eine Karte verschoben werden kann, generiert werden. Flughöhe, Überlappung der Fotos, der Neigungswinkel der Kamera und die Geschwindigkeit können des Weiteren auf Basis des selektierten Gebietes eingestellt werden (siehe Abb. 3). Nach „Start“ werden einige Basistest an der Drohne vorgenommen und der eingestellte Flugplan wird automatisch abgeflogen.

Abb. 3:
Flugplanung in
Pix4Dcapture,
gezeigt hier für
Mavic Pro

3 Photogrammetrische Auswertung

Nach der Landung der Drohne werden die Fotos automatisch auf das Handy gespielt und können von dort aus in die Photogrammetriesoftware geladen werden. Wir verwenden hier Pix4Dmapper 3.0, die einzige kommerzielle Software, welche es erlaubt, den Rolling Shutter Effekt explizit zu modellieren.

3.1 Modellierung des Rolling Shutter Effektes

Als Beispiel zeigen wir hier die Genauigkeitsanalyse, die in der archäologischen Ausgrabungsstätte Vergina in Griechenland im Sommer 2016 erstellt wurde. Das Gebiet wurde mit vier verschiedenen Hobbydrohnen überflogen. Mehr Informationen zu den verwendeten Drohnen sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Neben den Fotos wurden auch 25 verschiedene Passpunkte gemessen; fünf von diesen sind als Passpunkte in Pix4Dmapper verwendet, um die Bildflüge genau zu georeferenzieren. Die restlichen 20 Passpunkte wurden zu Validierung der Genauigkeit verwendet. Die Resultate sind in der Tab. 2 zusammengefasst.

Die globale Genauigkeit hängt natürlich stark von der Pixelgröße ab (GSD), kann aber mit korrekter Modellierung des Rolling Shutter Effektes und durch die relativ geringe Flughöhe (und damit kleinerer GSD) auch bei den verwendeten Hobbydrohnen sehr gut sein. Wie in Tab. 2 zu sehen, liegt die Genauigkeit an den Validierungspunkten mit Rolling Shutter Modellierung im Bereich von

Tab. 1: Verwendete Drohnen für die Genauigkeitsanalyse an der archäologischen Ausgrabungsstätte in Vergina (Griechenland)

	Parrot Bebop2	DJI Phantom3	DJI Inspire1 x3	DJI Inspire1 x5
Price \$	~ \$ 500	~ \$ 1.000	~ \$ 3.000	~ \$ 5.000
Sensor	?	6.3 × 4.72 mm	6.17 × 4.55 mm	17.3 × 13.0 mm
Image size	4096 × 3072	4000 × 3000	4000 × 3000	4608 × 456
Example image				
Flight time	25 min	23 min	18 min (TB47 battery)	16 min (TB47 battery)
Weight	500 g	1.280 g	2.935 g	3.500 g

Tab. 2: Genauigkeiten der Validierungspunkte für verschiedene Drohnen und in Funktion der Berechnung: mit und ohne Rolling Shutter Modellierung

	# Fotos	# Flüge	Flugzeit [min]	GSD [cm]	Fläche [ha]	Validierung und Passpunkte		
						RMS Fehler [m] der 20 Punkte in x, y und z		
bebop2	360	4	67	9.90		0.026	0.026	0.056
Phantom3	112	2	5	1.29	1.9	0.050	0.106	0.151
Phantom3 Rolling shutter compensated	112	2	5	1.29	1.9	0.065	0.056	0.055
Inspire1 x3	113	2	6	1.32	2.0	0.056	0.050	0.171
Inspire1 x3 Rolling shutter compensated	113	2	6	1.35	1.8	0.034	0.020	0.050
Inspire1 x5	111	1	6	1.52	2.8	0.063	0.225	0.563
Inspire1 x5 Rolling shutter compensated	111	1	6	1.52	2.7	0.023	0.030	0.059

mindestens 5 cm. Ohne die Modellierung des Rolling Shutter Effektes belaufen sich die Fehler auf über 20 cm. Diese Resultate sind konsistent mit früheren Untersuchungen (Vautherin et al. 2016), bei denen eine genauere Ausführung der Modellierung des Rolling Shutter Effektes nachzulesen ist.

3.2 Welcher Flugplan für welche Anwendungen

Interessant im Bezug auf die verschiedenen Flugplanungen in Kap. 2 ist deren Auswirkung auf die Resultate der 3D-Punktewolken. Als Beispiel zeigen wir hier den Vergleich eines „Grid“ Fluges mit einer Nadir Kamera und einem „Double Grid“ Flug mit einer Kameraorientierung von ungefähr 30° in Abb. 4. Beide Flüge wurden mit der Mavic Pro von DJI und Pix4Dcapture aufgenommen. Der double grid Flug, mit geneigter Kamera, zeigt eine deutlich bessere Modellierung der Fassaden, die durch die leichte Kameraneigung durch mehr Pixel beschrieben sind. Im einfachen grid Flug und mit einer zum Nadir orientierten Kamera sind alle Bereiche, die üblicherweise für 2D- oder 2+1/2D-Produkte Verwendung finden, ebenfalls gut modelliert (Orthofotos beinhalten per Definition keine Fassaden).

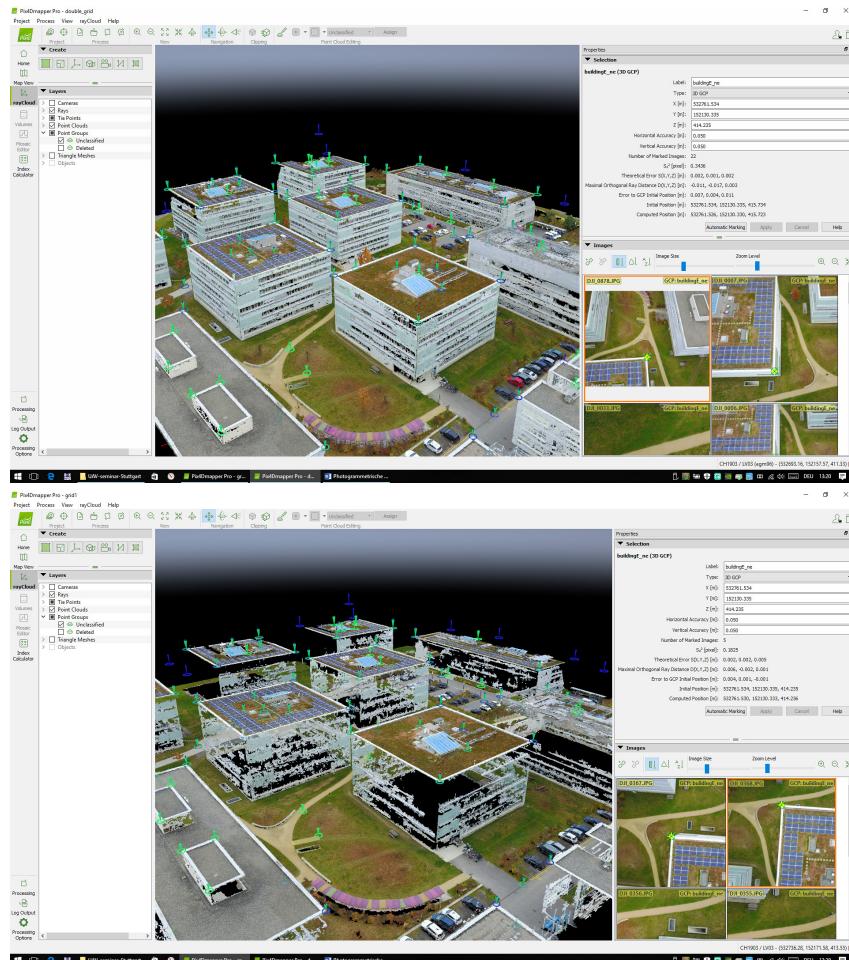


Abb. 4: Vergleich der 3D-Punktwolken von Nadir Grid (unten) und oblique Double Grid (oben) Flügen. Die Gebäudefassaden sind im double grid Flug viel besser repräsentiert, da die leicht geneigte Kamera die Fassaden auch besser abbildet (zu sehen auch an den originalen Bildern unten rechts). Beide Datensätze sind mit zwei separaten Flügen mit der DJI Mavic Pro aufgenommen.

Ähnlich zum double grid Flugplan mit geneigter Kamera, dann aber für einzelne Gebäude, ist die Möglichkeit eines elliptischen Flugplanes, wie in Abb. 5 mit einer Bebop2 dargestellt. Parrot's Bebop2 besitzt ein Fisheye-Objektiv und nimmt die Fotos immer im selben Winkel (vorwärtsgerichtet) auf.



Abb. 5: Rekonstruktion eines elliptischen Flugplans mit der Parrot Bebop2

Literatur

Vautherin, J.; Rutishauser, S.; Schneider-Zapp, K.; Chovancova, V.; Glass, A.; Strecha, C. (2016): Photogrammetric Accuracy and Modelling of Rolling Shutter Cameras. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Band III-3, pp. 139–146.

Kontakt

Christoph Strecha

Pix4D SA

EPFL Innovation Park Building F, 1015 Lausanne, Schweiz

christoph.strecha@pix4d.com

Session 3: Erfahrungen aus der Praxis

UAV in der Ingenieurvermessung – Anwendungen, Möglichkeiten und Erfahrungswerte aus der Praxis gesehen

Oliver Schmechtig

1 Einführung

Drohnen, unbemannte Fluggeräte oder unmanned aerial vehicles (UAVs oder UAV) bieten Chancen und bergen Risiken in sich. UAVs sind interessant, medienwirksam und hoch aktuell. Für gewerbliche Anwender, die ein neues Geschäftsmodell darin sehen, für Privatpersonen als ein begeisterndes Hobby oder andere, die nur das Gefahrenpotenzial im Auge haben. Es gibt sicherlich niemanden, den dieses Thema vollkommen unberührt lässt.

Für uns als Geodäten wird damit das Fachgebiet der Photogrammetrie, ca. 1900 aus der Geodäsie hervorgegangen, wieder zugänglicher gemacht. Durch modernes Instrumentarium, entsprechende Software und leistungsfähige Computer werden die klassischen Vorteile wieder stärker in den Mittelpunkt gestellt.

Die Vereinfachung der Datenerfassung, sei es durch UAV, terrestrische Laserscanner oder mobile, kinematische Datenerfassungssysteme, sorgt allein aber nicht für eine automatische Qualitätssteigerung der geodätischen Positionsbestimmung. Es wird dagegen immer mehr geodätischer Sachverstand benötigt, die richtigen Schlüsse aus den erhaltenen Massenpunkten zu schließen. Viele Punkte zu messen heißt nicht automatisch höhere Genauigkeiten zu erhalten.

Der Themenbereich UAV ist in den letzten Jahren nicht nur auf Fachmessen wie der INTERGEO®, Seminaren oder sonstigen geodätischen Veranstaltungen in den Mittelpunkt gerückt. Es ist ein grundsätzliches Thema, das viele Bereiche betrifft. Immer wieder gibt es – von nicht-geodätischer Seite – medienwirksame Schlagzeilen, insbesondere durch „ungesetzliche Aktionen“, deren Hintergründe vielfach nicht bekannt werden. Besonderes Interesse erzeugen Schlagzeilen bei unsachgemäßer Handhabung, sei es als „Begleitung“ von Personenflugzeugen in knapp 1.000 m Höhe, wenn UAVs an die Fensterscheibe des Restaurants im Olympiaturm crashen oder wenn sie hinter Skifahrern auf die Piste fallen.

Die UAV-Industrie wird als ein enormer Wachstumsmarkt gesehen, der in den nächsten Jahren sehr hohe Umsatzzahlen generieren wird. Dass dies nicht zwangsläufig den geodätischen Markt betreffen wird, sollte uns klar sein, aber uns nicht davon abhalten, uns mit der Thematik ernsthaft auseinander zusetzen.

2 Rahmenbedingungen

2.1 Allgemeine Rahmenbedingungen

Die geodätischen Anwendungen von UAV-Systemen werden durch unterschiedliche Rahmenbedingungen begrenzt. Entsprechend den jeweiligen Anforderungen bzw. Vorgaben ergeben sich damit die tatsächlichen Einsatzmöglichkeiten.

2.1.1 Gesetzliche Vorgaben

Neben den allgemeinen Richtlinien der zuständigen Behörden gibt es in der Regel auch immer länderabhängige oder regionale Bedingungen, die bei der Nutzung von UAV-Systemen einzuhalten sind. Siehe dazu zum Beispiel die Nachrichten für Luftfahrer oder die Internetseite des UAV DACH Verbandes.

Ein wesentlicher Faktor für Anwendungen in der Ingenieurvermessung ist in der Regel die Einhaltung der Bedingungen für die Allgemeine Aufstiegserlaubnis (max. Flughöhe bzw. Gewichtsbeschränkungen), um entsprechend kurzfristig auf Antragsanfragen reagieren zu können. Lange Genehmigungsverfahren von teilweise mehreren Monaten, wie es mancherorts vorkommt, sind heutzutage schwer umzusetzen.

Wesentliche Parameter sind die Flugverbotszonen bzw. die Zugänglichkeit der Start- und Landeplätze und Reichweitenbeschränkungen (Sichtbarkeit, max. Entfernung vom Piloten). Ebenso sind in einigen Ländern, z.B. Tschechien, auch unabhängige Stromkreise notwendig, um eine Flugerlaubnis zu erhalten.

2.1.2 Allgemeine Technische Vorgaben

Jeder UAV-Hersteller definiert seine eigenen Rahmenbedingungen für seine UAV-Systeme, in Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen bzw. technischen Gesichtspunkten. Beispielhaft seien die maximal möglichen (technischen) Flughöhen, maximal erlaubten Windstärken oder die Reichweite in Abhängigkeit von der Batteriekapazität genannt. Dadurch ergeben sich mehr oder weniger entsprechende Einsatzmöglichkeiten in der Geodäsie.

2.1.3 Allgemeine Parameter

Die UAV-Technologie ist zwar weniger witterungsempfindlich als die klassische Photogrammetrie, aber sie unterliegt doch ähnlichen Restriktionen. Während in den Wintermonaten oftmals nur kurze Flugfenster aufgrund der Dunkelheit (kurze Tageshelligkeit) oder des niedrigen Sonnenstandes zur Verfügung stehen (**Abb. 1**), kann im Sommer zu viel Sonne durch die niedrigen Flughöhen sehr



Abb. 1:
Orthophoto aus einer
„dunklen“ Befliegung
gegen 13:00 Uhr

schnell zum Problem werden. Ähnlich verhält es sich bei zu böigem Wind, Gewitter, Nebel oder Regen. Sehr kurze Auftragsbestätigungen erfordern oftmals sehr schnelle Reaktionszeiten, was sich bei Schlechtwetterlagen oder entsprechendem Bewuchs (z. B. Raps oder Mais) als Problem erweisen kann.

2.2 Ingenieurtechnische Rahmenbedingungen

Beim Einsatz der UAV-Technologie sollte der ingenieurgeodätische Sachverständig beachtet werden. Nur weil etwas machbar ist, muss es nicht zwangsläufig möglich oder sinnvoll sein. Entsprechend den unterschiedlichen Anwendungen oder Aufgabenstellungen werden die Koordinaten in verschiedener Qualität und Genauigkeit benötigt ([Abb. 2](#)). Aufgrund dessen sollte vorher überprüft werden, ob UAVs überhaupt die richtige Lösung für die Aufgabenstellung sind.

- Sind die erreichbaren Genauigkeiten ausreichend?
- Können Ergebnisse reproduziert werden?
- Ist eine sinnvolle Weiterverarbeitung der erhaltenen Daten möglich?
- Ist es wirklich die effizienteste Lösung?
- Ist es die ökonomischste Lösung?
- Wie schnell kann oder muss die UAV-Befliegung durchgeführt werden?
- Gibt es notfalls alternative Zeitpunkte für die UAV-Befliegung?

Nach Abklärung dieser Gesichtspunkte kann im Regelfall festgestellt werden, ob nicht eine alternative Lösung mit einem anderen Ansatz oder anderen geodätischen Messverfahren die bessere, effizientere oder kostengünstigere Lösung wäre. Dabei sollte man auch bedenken, dass es aufgrund diverser Parameter zu Verschiebungen kommen kann, die dann die Voraussetzungen für die UAV-Befliegung verschlechtern oder unmöglich machen.

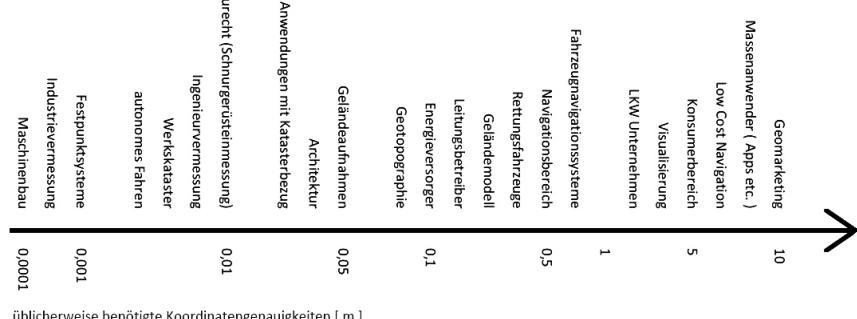


Abb. 2: Richtwerte für benötigte Genauigkeiten bei Vermessungsaufgaben

- Welche anderen Informationen werden benötigt oder sind vorher abzuklären (z. B. Zugänglichkeit zum Starten und Landen, Flugverbotszonen etc.)?
- Welche Informationen, Datenformat etc. benötigt der Auftraggeber?
- Welche Kamera bzw. Datenaufzeichnung wird für die spezielle Aufgabenstellung benötigt?
- Ist neben der Einzelbildaufnahme auch eine Videoaufnahme erforderlich oder werden spezielle Sensoren wie Thermokamera, Spektralkameras etc. für entsprechend Aufgabenstellungen benötigt?
- Müssen Passpunkte signalisiert werden?
- Sollen mit einer genauen GNSS-Antenne entsprechende GNSS-Daten oder Positionen aufgezeichnet werden um die exakten Bildpositionen zu erhalten?
- Ist dabei an eine RTK-Lösung oder eine Post-Processing-Lösung gedacht?
- Sollen dabei allgemein zugängliche Korrekturdatendienste (SAPOS, AXIO Net, etc.) oder individuelle Referenzstationen verwendet werden?

Vergleich des erfassten Bildbereiches bei gleicher Flughöhe von jeweils 40 m über Boden, unter Verwendung unterschiedlicher Kameras (Abb. 3 und Abb. 4).

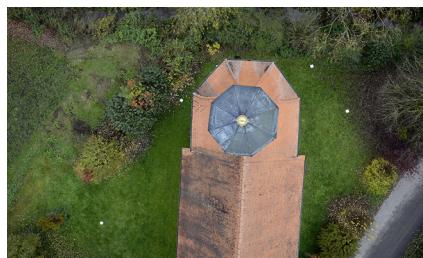


Abb. 3: Aufnahme mit Nikon Coolpix A f 2,8/18,5 mm

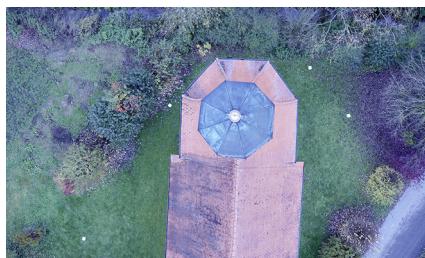


Abb. 4: Aufnahme mit Sony 6300 und Zeiss Objektiv f 2,0/25 mm

Auswertung einer UAV-Befliegung mit individueller Referenzstation (Abb. 5 und Abb. 6).

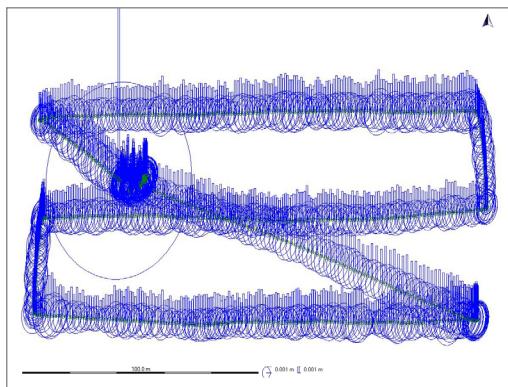


Abb. 5: Darstellung der ausgewerteten GNSS-Daten



Abb. 6: Lokale GNSS-Referenzstation – UAV mit GNSS-Antenne

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Massenermittlung

Klassische Aufgabenbereiche der UAV-Technologie sind Aufgabenstellungen im Zusammenhang mit der Massenermittlung (Abb. 7 bis Abb. 10). Es stellt eine beweiskräftige Aufnahmemethode dar, da die eigentliche Auswertung im Büro erfolgt und jederzeit nachberechnet werden kann.

Grundsätzlich kann sehr schnell eine vollständige Bestandsaufnahme der Ist-Situation erfolgen, die den kompletten Bereich abdeckt.

Die Auswertung kann in einem lokalen Koordinatensystem oder im amtlichen Bezugssystem erfolgen. Bei ordnungsgemäßer Durchführung kann die Auswertung jederzeit reproduzierbar wiederholt werden. Dabei sollten die Daten nach Durchführung der UAV-Befliegung sorgfältig auf Plausibilität und Vollständigkeit geprüft werden, um sie auch bei später aufkommenden Diskussionen zwischen den Vertragsparteien jederzeit wieder verwenden zu können. Der große Vorteil neben einer unabhängigen, nachweisbaren Kontrollberechnung ist auch das vorliegende Bildmaterial zur Visualisierung der tatsächlichen Ist-Situation.

Dabei können durch wiederholende Befliegungen nahezu unendlich viele Ist-Situationen nachprüfbar für spätere oder sofortige Auswertungen abgespeichert



Abb. 7: Haufwerke



Abb. 8: Kiesgrubenabbau



Abb. 9: DGM im Haufwerk



Abb. 10: Ansicht Kiesgrube

werden. Die UAV-Befliegung kann dabei jederzeit erfolgen, ohne dass der reguläre Betriebsablauf gestört oder beeinträchtigt wird und somit diesbezüglich weitere Kosten durch Ausfallzeiten entstehen.

3.2 Bestandsvermessung für Lage- und Höhenpläne

Bei der Topographischen Bestandsaufnahme mittels UAV-Technologie sind die unterschiedlichen Vegetationszustände zu beachten. Aufgrund der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung kann es in Abhängigkeit vom Pflanzenwuchs zu falschen Geländehöhen kommen. Insbesondere sehr schnell wachsendes Saatgut wie z. B. Raps oder in späteren Phasen auch der Mais kann das Geländemodell verfälschen bzw. unbrauchbar machen (Abb. 11 und Abb. 12).

3.3 Trassenvermessung

Es wurde die Trasse für einen zweistreifigen Bundesstraßenneubau zwischen einer bestehenden Abfahrt des bereits fertig gestellten Trassenabschnittes und

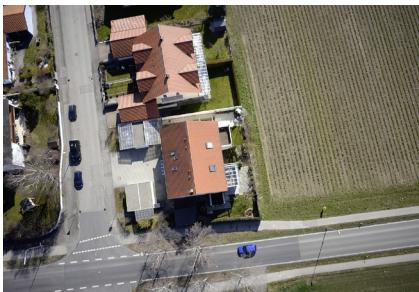


Abb. 11: Luftbild aus UAV-Befliegung



Abb. 12: Orthophoto mit Höhenschichtlinien

einer Anbindung an eine bereits bestehende Autobahn mit UAV beflogen (Abb. 13) und die zugehörige Punktwolke bzw. das DGM daraus erstellt. Aufgrund des unbeständigen Wetters im Frühjahr 2016 erfolgte die Befliegung an drei verschiedenen Tagen (Abb. 14). Neben der bestehenden Bundesstraße und einigen Staatsstraßen wurden auch diverse Hochspannungsleitungen bis zu 380 KV gekreuzt, so dass die Flugplanung vor Ort mehrfach angepasst werden musste.

Zur Kontrolle bzw. Abrechnung der ausführenden Baufirmen und Aktualisierung des vorliegenden DGMs wurde eine erneute Befliegung eines ca. 4 km Trassenabschnittes im November 2016 durchgeführt (Abb. 15). Dabei wurde die UAV-Befliegung in 12 Flugstreifen in ca. 4 Stunden in den vorgegebenen Bereichen durchgeführt.

- Befliegung Freitag 18.11.2016, ca. 10:00 bis 14:00 Uhr in 12 Flugstreifen,
- Trassenlänge ca. 4 km,
- Datenübergabe der ausgedünnten Punktwolke im 1 m Punkt raster an den Auftraggeber am Montag 21.11.2016, 10:00 Uhr.

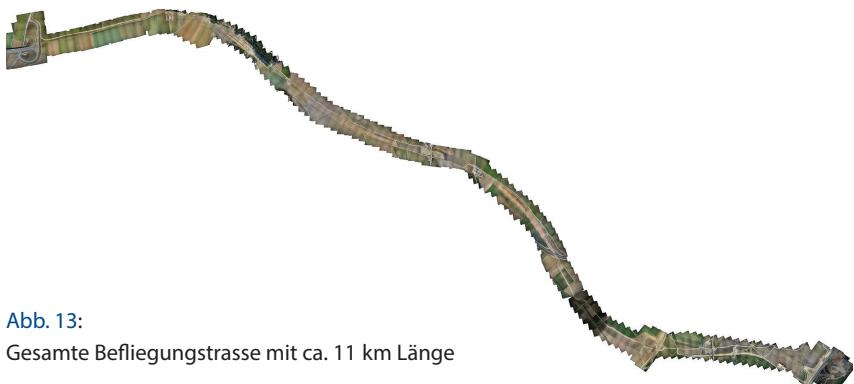


Abb. 13:

Gesamte Befliegungsstrasse mit ca. 11 km Länge



Abb. 14:
Baustellenaufnahme
April 2016



Abb. 15:
Baustellenaufnahme
November 2016

3.4 Sonderanwendungen

Die UAV-Befliegung bietet sich vielfach auch für die Problemlösung von Sonderanwendungen an, die alternativ nur mit sehr hohem Aufwand oder gar nicht zu lösen wären.

3.4.1 Vermessung auf Dächern

Zur Erfüllung der Auflagen des Bauamtes wird ein Plan aller Emissionsquellen benötigt. Aufgrund der nicht überall zugänglichen Bereiche bzw. den verschiedenen hohen Auf- und Einbauten auf dem Dach wäre eine konventionelle geodätische Vermessung sehr aufwendig geworden ([Abb. 16](#) bis [Abb. 18](#)). Insbesondere der sehr enge Zeitplan zur Erstellung und Abgabe der entsprechenden Bescheinigungen an die Baubehörde nach Fertigstellung der erneuerten Anlagen wäre kaum zu halten gewesen.

3.4.2 Vermessung in schwer zugänglichen Bereichen

Zur Massenberechnung und Planungshilfe bei der Erstellung des Kreuzungsbauwerkes bzw. Anschlusses an eine unter Verkehr stehende Autobahn erfolgte die Befliegung mittels UAV ([Abb. 19](#) und [Abb. 20](#)).

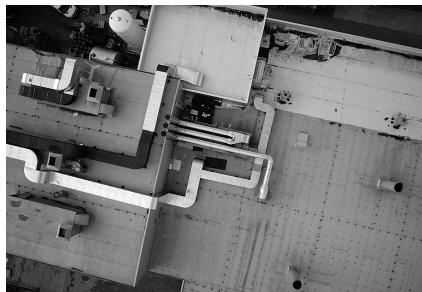


Abb. 16: Orthophoto



Abb. 17: Schrägaufnahme



Abb. 18:
Emissionsquellenplan
mit Höhen



Abb. 19: Querung einer bestehenden
Autobahn



Abb. 20: Autobahnanschluss

3.4.3 Hochbauarbeiten

Ein Altes Ziegeleigelände wird vollkommen abgerissen und zurückgebaut um für eine Neuansiedlung mit verschiedenen Gebäuden vorbereitet zu werden. Aufgrund des engen Zeitplanes wird die Bestandsvermessung und Massenermittlung mit UAV durchgeführt. So kann ein reibungsloser Baustellenbetrieb gewährleistet werden (Abb. 21 und Abb. 22).

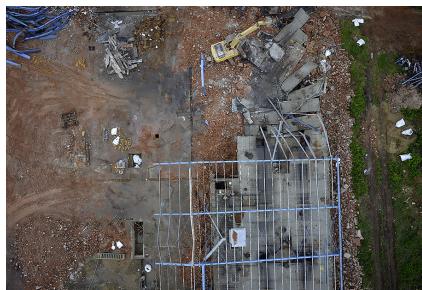


Abb. 21: Orthophoto



Abb. 22: Schrägaufnahme

3.4.4 Beweissicherungsaufgaben

Schwer zugängliche Bereiche können relativ einfach ohne etwaige Gerüste oder Hubsteiger begutachtet bzw. nachweislich gesichert und dokumentiert werden. Die Dokumentation von bestehenden Objekten erfordert oftmals auch den Zugang zu vielfach nicht zugänglichen Bereichen. Durch eine Befliegung mittels UAV können diese Bereiche nun ebenfalls geodätisch erfasst und bearbeitet werden (Abb. 23 bis Abb. 25).



↔ Abb. 23:
Kamin seitlich

← Abb. 24:
Kamin von oben



Abb. 25:
Aufnahme der
Dachlandschaft
mit UAV

3.4.5 Verknüpfung und Ergänzung durch verschiedene geodätische Messsysteme

Abb. 26 zeigt die Befliegung mit UAV, in Abb. 27 ist die Verteilung der Passpunkte zu sehen, wobei alle ursprünglich signalisierten Passpunkte dargestellt sind. Aufgrund der Verschiebung des Bildfluges um drei Wochen waren zum Zeitpunkt des Bildfluges bereits drei Punkte verdeckt bzw. zerstört und konnten nicht mehr verwendet werden.



Abb. 26: Befliegung durch UAV

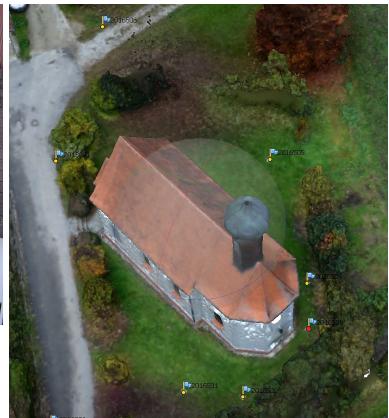


Abb. 27: Orthophoto in Agisoft mit Passpunkten

Aufgrund weiterer Informationen aus den Berechnungsprotokollen zeigte sich, dass der Punkt 2016003 falsch bestimmt worden war bzw. mit einer falschen Höhe

gemessen worden war (Abb. 28). Wurde dieser Passpunkt bei der Auswertung berücksichtigt, ergab sich im Punktwolkenvergleich zwischen der TLS- und UAV-Auswertung das in Abb. 29 dargestellte Bild. Durch diesen einen falschen Passpunkt ergab sich eine Kippung von ca. 1 m im Außenbereich der beiden zueinander referenzierten Punktwolken. Als dieser Passpunkt herausgenommen

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Jracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 2013001	4522762.290...	5391272.970...	395.640000	0.005000	0	0	0.000
<input checked="" type="checkbox"/> 2016001	4522775.300...	5391252.170...	395.210000	0.005000	0	0	0.000
<input checked="" type="checkbox"/> 2016501	4522783.200...	5391259.510...	395.160000	0.005000	0.150580	17	0.482
<input checked="" type="checkbox"/> 2016502	4522787.550...	5391261.440...	395.030000	0.005000	0.211369	14	0.434
<input checked="" type="checkbox"/> 2016503	4522789.720...	5391269.670...	395.640000	0.005000	0.568469	14	0.336
<input checked="" type="checkbox"/> 2016504	4522787.580...	5391272.720...	395.030000	0.005000	0.279355	10	0.451
<input checked="" type="checkbox"/> 2016505	4522779.160...	5391282.140...	395.060000	0.005000	0.116228	14	0.452
<input checked="" type="checkbox"/> 2016506	4522757.860...	5391288.040...	395.420000	0.005000	0	0	0.000
Total Error					0.310502		0.435
Control points							
Check points							

Abb. 28: Restklaffen mit einem falschen Passpunkt

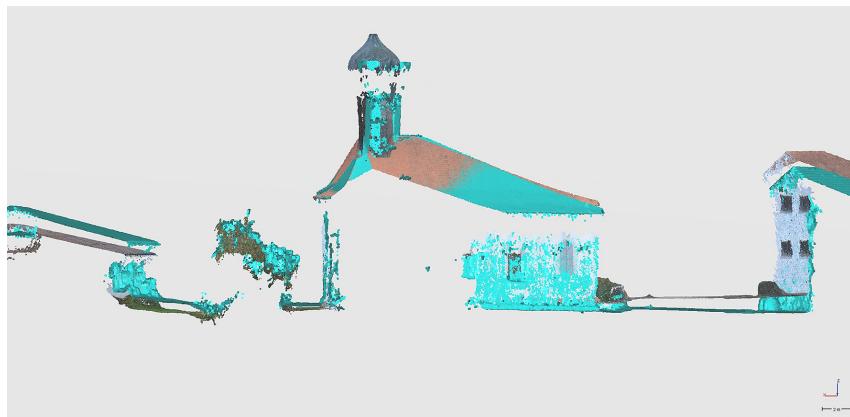


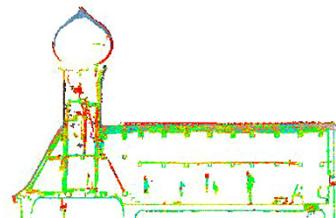
Abb. 29: Punktwolkenvergleich TLS – UAV

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Jracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 2013001	4522762.290...	5391272.970...	395.640000	0.005000	0	0	0.000
<input checked="" type="checkbox"/> 2016001	4522775.300...	5391252.170...	395.210000	0.005000	0	0	0.000
<input checked="" type="checkbox"/> 2016501	4522783.200...	5391259.510...	395.160000	0.005000	0.017067	17	0.482
<input checked="" type="checkbox"/> 2016502	4522787.550...	5391261.440...	395.030000	0.005000	0.008019	14	0.434
<input type="checkbox"/> 2016503	4522789.720...	5391269.670...	395.640000	0.005000	0.865790	14	0.336
<input checked="" type="checkbox"/> 2016504	4522787.580...	5391272.720...	395.030000	0.005000	0.008565	10	0.451
<input checked="" type="checkbox"/> 2016505	4522779.160...	5391282.140...	395.060000	0.005000	0.017078	14	0.452
<input checked="" type="checkbox"/> 2016506	4522757.860...	5391288.040...	395.420000	0.005000	0	0	0.000
Total Error							
Control points						0.013422	0.457
Check points						0.865790	0.336

Abb. 30: Restklaffen bei fehlerfreien Passpunkten

wurde, ergab sich das in Abb. 30 gezeigte Transformationsprotokoll in Agisoft. Daraufhin passten auch beide Punktwolken aus der UAV-Befliegung und den TLS-Beobachtungen hervorragend zusammen (Abb. 31).

Der Punktwolkenvergleich aus den UAV-Daten bzw. den TLS-Daten zeigt Differenzen von wenigen mm bis zu 2 bis 3 cm an markanten Stellen. Dies zeigt auch der Vergleich in der Kuppel (Abb. 32). Dabei ergänzen sich die Punkte aus den TLS-Beobachtungen vom Boden mit den Punkten der UAV-Befliegung aus der Luft. Dort sieht man, wie sich die Punktwolken aus der UAV-Befliegung und der HDS-Aufnahme aneinander schmiegen.

Abb. 31: Punktwolkenvergleich
UAV-Daten – TLS-DatenAbb. 32:
Vergleich in der
Kuppel

4 Erfahrungswerte

Nach über 30-jähriger Berufserfahrung in der Photogrammetrie und der Satellitenmesstechnik beschäftigen wir uns nun seit ca. fünf Jahren intensiv mit der UAV-Technologie. Dabei können wir heute feststellen, dass sich in den letzten Jahren bereits vieles getan hat, aber noch viel mehr zu tun ist. Bei allem Spaß, den die UAV-Technologie mit sich bringt, ist es doch keine geodätische Technologie wie jede andere.

- Man sollte grundsätzlich mit geodätischem Sachverstand an die Aufgaben herangehen.
- Die Softwarepakete sind nach wie vor nur bedingt tauglich, insbesondere zur Datenweiterverarbeitung.
- Die Anforderungen an die Rechnerleistungen sind sehr hoch.
- Der Datentransfer an die Kunden stellt oft ein großes Problem dar, da einerseits die Punktmengen nicht übergeben bzw. eingelesen werden können oder die Hardwareumgebung nicht vorhanden ist. Oftmals ist beim Kunden aber auch nur die für die Weiterverarbeitung notwendige aktuelle Softwareversion nicht vorhanden.
- Grundsätzlich ist ein Umdenken notwendig. Das Verständnis für die Punktmengen fehlt vielfach, so dass die Auswertung und Modellierung vor der Übergabe an den Kunden erfolgen muss.
- Bei entsprechender Bildauflösung durch eine geringere Flughöhe werden z. B. auch Spurrinnen von Traktoren im Acker im Datenmodell abgebildet.
- Auch wenn die UAV-Befliegung mittels Flugplanung (Abb. 33 und Abb. 34) durchgeführt wird, ist eine hohe Konzentration notwendig, da es keinen doppelten Boden gibt bzw. nicht alle Einrichtungen (Türme, Leitungen, Masten,

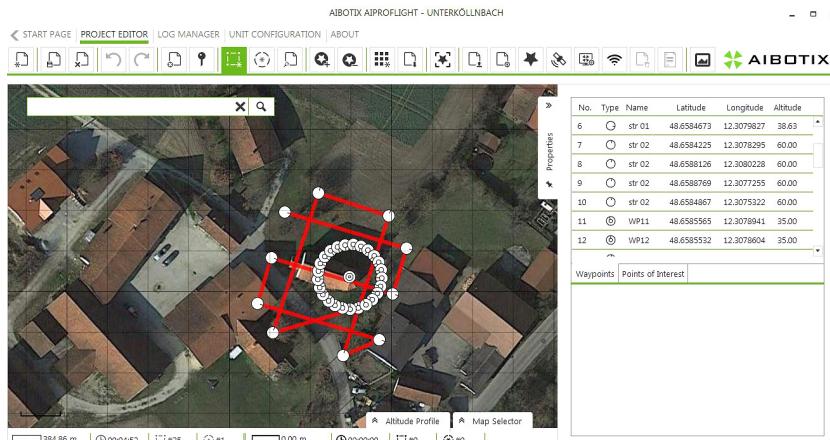


Abb. 33: Bildflugplanung

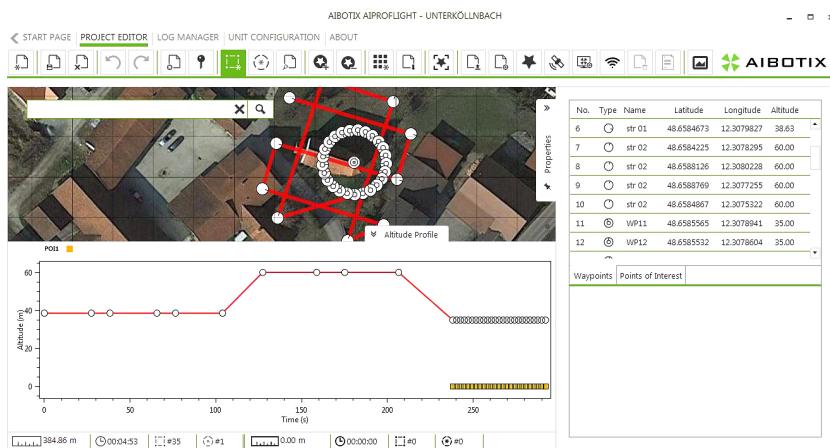


Abb. 34: Bildflugplanung mit Höhenprofil

Ecken und Kanten) in der Flugplanung standardmäßig berücksichtigt werden können.

- Insbesondere in der Nähe von Freileitungen ist die UAV-Befliegung mit Vorsicht durchzuführen (Abb. 35).
- Die bisherige Erfahrung zeigt, dass Vogelschwärme in der Regel nur begutachten bzw. umkreisen und irgendwann das Interesse verlieren (Abb. 36).

Die Entwicklung der UAV-Technologie wird weitergehen, dazu werden allein schon die von der UAV-Industrie erwarteten Umsatzzahlen beitragen. Es werden sicherlich differenzierte UAV-Systeme für verschiedene Anwendungen ent-



Abb. 35: Freileitungsmast

Abb. 36: Vogelschwarm auf nahezu gleicher Höhe

wickelt werden. Zu erwarten sind leistungsfähige, leichtere Laserscanner, die es erlauben mit dem UAV-System unter der 10 kg (5 kg) Marke zu bleiben, so dass weiterhin mit der allgemeinen Aufstiegserlaubnis geflogen werden kann.

Interessant wird sicherlich auch die weitere Entwicklung im Bereich der notwendigen Versicherungen werden. Während die Kriterien für die Haftpflichtversicherung relativ klar und stabil sind, findet bei der Absicherung der Drohnen bereits eine Marktbereinigung statt. Die ersten Versicherungen ziehen sich aufgrund hoher Schadensquoten zurück und damit wird es mittelfristig schwerer werden das „hochwertige Instrumentarium“ (UAV und Kameras) entsprechend abzusichern.

5 Zusammenfassung

Die UAV-Technologie ist bereits heute aus vielen Aufgabenbereichen des geodätischen Ingenieurbüros nicht mehr weg zu denken. Während einfache Aufgaben wie z. B. die Erfassung von Haufwerken relativ einfach zu bearbeiten sind, sind andere, oben beschriebene Aufgaben durchaus mit Vorsicht zu sehen.

Ähnlich den Anfängen der GPS Technologie werden große Rechnerleistungen benötigt, um die anfallenden Berechnungen in überschaubaren Zeiträumen durchführen zu können.

Bei richtiger Handhabung und Nutzung vervollständigt die UAV-Technologie das klassische Instrumentarium des Ingenieurbüros, wird es aber keinesfalls vollständig ersetzen können.

UAV wird ein Instrumentarium in einem Multisensorsystem sein, dass bei ingenieurgeodätischen Aufgabenstellungen gezielt ausgewählt werden wird.

Für uns als Geodäten wird die UAV-Technologie in erster Linie ein „fliegender Stativ“ oder „fliegender Instrumententräger“ sein. Abhängig von unseren Aufträgen werden entsprechende Instrumente oder Kameras adaptiert werden. Seien es einfache kompakte Low Budget Kameras, hochwertige digitale Kameras, Infrarotkameras, Spektralkameras, Laserscanner oder sonstige Sensoren.

Ähnlich den Entwicklungen anderer geodätischer Technologien werden in naher Zukunft sicherlich verschiedene UAV-Flugsysteme produziert werden, um die jeweiligen Stärken bzw. die sich anpassenden rechtlichen Rahmenbedingungen, optimal nutzen zu können.

Beim Einsatz von UAV-Systemen sollte auch immer daran gedacht werden, dass dies eine sehr medienorientierte Technologie ist. Nicht nur, dass Fotos oder Videos erstellt werden, sondern dass man sich bei entsprechenden Unfällen auch sehr schnell in den Medien wiederfindet.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die UAV-Technologie ein sehr aktuelles Thema ist, bei dem jeder meint, mitreden zu können. Man sollte aber nicht den

Fehler machen, die tatsächlichen Investitionskosten und Reinvestitionen, z.B. Akkus, außer Acht zu lassen und „die paar Minuten Bildflug“ zu billig zu verkaufen.

Bei der Kalkulation von entsprechenden Aufträgen sollte man unbedingt darauf achten, dass es grundsätzlich keine Garantie für eine optimale Befliegung gibt, dass unter Umständen gar keine UAV-Befliegung aufgrund der dringend benötigten Daten und den aktuell widrigen Wetterbedingungen möglich ist.

Befragt man einen Fachanwalt aus dem Versicherungsrecht, wird einem klar, dass man unabhängig vom vereinbarten Preis seine Leistung mängelfrei und vollständig erfüllen muss. Das heißt, man sollte alle Eventualitäten bereits bei der Angebotserstellung berücksichtigen, auch dass man – aus welchen Gründen auch immer – gar nicht oder nicht zum entsprechenden Zeitpunkt fliegen kann.

Literatur

Agisoft: www.agisoft.com, 2016.

Hans-Seidl-Stiftung: www.hss.de/politik-bildung, 2016.

Hexagon Geosystems Aibotix: www.aibotix.com, 2016.

Nachrichten für Luftfahrer vom 20.07.2016, 1-786-16: DFS Deutsche Flugsicherung.

Schmechtig, O.: Alles UAV? Was ist möglich oder wie geht es weiter? 19. Internationale Geodätische Woche der Geodäsie Obergurgl.

UAV DACH e. V.: www.uavdach.org.

Kontakt

Oliver Schmechtig

Ingenieurbüro Schmechtig

UAV-Photogrammetrie: Von der Flugplanung zum fertigen 3D-Modell – Erkenntnisse und praktische Herausforderungen

Daniel Stier | Mario Haupt

1 Motivation

Die Glückauf-Vermessung GmbH ist durch Management-Buy-out aus der Zentralmarkscheiderei der Kali-Südharz AG entstanden. Seit 1993 hat sich die Glückauf-Vermessung GmbH von einem regionalen Bergbau-Vermessungsdienstleister zu einem überregionalen Partner auf dem Gebiet des Markscheidewesens, der Ingenieurvermessung, des Geodatenmanagement sowie der Aerosensorik entwickelt. Durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung von etablierten Verfahren und neuesten Techniken sind innovative Lösungen im unter- wie auch übertägigen Bereich geschaffen worden.

Die jüngste Leistungserweiterung in unserem Unternehmen verfolgt die Strategie einer photogrammetrischen Auswertung mittels UAV (Unmanned Aerial Vehicle) erfasster digitaler Bilder. Der entscheidende Vorteil dieser Messtechnologie gegenüber konventionellen Messverfahren ist die nahezu lückenlose Objekterfassung mit simultaner Aufnahme von visuellen Zusatzinformationen und dem sich daraus resultierenden hohen Detailierungsgrad des Messobjektes. Die Daten können mit einer Geschwindigkeit erfasst werden, die dem terrestrischen Laserscanning gleichzusetzen ist und Vorteile gegenüber der klassischen punktbasierten Messmethoden bringt.

Dadurch entsteht eine zentrale Fragestellung: Kann eine photogrammetrische Auswertung mittels UAV erfasster digitaler Bilder bisherige terrestrische Aufnahmemethoden ersetzen oder sogar verdrängen?

2 Einführung

2.1 Grundzüge der Photogrammetrie

Die Photogrammetrie ist ein indirektes dreidimensionales Messverfahren zur Bestimmung der Lage und der Form von Objekten im Raum mittels Bildmessung aus einem oder mehreren Bildern. Es handelt sich dabei um ein passives

Verfahren, da die berührungslose Objektnachbildung aus der räumlichen Lage der Bilder und deren Strahlenbündeln abgeleitet wird. Die Aufnahmeverfahren unterteilen sich in Terrestrische Photogrammetrie und Luftbildphotogrammetrie, beziehungsweise in Einbild-, Stereobild- und Mehrbildmessungen. Das primäre Ziel einer photogrammetrischen Auswertung ist die Wiederherstellung der räumlichen Lage von Bildern zueinander, in der sie sich zum Zeitpunkt der Aufnahme befanden und der daraus resultierenden exakten dreidimensionalen geometrischen Rekonstruktion eines Messobjektes.

Wurden in der Vergangenheit spezielle Messkameras auf Stativen oder in Kleinflugzeugen verwendet, so existiert seit einigen Jahren eine neue mobile Plattform Messkameras und auch „Consumer Kameras“ zu positionieren. Die „freie“ Standpunktwahl erfolgt mit Hilfe eines „fliegenden Stativen“, dem Multikopter. Der zentrale Sensor für die Datenerfassung ist aber weiterhin die Digitalkamera und das damit erzeugte Bild, denn daraus werden die Messergebnisse abgeleitet beziehungsweise berechnet. Die Eignung von UAV-Systemen für die Vermessung wurde inzwischen in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten nachgewiesen.

2.2 Technische Aurüstung

2.2.1 Hardware – UAV-System, Kamera (Sensor)

An unterschiedlichen UAV-Systemen besteht derzeit kein Mangel, so obliegt es dem Nutzer, sich entsprechende Kenntnisse anzueignen, um seine anstehenden

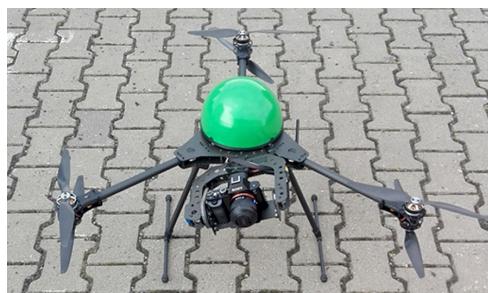


Abb. 1: UAV-Plattform inklusive Sensor Sony a7R

Aufgaben bestmöglich zu erledigen. Die technische Ausrüstung der Glückauf-Vermessung GmbH umfasst im Außendienst für die photogrammetrische Erfassung zum einen die Flugplattform inkl. Sensor (Abb. 1) und zum anderen eine Bodenkontrollstation (BKS). Diese BKS setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- eine Funkfernsteuerung mit Live-View-Monitor (Übertragung des Video-signals) zur Steuerung des Multikopters sowie des Sensors,
- ein Laptop zur visuellen Kontrolle der Telemetrie und der Flugroute.

Aufgrund der starken Dynamik in diesem Sektor entstehen immer wieder neue Konstruktionen, Bauformen und Modelle von Multikoptern wie auch Systemerweiterungen, z. B. hinsichtlich Hinderniserfassung und -erkennung, verbesserte Sensorstabilisierungssysteme (Gimbal) und inzwischen auch erste kombinierte Multisensorsysteme (z. B. RGB und NIR).

2.2.2 Software – Flugplanungssoftware, Auswertesoftware

Eine sehr wichtige Grundvoraussetzung für eine effizientere Auswertung bzw. Bearbeitung von UAV-Projekten bildet der Einsatz von leistungsstarken Desktopcomputern, wie sie bereits bei der Auswertung von Laserscanning-Projekten im Einsatz sind. Zur softwaretechnischen Standardausrüstung gehört eine Flugplanungssoftware (z. B. Mission Planner), eine photogrammetrische Auswertesoftware (z. B. Pix4D, Agisoft Photoscan) sowie eine leistungsfähige Bildbearbeitungssoftware.

Kann der Abstand zum Aufnahmeobjekt während eines Bildfluges nahezu konstant gehalten werden, so kommt die Flugplanungssoftware für horizontale wie vertikale automatisierte Bildflüge zum Einsatz. Befinden sich im Aufnahmegerieb zu erfassende Gebäude oder Geländestrukturen, die im Verhältnis zur Flughöhe einen großen Höhenunterschied aufweisen, so müssen von diesen im Freiflug Schrägaufnahmen erzeugt werden. Der Vorteil der Flugplanungssoftware ist eine konstante Überlagerung der Bilder längs und quer der Flugrichtung und das Wissen der benötigten Flugzeit über dem Aufnahmegerieb. Welche Parameter bei der Flugplanung eine Rolle spielen wird im [Kap. 3.1.1](#) näher erläutert. Die Auswertesoftware ermöglicht den digitalen Bildverband mittels Bündelblockausgleichung so zu orientieren, dass als Ergebnis eine Punktwolke ([Abb. 2](#)), ein Gitter (Mesh) oder ein Orthofoto je nach Projektziel berechnet wird.

Aufgrund der kurzen Entwicklungsintervalle für neue Softwarelösungen und Hardwarekomponenten entstehen an dieser Stelle sehr oft Investitions herausforderungen. Es bedarf vom Unternehmer einer gründlichen Analyse des Marktes, um eine zielgerichtete Entscheidung treffen zu können. Es können sich zum Beispiel folgende Fragestellungen bei der Analyse ergeben:

- Wie lange ist die Rechenleistung noch ausreichend, um effizient zu arbeiten?
- Werden neue Sensorarten für zukünftige Projekte benötigt?
- Inwieweit sind Erweiterung des UAV-Systems (z. B. neue Softwareversion der Flugsteuerung) für meine Projekte relevant?



Abb. 2:
Colorierte Punkt-
wolke einer Halde

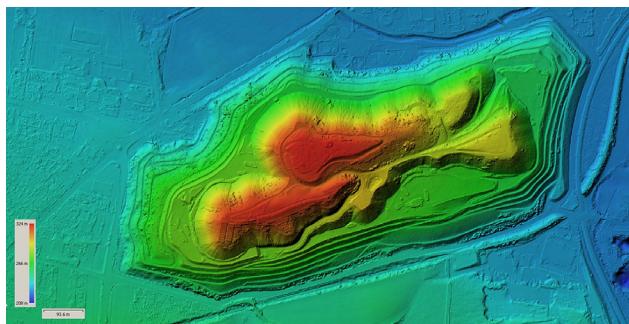


Abb. 3:
Resultierendes
DHM

- Kann mit neuer Auswertesoftware ein besseres Ergebnis erzielt beziehungsweise die Auswertung effizienter gestaltet werden?

2.2.3 Einsatzbereiche

Für die UAV-Anwendungsfelder gibt es eine große Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten in Abhängigkeit vom gewählten Sensor. Es erschließen sich für den Geodäten völlig neue Betätigungsmöglichkeiten, auch aufgrund der höheren Affinität der Kunden gegenüber dreidimensionaler Daten und fotorealistischer Darstellungen. So haben sich für unser Unternehmen die folgenden Kernbereiche herauskristallisiert:

- Mapping,
- Überwachungsmessung/Deformationskontrolle,
- Bauzustandsdokumentation/Beweissicherung,
- Volumenermittlung/Massenberechnung/Mengenermittlung ([Abb. 3](#)),
- Bauwerksinspektion,
- UAV/3D-Laserscanning to BIM.

3 Methodik

Um eine zielgerichtete Durchführung eines Auftrages zu gewährleisten, wurde ein Ablauf-/Prozessplan (Abb. 4) aufgestellt, welcher aus den Erfahrungen mehrerer Projekte entstanden ist. So muss der Auftrag folgende Eckpunkte als Mindestmaß enthalten:

- Das Objekt selbst, namentlich bzw. ob es sich dabei um eine Fläche oder ein Gebäude handelt.
- Spezifikationen zur Ausdehnung sowie mindestens zwei Eckkoordinaten, um es im einschlägigen Kartenmaterial zur Planung oder für eine eventuelle Besichtigung identifizieren zu können.
- Welcher Sensor kommt zum Einsatz, z. B. ob RGB, IR/NIR oder Thermal.
- Welche Genauigkeit wird in der Ground Sample Distance (GSD – Bodenpixelauflösung) gefordert.
- Ist eine Georeferenzierung durchzuführen und wenn ja, in welchem Lage- und Höhenbezugssystem.
- Welches Ergebnis muss übergeben werden: ein digitales Orthofoto (DOP), ein digitales Geländemodell (DGM), ein digitales Oberflächenmodell (DOM), eine Punktfolie oder eine 3D-Lageplanauswertung.

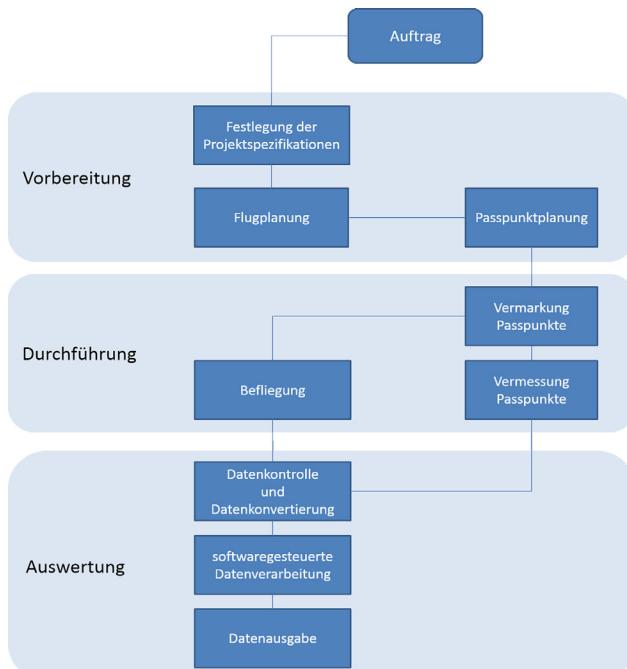


Abb. 4:
Ablauf-/Prozessplan

3.1 Projektdurchführung

3.1.1 Vorbereitung (Flugplanung und Passpunktplanung)

Der Aufwand der Flugplanung wird meist stark unterschätzt, da bei diesem Punkt oft die Meinung einhergeht, es müssen lediglich nur „ein paar Knöpfe“ in der Software gedrückt werden und schon ist alles fertig. Doch diese falsche Annahme führt in der praktischen Realität schnell zu einer Ernüchterung. Bevor es an die Flugplanungssoftware geht und dort dann der eigentliche Flugweg geplant werden kann, sind im Vorfeld noch eine ganze Reihe von anderen Fragen zu klären. In Abhängigkeit von der Lage des zu erfassenden Objektes ist zuerst zu klären, ob ein Flug ohne Beeinträchtigung der Funksteuerung möglich ist. Weiterhin ist zu klären, ob das Objekt von allen zu erfassenden Seiten einsehbar beziehungsweise ob der Luftraum frei von Hindernissen ist. Wie hoch muss die Überlappung in Längs- und Querrichtung sein, damit die Software die erfassten Bilddaten zum geforderten Ergebnis verarbeiten kann? Diese ist vom Auswerteverfahren abhängig, das heißt, ob der Bildverband zum Beispiel stereoskopisch oder im Structure-for-Motion (SFM) Verfahren ausgewertet wird. Ebenfalls nicht zu unterschätzen sind die vorliegenden Witterungsbedingungen.

- Wie hoch ist der Sonnenstand?
- Wo und wie sind Schattenfelder vorhanden? Wie sind die Lichtverhältnisse am Flugtag?
- Und vor allem wie sind die Windverhältnisse, um nur einige zu nennen.

Des Weiteren ist die Struktur des Geländes zu berücksichtigen, um Verdeckungen bei der Erzeugung von topographischen Aufnahmen, wie zum Beispiel die Erfassung von Oberflächenformen eines Geländes, von Infrastrukturanlagen oder von Gewässern, zu vermeiden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Relief, die Bebauung und der Bewuchs des Geländes sowie die Struktur des Gebäudes, das geplante Auswerteverfahren und die geforderte Genauigkeit die entscheidenden Faktoren für eine Flugplanung sind.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, der im Vorfeld der eigentlichen UAV-Befliegung geklärt werden muss, sind die rechtlichen Belange und deren praktische Umsetzung. Im Mai 2012 wurde erstmals mit dem 14. LuftVGÄndG (Gesetz zur Änderung des Luftverkehrsgesetzes) im § 1 des LuftVG (Luftverkehrsgesetz) in der Definition der Luftfahrzeuge die unbemannten Luftfahrtsysteme mit aufgenommen. Somit trat für UAV-Systeme eine erlaubnisbedürftige Nutzung des Luftraumes in Kraft. Vor jedem UAV-Einsatz bedarf es einer Klärung ob Sperrzonen bzw. Flugverbotszonen vorliegen, ob eine allgemeine Aufstiegsgenehmigung ausreicht oder eine Sonderaufstiegsgenehmigung beantragt werden muss und ob datenschutzrelevante Bedingungen eingehalten werden müssen.

Dient die Befliegung der Beobachtung des öffentlichen Raums, ist diese nach § 6b BDSG (Bundesdatenschutzgesetzes) zulässig, soweit sie

- 1. zur Aufgabenerfüllung öffentlicher Stellen,
- 2. zur Wahrnehmung des Hausrechts oder
- 3. zur Wahrnehmung berechtigter Interessen für konkret festgelegte Zwecke erforderlich ist und keine Anhaltspunkte bestehen, dass schutzwürdige Interessen der Betroffenen überwiegen.

Bei der Beobachtung des nicht-öffentlichen Raums (z. B. umzäuntes Privatgelände, Werksgelände) finden die allgemeinen Regelungen des Bundesdatenschutzgesetzes (Erster Abschnitt) Anwendung, wenn die von dem unbemannten Luftfahrtssystem erfassten Daten „personenbezogen“ bzw. „personenbeziehbar“ sind.

Erst wenn diese Fragen, gegebenenfalls durch eine örtliche Begehung geklärt wurden, können die Flugparameter des Bildfluges in der Planungssoftware (z. B. Mission Planner) ermittelt werden. Durch einen polygonalen Umriss um das Aufnahmegerüst lässt sich im Anschluss eine automatisierte Flugroute erstellen. Es müssen folgende grundlegende Kameraparameter (siehe Abb. 5) in der Software definiert werden:

- Brennweite der Kamera in mm,
- Bildgröße in Pixel,
- Sensorgröße in mm.

Sollten diese Kameraparameter nicht bekannt sein, lassen sie sich sehr komfortabel aus einem existierenden Bild der Aufnahmekamera automatisch herleiten. Weitere wichtige Kriterien für den autonomen Wegpunkteflug und der resultierenden Bodenauflösung (GSD) sind die Werte für die Längs- und Querüberdeckung (Abb. 6), die vordefinierte Flughöhe, die Fluggeschwindigkeit sowie die Ausrichtung der Flugstrecke zum Objekt.

Zu beachten ist, dass die eingestellte Flughöhe in Abhängigkeit vom gewählten Sensor im direkten Verhältnis zur GSD steht und

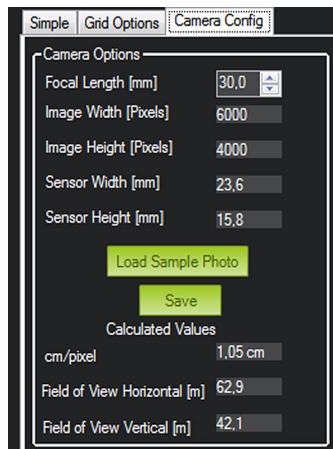


Abb. 5: Kameraparameter

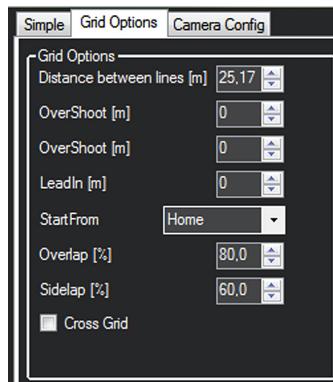


Abb. 6: Parameter zu Bildüberlappung

somit an die Projektanforderungen angepasst werden muss. Als Ergebnis wird eine Übersicht der Flugroute erstellt, in der sämtliche Wegpunktstationen angezeigt werden, an denen ein Bild erzeugt wird (Abb. 10). Die Eingabe der Parameter muss mit hoher Konzentration erfolgen, da nach diesen Einstellungen das System autonom das Projektgebiet überfliegt und jede fehlerhafte Eingabe den Flug und das resultierende Ergebnis beeinflusst. Nach der Berechnung der Flugparameter für den autonomen Bildflug muss im nächsten Bearbeitungsschritt die Planung der erforderlichen Pass- und Kontrollpunkte erfolgen. Die Lage der Passpunkte muss im Messgebiet so gewählt werden, dass eine Aerotriangulation rechnergestützt durchgeführt werden kann. Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass die Lage der Passpunkte das Erfassungsgebiet umspannen und die Messmethode zur Koordinatenbestimmung der Passpunkte in Abhängigkeit zu der projektbezogenen Genauigkeitsvorgabe gewählt werden muss. Da das Thema Passpunkte sehr umfangreich ist und den Rahmen dieses Beitrages sprengen würde, sei es hier nur in dieser Kürze erwähnt.

3.1.2 Durchführung

Ist die Vorbereitung abgeschlossen, kann die Umsetzung der Planung in die Örtlichkeit des Projektgebietes durchgeführt werden. Dazu zählen die Vermarkung und Vermessung der Pass- und Kontrollpunkte und die Befliegung des Projektgebietes. Da zur Herstellung der örtlichen Passpunkte oft Markierungstafeln verwendet werden, sollte die Einmessung möglichst zeitgleich mit dem Bildflug erfolgen. Damit wird eine Positionsveränderung der Passpunkte durch äußere Einflüsse, wie zum Beispiel Witterung, und die daraus resultierenden Fehler minimiert. Am Flugtag sind die meteorologischen Bedingungen, sowie das GPS-Wetter vor dem Bildflug zu prüfen und zu dokumentieren. Vor dem Start ist eine für das eigene UAV-System angepasste Checkliste abzuarbeiten. Sind alle erforderlichen Bedingungen geprüft, kann das System von einem erfahrenen Piloten gestartet und der vorprogrammierte Bildflug autonom durchgeführt werden. Nach Abschluss der Flugmission sollte erfahrungsgemäß ein Blick auf die gerade erfassten Bilder geworfen werden. Das Bildmaterial ist zu kontrollieren, ob die Voreinstellungen wie Belichtungszeit, Blende und ISO korrekt für den Bildflug eingestellt waren. Für den unerfahrenen Operator empfiehlt es sich deshalb, vor dem Bildflug eine Probeaufnahme anzufertigen und diese auf die eben erwähnten Voreinstellungen hin abzugleichen und gegebenenfalls zu korrigieren. Mit einem leistungsstarken Laptop kann vor Ort eine relative Orientierung des Bildfluges berechnet werden, um so zu sehen, ob Fehler auftraten und der Bildflug gegebenenfalls wiederholt werden muss. Bei Projekten mit mehreren Starts des UAV-Systems ist auf eine ausreichende Anzahl von Akkus zu achten, beziehungsweise mit dem Auftraggeber abzuklären, ob diese eventuell vor Ort

nachgeladen werden können. Besteht keine Möglichkeit der Stromversorgung vor Ort zum Nachladen der Akkus, so ist ein Notstromaggregat unverzichtbar. Auch die Jahreszeit der Befliegung spielt eine wichtige Rolle beim Thema Akku, da die Leistungsfähigkeit bei Temperaturen um den Gefrierpunkt und kälter deutlich abnimmt.

3.1.3 Auswertung

Als Sensor werden bei einem UAV-Bildflug hauptsächlich handelsübliche nicht-metrische Kameras eingesetzt. Die erfassten Bilder sollten im RAW-Format vorliegen, was eine nachträgliche Bearbeitung von Belichtung und Tonwertkorrekturen zulässt. Für die photogrammetrische Auswertung kommt die Software PhotoScan der Firma Agisoft zum Einsatz. PhotoScan ist ein modernes Auswerteprogramm, welches auf Ansätzen aus der Computer Vision basiert und das SFM-Verfahren zur Berechnung von 3D-Oberflächenmodellen verwendet. Da die Software bei größeren Bildverbänden sehr ressourcenintensiv ist, müssen die Systemvoraussetzungsangaben des Herstellers beachtet werden.

Wie bereits erwähnt, muss vom Auftraggeber der Genauigkeitsanspruch definiert werden. Daher ist zu prüfen, mit welchem Sensortyp die geforderte GSD erreicht wird. Aus den Parametern des Sensortyps resultiert, bis zu welcher maximalen Detailstufe das Auswerteregebnis berechnet werden kann und ist deshalb von besonderer Wichtigkeit. Nicht immer ist die höchste Genauigkeit sinnvoll, ganz dem Motto so genau wie nötig und nicht so genau wie möglich, was sich auch auf den Zeitfaktor in der Auswertung auswirkt. Wurde der Bildflug gemäß der Vorgaben durchgeführt, kann in die Auswertesoftware eingestiegen und die notwendigen Schritte zum Erreichen des Resultates können durchlaufen werden. Diese sind in PhotoScan:

- Fotos hinzufügen,
- Fotos ausrichten,
- dichte Punktwolke erzeugen,
- Gitter erzeugen,
- Textur erzeugen.

In Abhängigkeit von der Objektgröße und der Computerperformance sollte der Bildverband in kleinere Bereiche aufgeteilt werden, wenn der Bildflug nicht von vornherein in mehreren Blöcken durchgeführt wurde. Zu empfehlen sind Bildverbände von nicht mehr als 200 Fotos bei einer anstehenden Auswertung mit einem 64-bit-System, einem guten Core-i7, schnellen 64 GB-RAM und einer aktuellen Nvidia-Grafikkarte.

Sind alle Bilder nach dem Konvertieren in das jpg-Format oder tif-Format in die Software eingefügt, kann mit dem Ausrichten der Bilder begonnen werden.

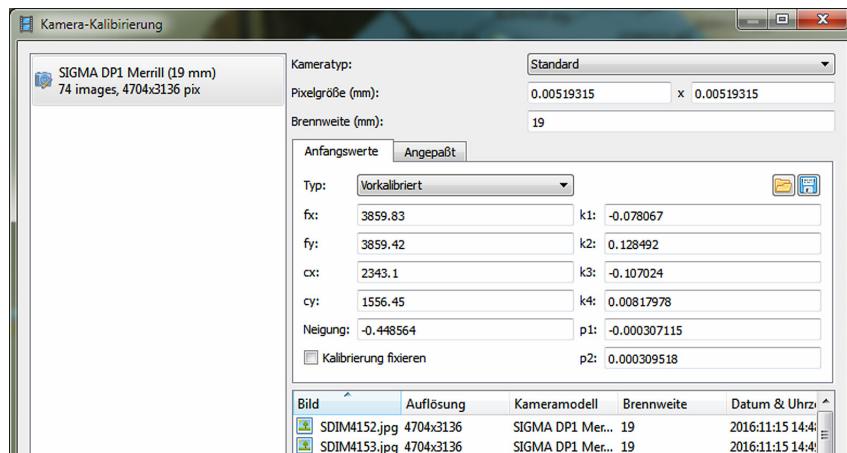


Abb. 7: Kamerakalibrierungswerte in PhotoScan

PhotoScan bietet die Möglichkeit, diesen Prozess vollautomatisiert berechnen zu lassen. Zur Genauigkeitssteigerung und anschließenden absoluten Orientierung müssen vor Prozessablauf die in der Örtlichkeit vermessenen Passpunkte in den jeweiligen Bildern softwareintern markiert werden. Der nächste Schritt der Auswertung ist die Bestimmung der relativen Orientierung mit anschließender Bündelblockausgleichung. Die notwendige Berechnung der inneren Orientierung beziehungsweise der Abbildungseigenschaften einer Aufnahmekamera wird in der Photogrammetrie allgemein als Kalibrierung bezeichnet und heute in der Regel durch die Aufnahmen von Prüffeldern oder „on-the-job“ aus den Aufnahmefotos des UAV-Projektes ermittelt. Ideale Ergebnisse lassen sich dabei mit einem Festbrennweitenobjektiv erzielen, da die Parameter der inneren Orientierung (Abb. 7)

- die Kamerakonstante c (bei PhotoScan: fx und fy),
 - der Bildhauptpunkt H (bei PhotoScan: cx und cy),
 - die radial-symmetrische Verzeichnung (bei PhotoScan: k_1 – k_4),
 - die tangentiale Verzeichnung (bei PhotoScan: p_1 und p_2)
- so konstant sind. Die Koordinaten des Projektionszentrums in Bezug auf die Bildecke werden als Elemente der inneren Orientierung bezeichnet.

Die Berechnung der relativen Orientierung erfolgt über Verknüpfungspunkte, indem Punkte selektiert und mit identischen Punkten in anderen Bildern in eine Beziehung gesetzt werden. Zum anderen können die Verknüpfungspunkte in digitalen Bildern auch mit Methoden zur automatischen Extraktion von Bildmerkmalen gewonnen werden. Der Algorithmus zur Extraktion lokaler Bildmerkmale wird als Scale – Invariant Feature Transformation (SIFT – maßstabsunabhängige Merkmalstransformation) bezeichnet und wird vorrangig bei

der Bildregistrierung beziehungsweise der Bildzuordnung verwendet. Es stellt sich die zentrale Frage: Was beeinflusst die Genauigkeit der relativen Orientierung? In der Regel sind es systematische Fehler des Messbildes wie Fehler der inneren Orientierung, Deformation des Sensors, Refraktion und Erdkrümmung bei der Aufnahme.

Die Berechnung der absoluten Orientierung eines Modells ist gleichbedeutend mit einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation. Die sieben unbekannten Transformationsparameter werden mit Hilfe identischer Punkte im Modell- als auch im Aufnahmeeobjektkoordinatensystem ermittelt, das heißt, es werden metrische Informationen über das Aufnahmeeobjekt benötigt. Die Genauigkeit ist abhängig von der relativen Orientierung und der Messunsicherheit der Passpunkte.

Wurden die Bilder durch programminterne Bündelblockalgorithmen ausgerichtet, kann im nächsten Schritt eine Punktwolke aus den Bilddaten abgeleitet werden. Die Punktwolke ist in ihrer Dichte aufgabenbezogen herzustellen. Die Rechenzeit der Auswertung unterliegt gewissen Kriterien. In Abhängigkeit von der Definition des Auswerteergebnisses können softwareseitige Einstellungen des Detaillierungsgrades von sehr niedrig bis sehr hoch vorgenommen werden. Nicht immer ist es sinnvoll, die höchste Dichte zu erzeugen und so das Projekt mit Millionen von Punkten zu überflutten. Das aus der Punktwolke abgeleitete Ergebnis ist ein Gitter (Mesh), welches die digitale Oberfläche des Aufnahmeeobjektes widerspiegelt. Auf dieses Gitter wird im nächsten Schritt ebenfalls automatisiert die Textur aufgelegt. In Abhängigkeit der Auflösung der Bilder und der verwendeten Grafikkarte lassen sich Texturen in niedriger bis sehr hoher Auflösung erzeugen. Ist die Textur aus den einzelnen Aufnahmen erzeugt, lässt sich im abschließenden Schritt ein georeferenziertes Orthofoto oder ein digitales Oberflächenmodell als Ergebnis in diverse Formate exportieren. Werden vom Projektgebiet nur lotrechte Aufnahmen erzeugt, ist bei der Erstellung von Orthofotos zu beachten, dass die berechnete Textur an Objektkanten mit einem sehr großen vertikalen Höhenunterschied fehlerhafte Farbwerte aufweist. Auch bei sehr homogenen Oberflächen, wie zum Beispiel Wasser oder eine weiße stark belichtete Wand, hat eine computergesteuerte Auswertung ihre Schwierigkeit, so dass in diesen Flächen keine Berechnungen durchgeführt werden können. Somit ist es bei bestimmten Strukturen gegebenenfalls notwendig, terrestrische Ergänzungsmessungen durchzuführen.

4 Praktische Umsetzung

Anhand ausgewählter Beispiele werden im Folgenden die gewonnenen Erkenntnisse kurz dargestellt.

4.1 Projektbeispiel Bestandsvermessung Straßenbau

Im Zusammenhang des Neubaus einer Ortsumfahrung wurde die Schlussvermessung teils terrestrisch und teils photogrammetrisch durchgeführt. So waren ausreichend Kontrollpunkte vorhanden, um die geforderte Genauigkeit der Befliegung zu überprüfen. Die notwendigen Passpunkte wurden mittels RTK-GNSS bestimmt. Die besondere Herausforderung bei der Flugplanung war die Gesamtlänge von ca. 1.500 m, wovon ca. ein Drittel im Bogen verläuft und im Streckenverlauf eine variierende Objektbreite zwischen 60 m bis 120 m berücksichtigt werden musste. Das Objekt wurde in fünf Einzelmisionen aufgeteilt, in denen je ca. 120 Bilder erzeugt wurden.

■ Genauigkeiten	GSD < 2 cm
■ Flughöhe	80 m
■ Überlappung in Flugrichtung	80 %
■ Überlappung seitlich	70 %
■ Fluggeschwindigkeit	3 m/s

Nach der Zuordnung der Passpunkte und der Auswertung von ca. 600 Bildern mit der Software PhotoScan war das Ergebnis ein georeferenziertes Orthofoto ([Abb. 8](#)). Da der Zeitpunkt der Erfassung im November lag, war der Sonnenstand niedrig, was einen geringeren Lichteinfall in das Objektiv und einen großen Schlagschatten zur Folge hat. Auf Grund der wenigen Sonnenstunden in dieser Jahreszeit verkürzt sich der Rahmen der Flugzeit erheblich. Das Gesamtergebnis war ein Lage- und Höhenplan mit einer Genauigkeit von 2 cm ([Abb. 9](#)).



Abb. 8:
Orthofoto der
Mission 1, generiert
aus ca. 120 Einzel-
bildern

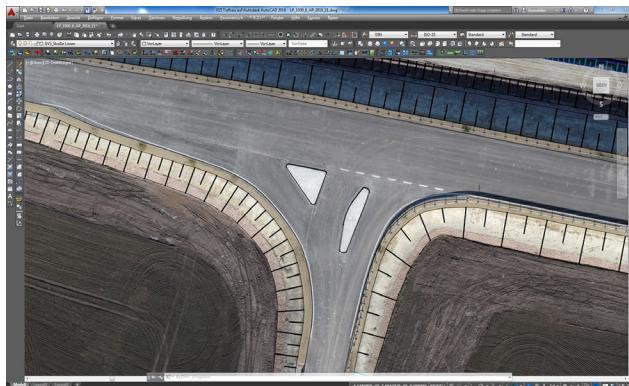


Abb. 9:
Darstellung
Bestands-
vermessung mit
Orthofoto

4.2 Projektbeispiel Entwurfsvermessung

Für eine Umplanung einer Kompostieranlage wurde die Erstellung eines Bestandplans gefordert. Die Passpunkte für eine Georeferenzierung wurden in diesem Fall mittels RTK-GNSS sowie tachymetrisch bestimmt. Die Flugplanung (Abb. 10) gestaltet sich in diesem Fall recht einfach. Schwierig war jedoch den passenden Flugtag zu finden, da aufgrund des vorhandenen Wasserbeckens im Projektgebiet störenden Reflexionen durch Sonnenlicht vermieden werden mussten.

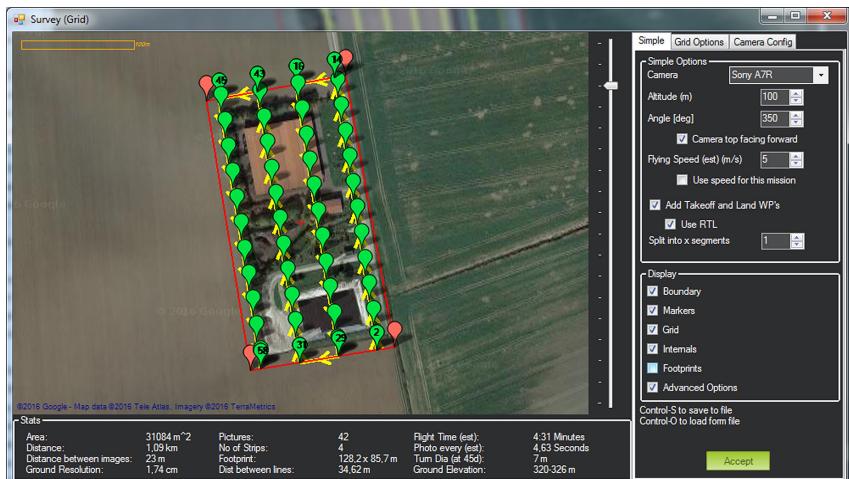


Abb. 10: Darstellung der Flugplanung mit den Aufnahmepunkten



Abb. 11: Dichte Punktwolke



Abb. 12: Darstellung des Orthofotos

▪ Genauigkeiten	GSD < 2 cm
▪ Flughöhe	70 m
▪ Überlappung in Flugrichtung	80 %
▪ Überlappung seitlich	70 %
▪ Fluggeschwindigkeit	5 m/s

Nach der Zuordnung der Passpunkte und der Auswertung von ca. 50 Bildern (Abb. 11) mit der Software PhotoScan war das Ergebnis ein georeferenziertes Orthofoto (Abb. 12). Im Anschluss erfolgte eine stereoskopische Auswertung mit anschließendem Feldvergleich. Die aus den Luftbildern nicht sichtbaren Bereiche wurden durch terrestrische Ergänzungsmessung nachträglich erfasst. Im Gesamtergebnis ist ein Lage- und Höhenplan mit einer Einzelpunktgenauigkeit von 2 cm erzeugt worden.

4.3 Projektbeispiel Bestandsdokumentation Gebäude

In Zusammenarbeit mit der Firma denkmal3D wurde von einer Kirche ein Bestandsplan angefertigt. In diesem Projekt wurde die Punktwolke des terrestrischen Laserscans mit der Punktwolke der UAV-Befliegung miteinander verschnitten (Abb. 13 und Abb. 14). Die Herausforderung für die Befliegung war, dass ein vorprogrammierter Bildflug und mehrere händische Bildflüge, um das Kirchenbauwerk herum, zu kombinieren waren. Auch die sehr verwinkelte Dachform war für eine lückenlose photogrammetrische Auswertung herausfordernd.

▪ Genauigkeiten	GSD < 2 cm
▪ Flughöhe	40–100 m
▪ Überlappung in Flugrichtung	80 %
▪ Überlappung seitlich	70 %
▪ Fluggeschwindigkeit	3 m/s

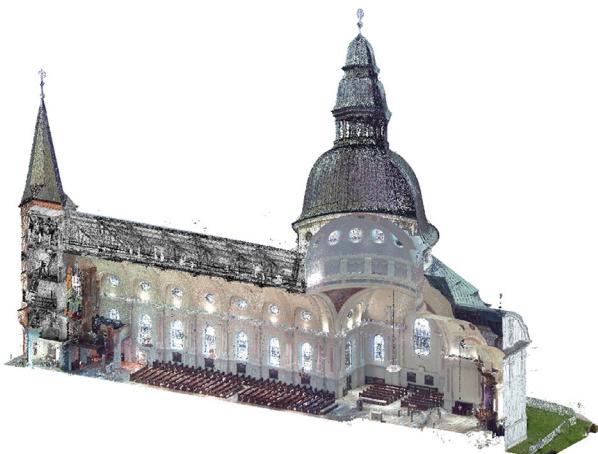


Abb. 13:
Längsschnitt
durch kombinier-
te Punktwolken
(denkmal3D)



Abb. 14:
Schnitt durch kom-
binierte Punktwol-
ken (denkmal3D)

Nach der Zuordnung der Passpunkte, welche mittels Tachymetrie bestimmt wurden und der Auswertung von ca. 600 Bildern mit der Software PhotoScan war das Ergebnis eine Punktwolke. Da der Zeitpunkt der Erfassung im Frühjahr und das Wetter sehr wechselhaft war, musste die Befliegung bei starkem Sonnenschein durchgeführt werden. Eine Schwierigkeit bei der Flugdurchführung war Blende und Belichtungszeit so zu wählen, dass die Bilder der weißen Außenwände trotz intensiver Sonnenreflexion zur Berechnung der Punktwolke Verwendung fanden. Das Gesamtergebnis war eine Punktwolke mit einer Genauigkeit von 3 cm.

4.4 Kritische Punkte

Da die Bildqualität die entscheidende Voraussetzung für alle Berechnungen bildet, ist der Augenblick der Bildentstehung ein wichtiger Faktor für die Qualität und Genauigkeit des Endproduktes. Neben den Witterungsbedingungen, welche im Idealfall Windstille und eine homogene Bewölkung wären, sind die Blende und die Belichtungszeit die kritischsten Punkte. Sind diese beiden Parameter falsch eingestellt, wird in der Auswertesoftware keine oder eine fehlerhafte Berechnung durchgeführt. Bei der Einstellung der Blende sorgt eine große Blendenzahl für eine kleine Öffnung und somit für eine größere Tiefenschärfe. Eine kleine Blendeöffnung lässt aber nur wenig Licht auf den Sensor der Kamera, was als Folge zu dunkle Bilder hat. Als Anwender von UAV-Systemen kann man nur durch die Erfahrung mehrerer durchgeföhrter Projekte mit dem eigenen System einen guten Kompromiss zwischen Tiefenschärfe und ausreichender Beleuchtung des Kamerasensors finden. Aufgrund der heute guten Optik funktionieren auch kleine Blendenzahlen gut bei dunkleren Lichtverhältnissen und erzeugen eine akzeptable Tiefenschärfe im Bild. In Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit sollte möglichst eine kurze Belichtungszeit, zwischen 1/600 und 1/1000, eingestellt werden, um eine Bewegungsunschärfe zu vermeiden. Die Lichtempfindlichkeit des Kamerasensors ist zwischen ISO 100 und 200 optimal. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eher eine Unterbelichtung als eine Überbelichtung im RAW-Format Vorteile hat, da sich diese in einem gewissen Rahmen noch nachkorrigieren lässt.

5 Fazit/Ausblick

Die beschriebenen Beispiele zeigen, dass ein UAV-System eine sinnvolle Ergänzung zur Erledigung der Standardaufgaben beziehungsweise zur Erweiterung des Leistungssportfolios für ein Vermessungsbüro darstellen kann. Durch eine photogrammetrisch basierte Projektplanung kann das System an die erforderlichen Auftragsdaten hinsichtlich Genauigkeit durch variable Sensortypen angepasst werden. Das SFM ist für die Vermessung ebenso ein reizvolles neues Werkzeug, auch wenn es bedeutet, dass zuerst ein erheblicher Schulungsaufwand notwendig ist. Die vor Ort durchzuführenden Arbeiten sind gegenüber klassischen Verfahren schneller und der Informationsgewinn ist wesentlich höher. Diese Technologie stellt mit der notwendigen Hardware im Büro in einer akzeptablen Zeit eine Punktwolke zur Verfügung, die annährend ähnliche Ergebnisse wie beim TLS liefert. Jedoch hat sie eine größere Abhängigkeit zur Objektbeschaffenheit (Oberfläche und Objektstruktur), was das Messrauschen in der Punktwolke unterschiedlich beeinflusst. Während der Bilderfassung und

Bildverarbeitung müssen die Grundsätze der Photogrammetrie beachtet werden, damit die algorithmischen Berechnungen zu einem Ergebnis mit der geforderten Genauigkeit kommen. Eine Punktwolke oder ein DOP können sofort als Ergebnis generiert werden und aufgrund der Vielzahl an Schnittstellen an weitere Programme übergeben werden.

Es gibt auch Aufgaben die mit einem UAV-System nicht zu lösen sind. Wenn zum Beispiel sichtbare Strukturen nicht ausreichend vorhanden sind oder der Bewuchs zu stark ist, dann kommen weiterhin die klassischen Verfahren zum Einsatz. Dennoch bietet die UAV-Technologie eine große Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten. Der Ablaufplan zeigt, dass ein strukturierter Workflow auf diese Projektvielfalt Anwendung finden kann. Wir befinden uns mit dieser Technologie immer noch am Anfang und müssen die Bevölkerung für die vermessungs-technischen Aufgaben mit UAV-Systemen weiterhin sensibilisieren,

Literatur

- DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. (Hrsg.) (2016): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg 2016.
- Heinrich, O. (2014): Rechtliche Rahmenbedingungen für den UAS Einsatz in Deutschland. www.air-verband.de/fileadmin/template/img/Download/Wo_-Kongress_2014/Fachvortraege/Rechtliche_Rahmenbedingungen.pdf, letzter Zugriff 20.12.2016.
- Luhmann, T. (2000): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen.
- Luhmann, T.; Müller, C. (2014): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2014.
- Rüger; Pietschner; Regensburger (1987): Photogrammetrie. Verfahren und Geräte zur Kartenherstellung. 5. bearbeitete Auflage.

Kontakt

Daniel Stier | Mario Haupt
Glückauf Vermessung GmbH, Sondershausen
Salzstraße 10, 99706 Sondershausen
info@glueckauf-vermessung.de

Aktuelle Photo Based Scanning Projekte aus dem Ingenieuralltag

Ulrich Völter

1 Einleitung

Anders als der allgemeine Hype um UAVs und die große von ihnen ausgehende Faszination vermuten lässt, haben sich diese fliegenden Plattformen im Ingenieuralltag noch nicht zu einem Standardwerkzeug entwickelt. Es gibt zwar viele Einsatzmöglichkeiten für UAVs, aber eben auch Hürden und häufig auch gute Alternativen. Konventionelle Aufnahmetechniken mit Tachymeter, GNSS und/oder Laserscanner aber auch das Aufnehmen freier Bildverbände ohne die Zuhilfenahme von Drohnen haben regelmäßig Vorteile. So lassen sich etwa bei tachymetrischer Aufnahme im Zuge der Bestandserfassung auch gleich die Koordinaten eines Festpunktfeldes mit bestimmen, man kann im Angesicht der Objekte auf einer innerstädtischen Straßenkreuzung ohne Zusatzaufwand unter die parkenden Autos sehen, Oberleitungen von Straßenbahnen stellen keine rechtlichen Hindernisse dar, Laserscanner liefern bei allen Lichtverhältnissen gleich gute Ergebnisse, das Fotografieren „aus der Hand“ erfordert keine besonderen Aufstieggenehmigungen und ist nicht durch kurze Flugzeiten eingeschränkt. Und für die Situationen, in denen UAV unschlagbare Vorteile gegenüber anderen Systemen haben, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme: Multi-kopter, Starrflügler, kombinierte Systeme, mit und ohne aktive Flugsteuerung bis hin zu autonomen Flugrobotern. Die Flugzeiten und maximalen Traglasten unterscheiden sich um Größenordnungen.

Aufgrund dieser Tatsachen haben wir bei intermetric es bisher vorgezogen, keine eigene Flugplattform anzuschaffen, sondern uns bei Bedarf Bilder definierter Qualität und Überlappung von einem Dienstleister erstellen zu lassen und uns auf den zweiten, ingenieurgeodätisch interessanten Schritt, die Auswertung der Bildverbände, zu konzentrieren. In unseren Projekten kombinieren wir häufig auch unterschiedliche Aufnahmetechnologien und können auf diese Weise die individuellen Stärken der Systeme ins Spiel bringen.

2 Kerosin-Pipeline für den Stuttgarter Flughafen

Der Flughafen Stuttgart benötigt jährlich etwa 220 Millionen Liter Kerosin, um den Durst der Airlines zu stillen. Dieser Bedarf wird bisher mit etwa 6.500 Tank-

lasterladungen gedeckt, das sind 30 Fahrten pro Tag. Der Bedarf kommt, etwa im Verhältnis 2:1, aus dem Tanklager Heilbronn und aus dem Neckarhafen Plochingen. Da das Tanklager Heilbronn 2017 geschlossen werden soll, denkt man seit einigen Jahren am Flughafen Stuttgart über Alternativen nach.

In der Nähe des Flughafens verläuft eine Pipeline des Zentraleuropäischen Pipelinesystems CEPS. Es lag daher im wahrsten Sinne des Wortes nahe, Möglichkeiten für den Anschluss des Flughafens an das CEPS zu untersuchen.

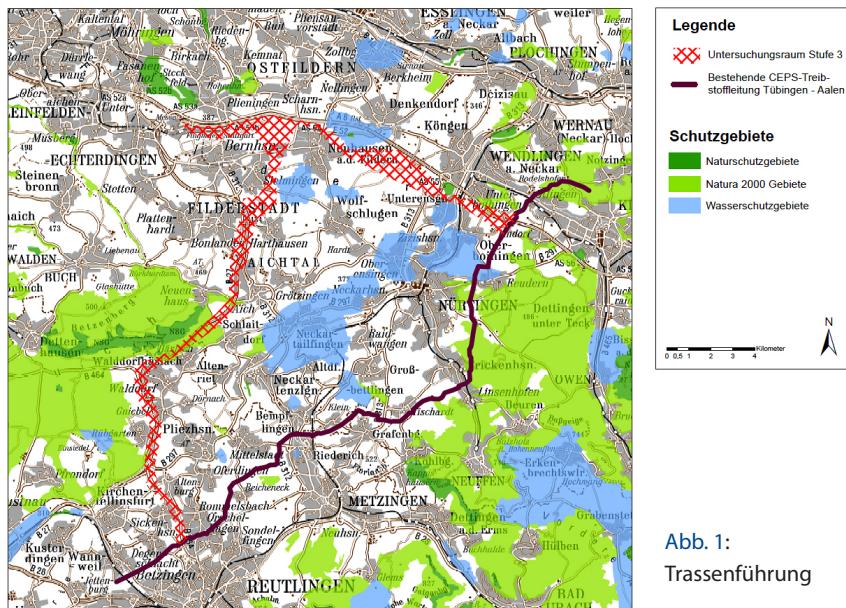


Abb. 1:
Trassenführung

Zwei Varianten kristallisierten sich heraus, die im Rahmen eines Raumordnungsverfahrens ROV näher untersucht werden sollten (Abb. 1). Das mit dieser Aufgabe betraute Ingenieurbüro beauftragte die intermetric damit, für die entlang der Autobahn A8 verlaufende, etwa 18,7 km lange Variante 1 von Oberboingen zum Flughafen, eine Entwurfsvermessung durchzuführen.

Die Fläche im Sicherheitsbereich des Flughafens sollte nicht erfasst werden, da hierfür bereits ausreichende Unterlagen vorlagen. Von den Flächen außerhalb des Flughafens verlaufen etwa 4,1 km im Waldgebiet Sauhag, 11,6 km über landwirtschaftlich genutzte Flächen. Im Waldbereich war der zu erfassende Korridor 20 m breit, auf den Feldern sollten Profile von 40 m Breite erfasst werden. Die geforderte Punktdichte war mit „mindestens 500 Punkte pro Hektar“ – also etwa alle 5 m ein Punkt – angegeben.

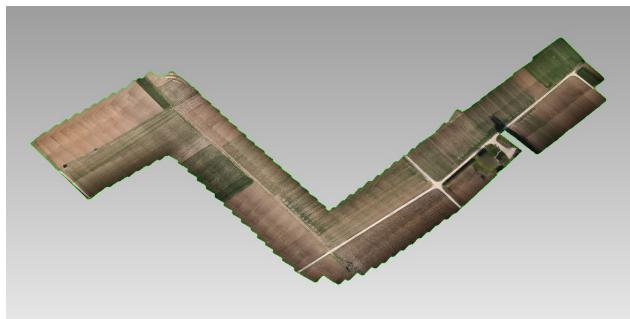


Abb. 2: Verma-
schung aus UAV-
Befliegung

Aufzunehmen und zu klassifizieren waren alle planungsrelevanten Objekte, so wie Schächte inklusive Sohlen, Befestigungen von Straßen und Wegen, Buschwerke etc. Wir entschieden uns dafür, im Wald eine klassische, objektorientierte tachymetrische Aufnahme auf Basis des bewährten intermetric Objektschlüsselkatalogs vorzunehmen, auf den freien Strecken aber einen dichten Bildverband aufzunehmen und diesen im Innendienst auszuwerten ([Abb. 2](#)).

3 Rittersturz

Der Rittersturz ist ein steil zum Rhein hin abfallender Schieferhang bei Koblenz, über den der Legende nach im Mittelalter ein Ritter zu Tode stürzte. Heute trägt diesen Namen auch ein Aussichtspunkt oberhalb und er ist Schauplatz der Rittersturz-Konferenz von 1948, auf der die Länderchefs der westlichen Bundesländer zusammenkamen um die Gründung der Bundesrepublik vorzubereiten.

Oberhalb des Felshanggebietes Rittersturz hat sich ein Riss geöffnet. Es wird befürchtet, dass größere Erdmassen abrutschen könnten. Um die tatsächliche Standsicherheit möglichst realitätsnah berechnen zu können, sollte ein detailliertes 3D-Modell des Ist-Zustands erstellt werden.

Im Bereich des 100 m hohen und 300 m breiten Felshangs mit 45° bis 90° Neigung wurden 27 Bodenpunkte vermarkt und tachymetrisch koordinativ bestimmt. Innerhalb von drei Stunden wurden in vier Flügen mittel Hexakopter ([Abb. 3](#)) 300 hochauflösende Bilder aufgenommen. Bei der Flugplanung wurden die einzelnen Flugstreifen vertikal leicht versetzt übereinander angeordnet. So konnte überall eine ausreichende Überlappung zwischen den Einzelbildern sichergestellt werden.

Das aus diesen Rohdaten von erstellte 3D-Modell ([Abb. 4](#)) hat in den eindeutig identifizierbaren Fels-Bereichen eine Genauigkeit im Zentimeterbereich. Auf dieser optimalen geometrischen Basis konnten die Felsmechaniker nun ihr wirklichkeitsnahe Kräfte- und Bewegungsmodell aufbauen.



Abb. 3: UAV-Einsatz am Rittersturz

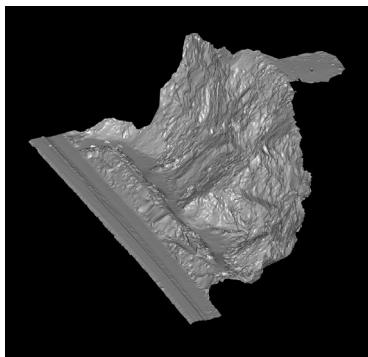


Abb. 4: Rittersturz-Modell

Aufgrund der erfassten Daten und Modelle hat die Stadt Koblenz entschieden, den Hang der natürlichen Erosion zu überlassen, aber die angrenzende B9 und die Linke Rheinstrecke Köln-Bingen durch die Erhöhung eines vorhandenen Erdwalls und einen 4 m hohen Steinschlagschutzzaun vor eventuell möglichen Steinschlägen zu schützen. Inzwischen sind die Sicherungsarbeiten weitestgehend abgeschlossen.

Um die Veränderungen weiter beobachten und mögliche drohende Gefahren rechtzeitig erkennen zu können, baut die Stadt Koblenz in Zusammenarbeit mit der intermetric GmbH ein Geomonitoring auf. Die erste Ausbaustufe besteht aus 40 über den Hang verteilten Prismen, die regelmäßig geodätisch überwacht werden.

Kontakt

Ulrich Völter

intermetric GmbH

Industriestraße 24, 70565 Stuttgart

ulrich.voelter@intermetric.de

Session 4: Innovationen und Zukunft

RIEGL LiDAR-Lösungen für die UAV-basierte Vermessung

Thomas Gaisecker | Ursula Riegl | Philipp Amon | Martin Pfennigbauer

1 Einleitung

Fernerkundung mittels ziviler unbemannter Luftfahrzeug-Systeme (UAS) basierte zunächst vorrangig auf photogrammetrischen Techniken unter Verwendung von Digitalkameras, deren geringes Gewicht es erlaubt, innerhalb der Nutzlastgrenzen der Klasse kleinerer unbemannter Luftfahrzeuge (in den meisten nationalen Luftfahrtregelungen typisch definiert bis etwa 25 kg) zu operieren. Photogrammetrische Methoden leisten, ohne jeden Zweifel, große Verdienste auch im Bereich der UAV-gestützten Vermessung, dank der Verfügbarkeit leichter handelsüblicher Kameras und der Möglichkeit, durch geeignete Datenverarbeitungssoftware genaue Vermessungsergebnisse aus den Einzelaufnahmen zu errechnen.

Bildgebende Methoden haben allerdings im praktischen Einsatz auch Einschränkungen – und genau hier kommen die Vorteile von Laser Scanning zum Tragen. Neben den bekannten Qualitäten von hoher Reichweite und hoher Genauigkeit des Laser Scannings werden vor allem die Möglichkeit, durch Mehrzieldurchdringen Vegetation zu durchdringen, das zuverlässige Vermessen von wenig charakteristisch ausgeprägten Oberflächen oder der Einsatz in umgebungslichtarmen Situationen geschätzt. Laser Scanner sind – als aktive Sensoren – nicht vom Tageslicht abhängig.

Unbemannte Luftfahrzeuge wiederum bieten aufgrund ihrer Einsatzflexibilität neue, bisher unerreichbare Blickpunkte für LiDAR Systeme.

2 Sensorik und Trägerplattform für ULS (UAV-basiertes Laser Scanning)

2.1 RIEGL UAV Laser Scanning System

Ein luftgestütztes Laser Scanning System besteht aus einem LiDAR Sensor (im Beispiel RIEGL einem VUX-1UAV oder miniVUX-1UAV), einer IMU, einem GPS-Empfänger, einem Computer für die Steuerung der Datenaufnahme und optional einer oder mehreren Kameras sowie einem Flugführungssystem. Das

RIEGL VUX-SYS stellt eine Komplettlösung eines hochwertigen Airborne Laser Scanning (ALS) Systems in Miniaturausführung dar, perfekt adaptiert für die Integration in unbemannte Luftfahrzeuge. Das System ist mit mechanischen und elektrischen Standardschnittstellen ausgestattet.

Im Unterschied zum klassischen Airborne Laser Scanning befindet sich die Datenaufnahme-Steuerungseinheit sowie das Flugsteuerungssystem am Boden. Die Datenaufnahme läuft direkt auf einem im Laser Scanner integrierten Computer und ermöglicht über eine Funkverbindung die Steuerung des Laser Scanners von der Bodenstation aus. Damit stehen Features wie das Konfigurieren von Scanparametern und Schnittstellen zum IMU/GNSS-Subsystem oder optionaler, externer digitaler Kameras, sowie das Starten und Anhalten der Datenaufnahme zur Verfügung. Auch wesentliche Information über z. B. den Betriebsstatus des Laser Scanners und der IMU/GNSS-Einheit und anderer optional verbundener Subsysteme werden hier übermittelt und angezeigt.

2.2 *RIEGL VUX-1UAV*

Der kleine und leichte *RIEGL VUX-1UAV* Laser Scanner, ein vollwertiges ALS-Gerät, das auch in dieser kleinen Bauform Vermessungsqualität für sehr hohe Ansprüche liefert, wurde 2014 auf den Markt gebracht. Der VUX-1UAV war damit der erste für die neue Generation kleinerer, unbemannter Luftfahrzeuge optimierte Laser Scanner für professionelle Vermessungsaufgaben.

Mit Hinblick auf die Vielzahl unterschiedlicher Typen von UAVs wurde das Gerät maßgeschneidert für Trägerplattformen mit eingeschränkter Nutzlast, stark begrenztem Platz für die Sensoraufnahme und limitierter Stromversorgung, und so konzipiert, dass die Anbringung am Fluggerät in jeder Orientierung möglich ist. Der komplette Datensatz einer Aufnahmekampagne wird auf einer internen 240 GByte SSD gespeichert und/oder über die integrierte LAN-TCP/IP Schnittstelle, je nach verfügbarer Funkschnittstelle potenziell auch in Echtzeit für die Nachverarbeitung zu Verfügung gestellt.

Der VUX-1UAV bietet hochgenaue Laser-Entfernungsmeßung basierend auf dem *RIEGL*-Verfahren der Echodigitalisierung und Online Waveform Prozessierung, wodurch selbst bei schwierigen Bedingungen hochwertige Messergebnisse erzielt und daraus mehrere Zielechos ermittelt werden können, was die Durchdringung selbst dichter Vegetation und damit das Erfassen von Bodendaten zulässt. Der Scanmechanismus basiert auf einem rotierenden Spiegel, der lineare, unidirektionale und parallele Scanlinien liefert, was zu einer ausgezeichneten regelmäßigen Punktverteilung führt. Die Verwendung von neuester LiDAR Technologie ermöglicht eine effektive Messrate von bis zu 500.000 Messungen pro Sekunde bei einer maximalen Scangeschwindigkeit von 200 Scans pro Sekunde.

In der Bauform des VUX-1 ist neben dem Typ VUX-1UAV auch ein Gerät für besonders hohe Reichweiten, der VUX-1-LR (Long Range) verfügbar. Dieses wird hauptsächlich in für größere Flughöhen zugelassenen Luftfahrzeugen (be-mannete Hubschrauber oder Gyrocopter) betrieben.

2.3 RIEGL miniVUX-1UAV

Der 2016 auf den Markt gebrachte Miniatur Laserscanner miniVUX-1UAV, mit nur 1,55 kg, bietet ebenfalls die bereits vorgestellten technologischen Vorteile von Mehrzielfähigkeit und Wellenform-Prozessierung und damit exzellente, aussagekräftige Vermessungsdaten.

Die Tab. 1 bietet einen Vergleich der Spezifikationen der drei *RIEGL* UAV LiDAR Sensoren. Daraus wird ersichtlich, dass sich der miniVUX-1UAV nicht

Tab. 1: RIEGL VUX-1 und RIEGL miniVUX-1UAV Leistungsdaten

	VUX-1UAV	VUX-1LR	miniVUX-1UAV
Abbildung			
Laserklasse		Laserklasse 1, augensicher	
Gewicht	3,6 kg		1,55 kg
Max. Messreichweite @ 60 %			
Zielreflektivität	920 m	1350 m	250 m
Max. Messreichweite @ 20 %			
Zielreflektivität	550 m	820 m	150 m
Min. Abstand zum Ziel	3 m	5 m	3 m
Genauigkeit	10 mm	15 mm	15 mm
Wiederholgenauigkeit	5 mm	10 mm	10 mm
Max. effektive Messrate	500.000 Messungen/Sek.	750.000 Messungen/Sek.	100.000 Messungen/Sek.
Sichtfeld	330°	330°	360°
Max. Einsatz-Flughöhe AGL	350 m (1150 Fuß)	530 m (1740 Fuß)	100 m (350 Fuß)

immer für die gleichen Aufgaben eignet wie der weitaus leistungsstärkere VUX-1UAV: Reichweite und Genauigkeit sind deutlich geringer, und vor allem auf Grund der Scangeschwindigkeit ist, je nach verwendetem UAV-Typus als Trägerfluggerät und der jeweiligen Flugdynamik, mit weniger dichten Punktewolken als Ergebnis zu rechnen.

Der miniVUX-1 ist vorrangig für kleinere UAVs konzipiert und/oder für die Kombination mit anderen Geräten in einem Multisensor-Aufbau. Er eignet sich auch besonders für Vermessungen auf Schnee und Eis.

2.4 BDF-1

Durch die Vorstellung neuer, besonders hochauflösender Laser Scanner hat die Vermessung von Gewässertopographien und deren Umfeld aus der Luft mittels Laser Scanning in den letzten Jahren neue Impulse erfahren. Nicht immer wird eine flächige Erfassung benötigt, in vielen Fällen ist die Aufnahme von Profilen ausreichend. Die Vermessung von solchen Gewässerprofilen vom UAV aus stellt eine weitere Anwendung mit hohem Marktpotenzial dar. Im Herbst 2015 hat RIEGL speziell für den Einsatz auf UAVs den Laser-Entfernungsmesser BDF-1 für die Gewässervermessung präsentiert.

Der BDF-1 (siehe Tab. 2) ermöglicht bei einer Messrate von 40 Hz Messungen bis zu Wassertiefen, die etwa der eineinhalbischen Sichttiefe im Gewäs-

Tab. 2: RIEGL BDF-1 Leistungsdaten

BDF-1		
Abbildung		
Laserklasse	Laserklasse 2M	
Wellenlänge	532 nm (grün)	
Min. Abstand zum Ziel	1 m	
Max. Abstand zum Ziel	50 m	
Typ. Einsatzflughöhe	20–30 m	
Genauigkeit	10 mm	
Wiederholgenauigkeit	5 mm	
Messrate	4 kHz	
Erreichbare Eindringtiefe (Secchi) vs. Messrate	1.0 @ 4.000 Messungen/Sek.	1.5 @ 40 Messungen/Sek.

ser entsprechen. Dies resultiert bei typischen Fluggeschwindigkeiten in einem Messabstand von etwa 10 cm. Das Gerät ist mit Laserklasse 2M ungefährlich für das ungeschützte Auge. Das BDF-Gesamtsystem beinhaltet neben dem Laserprofilmessgerät auch eine RGB-Kamera und ein integriertes INS-System zur Verortung der Messpunkte. Optional kann ein miniVUX-1UAV Laser Scanner zusätzlich integriert werden.

3 ULS-Komplettlösung RiCOPTER

Die UAV Laser Scanner *RIEGL VUX-1UAV* und *miniVUX-1UAV* eignen sich aufgrund ihres Designs für die Integration in die drei vorrangigen Bauformen unbemannter Luftfahrzeuge: flächenbasierte, multirotor- und singlerotor-basierte Systeme.



Abb. 1:
RiCOPTER mit
Sensor Nutzlast
VUX-SYS inklusive
Doppel-Kamera-
system im Flug

Für die folgenden Fallbeispiele wurden Vermessungsaufgaben mit dem *RIEGL RiCOPTER* (Abb. 1) durchgeführt, einem High-Performance X8 Oktokopter. Bei einem Gesamtgewicht MTOM (Maximum Take Off Mass) von knapp unter 25 kg – je nach Konfiguration der Sensornutzlast – wird eine maximale Flugdauer von 30 Minuten erreicht. Alle sicherheitsrelevanten RiCOPTER-Komponenten (Flugsteuerung, Batterien, Rotoren) sind redundant ausgelegt, um selbst bei Ausfall einzelner Komponenten zuverlässige Steuerbarkeit und Flugfähigkeit des Gesamtsystems zu ermöglichen.

3.1 BDF-1 Intergration am BathyCopter

Zur Gewässervermessung mit dem BDF-1 wurde der RiCOPTER dem Umfeld entsprechend mit Schwimmern als integrierter „BathyCopter“ ausgestattet (sie-

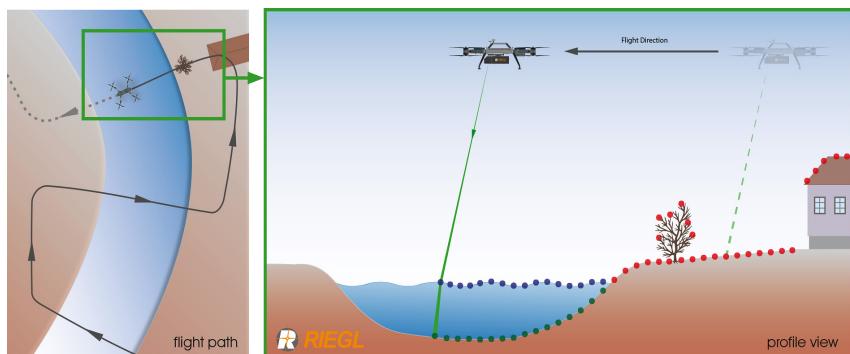


Abb. 2: Links: Typischer Flugpfad des BathyCopters bei der Vermessung eines Flusses oder Kanals. Rechts: Funktionsprinzip des BathyCopters, Darstellung beim Überflug sowie die resultierenden Messpunkte. Messungen an Land sind in ROT dargestellt, Messungen von der Wasseroberfläche in BLAU, Messungen vom Gewässergrund in GRÜN.

he Abb. 2). Diese Ausstattung dient der Sicherheit im Falle einer kritischen Situation über Wasser, und erlaubt auch Wasserung, Wasserstart und Navigieren auf der Wasseroberfläche, z. B. zum Erreichen eines Abflugpunktes am Wasser, wenn das Ufer dafür ungeeignet ist. Typische Anwendungen sind Vermessungen von Flüssen und Kanälen, wiederholte Vermessung von Wasserreservoirs sowie Vermessungen für die Landschaftsplanung oder Flussverbauungen.

4 ULS-Einsatzbereiche

ULS-Daten sind extrem hochauflösend und weisen eine außerordentlich hohe Abdeckung vertikaler Strukturen auf, als Resultat der geringen Geschwindigkeit über Grund, der niedrigen Flughöhe und der flexiblen Fluglage, die unterschiedliche – und für bemannte Luftfahrzeuge unerreichbare – Perspektiven erlaubt.

Die hohe Punktiedichte und damit Detailgenauigkeit einer ULS-Vermessungskampagne ist für einige Anwendungsbereiche ein besonders attraktiver Vorteil gegenüber herkömmlichen Vermessungsmethoden. Im Folgenden beschreiben wir exemplarisch einige dieser Einsatzszenarien.

4.1 Vegetationsvermessung

Durch die bereits beschriebene hervorragende Durchdringungskapazität eignet sich Laser Scanning ideal für Aufgaben bei denen es um die Aufnahme von unter Bewuchs stehendem Gelände geht. Dies einerseits, um die darunterliegende Geländetopographie verlässlich zu erfassen, das heißt die Vegetation einfach

heraus zu filtern, oder aber um die Vermessung des Bewuchses selbst. Dabei geht es um langfristige Dokumentation von Veränderungen an Habitat oder aber, im Bereich der Präzisionslandwirtschaft, um Ertragssteigerung der Produktion.

Die Bepflanzung wird hierzu in unterschiedlichen Wuchsperioden regelmäßig überflogen. Die Daten erlauben die Analyse und Prognose des Pflanzenwachstums und die Feststellung von Bereichen, in denen Unregelmäßigkeiten auftreten. Dadurch können zeitgerecht Maßnahmen gesetzt oder Ertragseinschätzungen korrigiert werden.

ULS leistet insbesondere wertvolle Dienste für Anwendungen in der Forstwirtschaft: Die Bereitstellung digitaler Geländemodelle, die Verortung von Totholz und die Feststellung und Dokumentation von Veränderungen im Unterholz sowie der Baumkronen machen LiDAR Daten zu einer sehr wertvollen Informationsquelle für Forstanwendungen.

Schwer erreichbare Zonen, wie zum Beispiel enge Täler, in denen bemannte Luftfahrzeuge gar nicht oder nur unter sehr hohem Risiko zum Einsatz gebracht werden können, lassen sich durch UAV-Befliegungen in einer bisher ungekann-

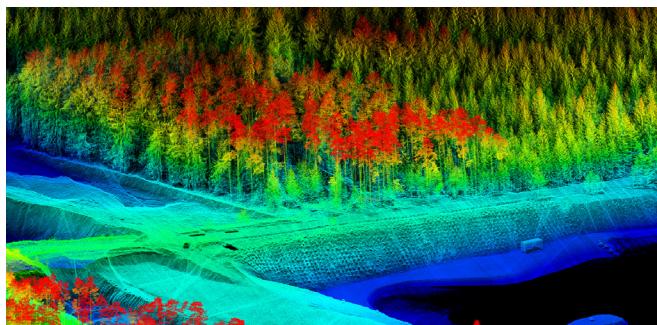


Abb. 3:
VUX-1UAV-
Daten für die
Forstwirtschaft

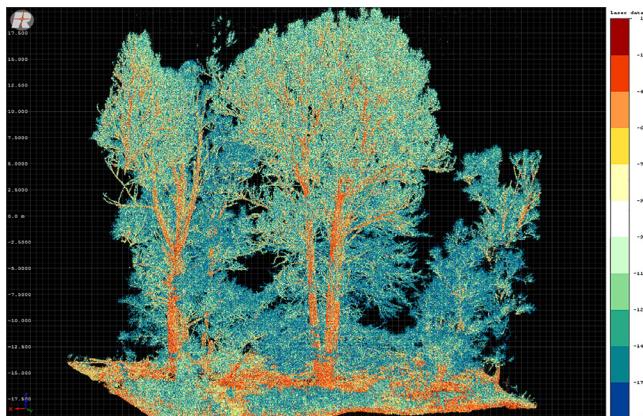


Abb. 4:
Hohe Daten-
genauigkeit
bis ins kleinste
Detail

ten Detailgenauigkeit vermessen und erlauben die Ableitung von Wuchsgeometrien und Geostrukturen, die aus konventioneller ALS-Befliegung nicht möglich ist. Abb. 3 und Abb. 4 veranschaulichen die in hochauflösenden ULS-Daten enthaltenen Informationsebenen.

4.2 Topographie in Tagebau-Anlagen

Laser Scanning – sowohl terrestrisch vom Stativ aus als auch luftgestützt – wird in Tagebau-Anlagen seit Jahren als zuverlässige Vermessungsmethode der kontinuierlich veränderten Topographie für regelmäßige Vergleichsmessungen und zur Erstellung von Minenplanungsmodellen eingesetzt. Die gewonnenen Daten dienen als Basis von Volumina-Kalkulation und für die Analyse von Sedimenten und Halden. Durch den Einsatz von UAVs kann das komplexe Gelände einer Tagbauanlage besser – und im Vergleich zu TLS effizienter – erfasst werden.

Spezielle Software-Lösungen für Bergbau-Applikationen bieten automatische Oberflächen- und Bruchlinien-Extraktion aus den Scandaten, also eine sehr einfache Bereitstellung der in diesem Bereich üblicherweise geforderten Standardresultate.

4.3 Hochspannungsleitungs- und Infrastruktur-Monitoring

Um sehr hohen Sicherheitsstandards gerecht zu werden, müssen Hochspannungsleitungen regelmäßig überprüft werden. Im Rahmen von Monitoring-Flügen werden der Freiraum zu umliegenden Hindernissen, wie einwachsender Vegetation, und allfällige Mängel an den Anlagen festgestellt bzw. aus dem Durchhang der Leitung die geförderte Strommenge abgeleitet (Abb. 5).

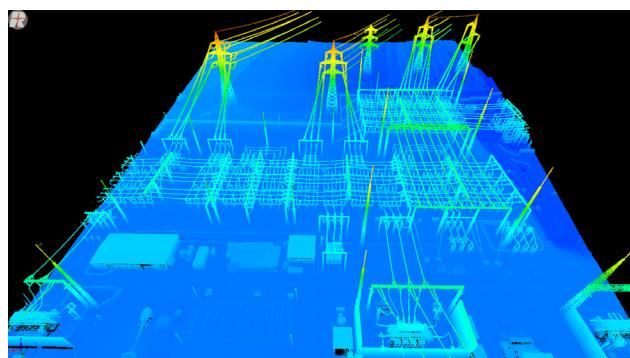


Abb. 5: Umspannwerk und Hochspannungsleitungen vermessen mit dem RiCOPTER und VUX-1UAV. Die Punktedichte aus einer Messflugstrecke (Flughöhe 60 m AGL, Fluggeschwindigkeit 6–7 m/s) beträgt rund 200 Punkte pro m^2 , durch Kombination mehrerer Flugpfade werden Punktdichten von bis zu 1.000 Punkten pro m^2 erreicht.

5 Entwicklungstendenzen und Anforderungen für Multi Purpose und Multisensor UAVs im Vermessungsbereich

Die Entwicklung von UAV-basierten Lösungen für den professionellen Vermessungsbereich zeigt zurzeit deutlich zwei grundlegende Tendenzen: Einerseits eine immer weiter gehende Miniaturisierung von Luftfahrzeugen und damit auch der integrierten Vermessungsgeräte. Die zweite Entwicklungstendenz betrifft komplementär eingesetzte Technologien auf kompakten Multisensorplattformen.

Die vorgestellten Geräte und Systeme tragen den aus diesen Entwicklungsinteressen entstehenden Anforderungen Rechnung hinsichtlich der erforderlichen technischen Leistung und unter Berücksichtigung betrieblicher Sicherheit und luftfahrtsspezifischer Vorgaben.

Im Bereich der Multisensorplattformen sei noch einmal auf die LiDAR-spezifischen Vorteile gegenüber z. B. bildgebenden Technologien hingewiesen, und damit auf das Potenzial kombinierter Datensätze aus Laser Scanning und Luftbildaufnahme in Kombination mit Hyperspektral- und Wärmebildkameras.

Die unterschiedlichen Sensoren werden entweder als System gleichzeitig betrieben oder es kann ein UAV mit Wechselsensorkomponenten als „Multi-purpose UAV“ je nach spezifischer Aufgabenstellung zum Einsatz kommen.

6 Zusammenfassung

UAV-basiertes Laser Scanning (ULS) eröffnet durch die operative Verbindung der Vorteile von Laser Scanning und der neuen Generation an UAVs flexible und zugleich kostengünstige Einsatzmöglichkeiten und die Erstellung flächen-deckender und hochgenauer Datensätze. ULS zeigt großes Potenzial bei der Erschließung von Lücken in bestehenden Datensets, wie zum Beispiel die Ergänzung von Dachflächen im Architekturbereich oder uneinsichtiger Bereiche in großflächigen Vermessungsprojekten. In den heute bekannten Anwendungsfeldern des Laser Scanning wird ULS zukünftig sowohl ergänzend als auch in manchen Fällen als Ersatz für bestehende, teurere oder risikoreichere Verfahren eingesetzt werden. Daneben entstehen aber auch neue Aufgaben in bisher nicht etablierten Anwendungsbereichen.

Literatur

- Amon, P.; Riegl, U.; Rieger, P.; Pfennigbauer, M.: Introducing a New Class of Survey-Grade Laser Scanning by use of Unmanned Aerial Systems (UAS). FIG Congress 2014, Kuala Lumpur, June 2014.

- Amon, P.; Riegl, U.; Rieger, P.; Pfennigbauer, M.: UAV-Based laser scanning for monitoring applications and challenging, complex surveying tasks. Geosiberia 2015, Siberia, April 2015.
- Datasheet: RiCOPTER. www.riegl.com/products/unmanned-scanning/ricopter.
- Datasheet: RIEGL BDF-1. www.riegl.com/products/unmanned-scanning/newbathy_copter.
- Datasheet: RIEGL miniVUX-1UAV. www.riegl.com/product/unmanned-scanning/riegl-minivux-1uav.
- Datasheet: RIEGL VUX-1UAV. www.riegl.com/products/unmanned-scanning/riegl-vux-1uav.
- Datasheet: RIEGL VUX-SYS. www.riegl.com/products/unmanned-scanning/ricopter-with-vux-sys.
- Gaisecker, T.: RIEGL VUX-SYS on RiCOPTER – Fully integrated UAV-based Airborne Laser Scanning System. SEASC 2015, Singapur, Juli 2015.
- Gaisecker, T.; Pfennigbauer, M.; Rieger, P.; Riegl, U.; Amon, P.: UAS-Laserscanning im praktischen Einsatz: Systemintegration – Datenaufnahme – Datenanalyse. Oldenburger 3D-Tage 2015, Oldenburg, February 2015.
- Haala, N.; Rothermel, M.: Dense Multi-Stereo Matching for High Quality Digital Elevation Models. PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. Jahrgang 2012, Heft 4 (2012), p. 331–343, 2012.
- Hirschmüller, H.: Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 30, pp. 328–341, 2008.
- Riegl, U.; Rieger, P.; Pfennigbauer, M.; Amon, P.: UAS based laser scanning for forest inventory and precision farming. Int. Workshop “REMOTE SENSING and GIS for Monitoring of Habitat Quality”, TU Wien, September 2014.
- Ritter, M.; Benger, W.: Reconstructing power cables from lidar data using eigenvector streamlines of the point distribution tensor field. Journal of WSCG 20, 223–230, 2012.
- Ullrich, A.: Radiometric calibration of multi-wavelength airborne LIDAR data. The International LiDAR Mapping Forum 2015, Denver, Colorado, USA, February 2015.

Kontakt

Thomas Gaisecker | Ursula Riegl | Philipp Amon | Martin Pfennigbauer
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
Riedenburgstraße 48, 3580 Horn
tgaisecker@riegl.com

UAV Guidance with Robotic Total Station for Architectural Fabrication Processes

Artyom Maxim | Otto Lerke | Marshall Prado | Moritz Dörstelmann |
Achim Menges | Volker Schwieger

1 Introduction

There is a dramatic change in the conception of architectural production. Developing technologies allow for a higher degree of structural and material efficiency in building construction. Through the integration of novel fabrication techniques, more emphasis is placed on differentiated material arrangements and tailored structural performance. Lightweight, high performance materials for architectural fabrication empower this change of production and allow for an increase of functional integration and design possibilities.

Advances in computational design and robotic fabrication techniques have enabled more automation in the building process, which has recently increased in importance on construction sites (Meyer 2003). The developments in automation yield benefits regarding the reduction of expenses and the increase of efficiency (Heikkilä and Jaakkola 2003, Gläser et al. 2008). Robotic fabrication provides more control and adaptability during construction, which has led to the development of novel production processes.

Lightweight, high performance architectural systems are no longer constrained by traditional construction processes, which rely on assemblages of parts. These systems can be made onsite at full scale with continuous material application, eliminating the need for joints that can weaken the otherwise efficient structural system. This requires an equally advanced building system capable of such possibilities as integrated material constraints, fabrication limitations and structural performance. This paper will discuss some of the developments required for an aerial fabrication system of a lightweight fiber composite structure. The focus of the paper is the guidance and control of a UAV for fiber winding, utilizing a robotic total station. This enables the fabrication of long span fibrous structures in an onsite construction environment.

Previous research at the University of Stuttgart's Institute for Computational Design (ICD) and Institute for Building Structures and Structural Design (ITKE) has focused on developing novel fabrication techniques for fiber composite building construction. In the ICD/ITKE Research Pavilion 2012 a coreless winding technique was developed for an onsite fabrication setup (Reichert et al. 2014). An external turntable was used in cooperation with the six axis industrial

robot to expand the working space of the robotic arm. Through this on-site set-up, a large scale, continuous fiber composite shell was fabricated. The ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15 maximized the reach of the robot by fabricating a composite shell, *in situ*, from the inside under low tension (Schieber et al. 2015). In both examples the highly performative material system was built up incrementally by laying continuous lightweight fiber rovings. The interaction of the fibers and the self-forming nature of the composite surface allows for high tolerances in production processes. The high strength and precision of the robotic arms were useful where the tension of the fiber and accuracy of winding needs to be controlled but their limited range of motion and scale constrained the material system to relatively small scale architectural demonstrators.

Aerial vehicles provide one possible solution to the limitations of industrial robotics in architectural production of fiber composite structures. They are untethered and have a less constrained range of motion. Aerial vehicles have already been used in the construction industry for filming and surveying tasks (Burger et al. 2016, Rose 2016), but have had limited use in construction processes for material and environmental interface. There is a growing effort to change this through developing architectural research. Several projective projects at the ETH Zurich (Mirjan et al. 2013), University of Pennsylvania (Mahony et al. 2012) and the Architectural Association in London have utilized aerial vehicles in novel construction systems. They have shown that aerial vehicles can pick, place and pull objects having a limited payload within a controlled production environment. Materials such as rope have been used to fabricate tensile structures, showcasing the potential use of aerial vehicles for fiber composite construction. These examples demonstrate the inherent flexibility and agility of micro aerial vehicles in interacting with environment and set course towards the new, exciting applications in architectural design and construction. Although these examples made quite remarkable developments in UAV navigation within a controlled fabrication environment and showed the interaction with objects and materials, it is still to be demonstrated how these processes can transition from the controlled lab-like environment to a geometrically complex, onsite or *in situ* construction environment.

In order to transition from the controlled lab environment to the onsite fabrication setup, different localization strategies may be required. The positioning systems employed for the afore mentioned for the control of the aerial vehicles can be unsuitable for onsite construction environments. Motion capture setups, enhanced GPS tracking (RTK-GNSS) and onboard SLAM algorithms, commonly used setups for localization of aerial vehicles, are useful in some construction environments but may encounter problems with signal shadowing, reflectance, magnetic interference, light pollution or feature recognition when applied to onsite construction.

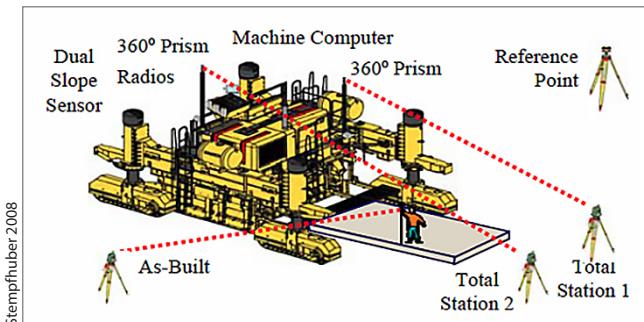


Fig. 1:
3D Control, Example of a Mainline Paver

This paper provides an alternative method for aerial vehicle localization and control utilizing standard construction equipment suitable for onsite fabrication. Robotic total stations are portable, robust machines capable of accurate position estimation in various indoor and outdoor conditions over large distances. They

are useful for site surveying, digital scanning and motion tracking. Heavy machinery such as graders and pavers have used robotic total stations for the localization and control on construction sites (Fig. 1 and Fig. 2).

Robotic total stations have been used for tracking of aerial vehicles (Fitz 2013), though guidance of UAVs by tachymetry is not common. Nevertheless



Fig. 2: Road Constructions (Certus Verlag AG, Contribution by Terradata AG, last access on 13.09.2016)

tachymetric guidance of UAVs may become more prominent if demands on accuracy rise and operational scenarios become complex, as with onsite construction of fiber composite structures. Furthermore this positioning method is reliable for operation even in challenging environmental, weather and lighting conditions, where other methods might not be suitable. The given architectural fabrication task requires an optimal performance during flight operations in flexible environments. Regarding the technical implementation of tachymeter guidance, the existing machine guidance methods used for construction equipment can be transferred to UAV applications with slight modifications, which will be shown in the following chapters.

2 UAV – Guidance System

2.1 Description of the UAV

A custom aerial vehicle was built using both off the shelf electronic and propulsion components and custom made frame parts. The brushless motors, motor controllers, battery and propellers, used for the propulsion system, are standard

for self-built quadrotors. The carbon fibre plates and aluminium profiles were used for the frame (Fig. 3). Electronic setup includes an autopilot board, onboard computer, several radio and power modules, USB-serial converters.

The autonomous vehicle operates using two main hardware components – the autopilot and the onboard computer. A “Pixhawk” autopilot platform, with “PX4” firmware (Fig. 4), was chosen as the core of the system, as

Fig. 3: UAV

it has a growing developer community, a substantial online documentation and has a completely open source hardware and software system. The Pixhawk is an embedded computer system with integrated MEMS based inertial, magnetic and barometric sensors and hardware interfaces for controlling an autonomous aerial vehicle. The PX4 is “a node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms” (Meier et al. 2015). Pixhawk is used in conjunction with the onboard computer “Odroid XU4”, which is an ARM single board computer that is running Ubuntu, with Robot Operating System (ROS). ROS is framework for programming and controlling robots, machines and systems of any kind (ROS 2016). It provides all necessary tools for creating complex and reliable computerized systems. In this project, ROS is used as a high level control mechanism for the vehicle. It is able to run navigation algorithms, control packages with advanced logic and external interfaces and serves as a bridge to the autopilot.

The power system includes a 5Ah battery, two power modules, a 5V 5A power supply for onboard computing and a Pixhawk power module, which not only provides power to the autopilot, but also data about the current voltage and current state of the battery. An onboard WiFi adapter is also included for ground computer connection, accessing the terminal of the onboard computer, uploading code and flight programs and observing autopilot state. Additionally two

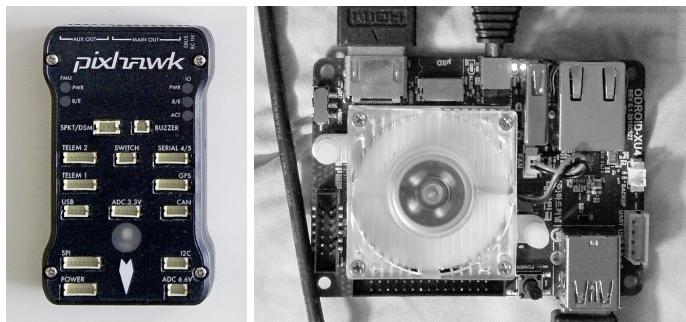


Fig. 4:
Pixhawk
Autopilot
(left), Odroid
XU4 (right)

radio modules – FrSky radio receiver for manual remote control and Laird RM024 2.4 Ghz with $\frac{1}{2}$ wave 2dBi antenna are installed. A pair of RM024 radio modules were used to robustly transfer localization data from the ground computer, connected to the total station, to the onboard system of the aerial vehicle. The flight range is only limited by the radio receivers. The operating distance is around 1 km. The flight time on one battery charge is 10 to 15 minutes. The payload is 500 grams.

2.2 Guidance with Robot Total Station

In this work a Leica MS60 robotic total station has been used as a positioning sensor. MS60 is a state of the art robotic total station. It provides position accuracies of 3 to 5 mm in kinematic mode (Leica 2016) and thus complies with high accuracy demands. The MS60 can be defined as a multi-sensor system. Besides including several sensors to measure temperature, pressure, humidity, the total station also includes relevant sensors for position determination, horizontal and vertical angle measurement, as well as electronic distance measurement, the EDM. The most important features for this investigation is the Automatic Target Recognition (ATR) sensor which allows to recognize and track the target. For each measurement the station provides X, Y, Z-coordinates. In this investigation the total station has been used in combination with a 360° prism Leica GRZ101 (Fig. 5).

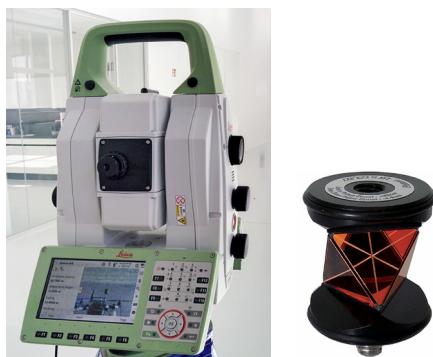


Fig. 5: Multi Station Leica MS60 (left), Leica 360° prism GRZ 101 (right)

The instrument provides several useful tools for kinematic tracking

including: Dynamic Lock and Power Search functions (Leica 2016), good target holding quality, high tracking rate of 20 Hz, low rate of data gaps, tolerance to target occlusion and an enhanced target prediction phase. The limitations are the tracking distance, the general problem of retention of the line of sight, valid for all tachymeter applications and unfavourable atmospheric conditions.

2.2.1 Transferring Estimated Positions to the PX4 Autopilot

The guidance methods are implemented using the robot operating system (ROS) platform programming framework. The system consists of several ROS nodes, running on both, ground and onboard computers and connected by a radio link. The “Tracking” node communicates with the tachymeter using a serial connection to receive the X, Y, Z-coordinates of the measured prism position, mounted on the vehicle. The implementation of this node is based on an existing open source Python library for communicating with Leica total station instruments using the “GeoCom”, an ASCII based request-response protocol, which makes it compatible with many computer platforms, e.g. microcontroller, smartphone or a PC. After receiving coordinates from the “Tracking” node, a “Sender” node, passes the data via serial connection to the RM024 radio module, configured as a “Server” to transmit position information to the onboard computer of the UAV. The data gets received by the “Client” RM024 module, read by the ROS “Receiver” node and shared for other onboard ROS system nodes, for use. The coordinates can then be accessed by a main ROS “Control” node, which handles safety checks for data consistency and controls the execution of custom flight instructions. The “Control” node passes measured real-time position and commands to the “Mavros” node – a ROS package, which provides simple means of communication and control of the aerial vehicle. Using Mavros, the “Control” node can obtain and utilize any data from the autopilot, including its current attitude, state, mode, battery charge level and multiple others. Mavros then passes commands to PX4 autopilot over a serial connection, which in turn controls the flight behaviour of the vehicle. Additionally, the “Rosbridge” node on the ground computer passes measured coordinates to a visual scripting interface, integrated with a common architectural CAD software, which is able to interactively display, store and evaluate trajectories of the flight path (Maxim 2016). The main function of this software within this project is the real-time monitoring of flight operations on the ground computer.

2.2.2 Integration of Position Data into Autopilot

PX4 Autopilot is able to use externally measured position data for localization, in relation to its initial origin, which resets to zero at startup. In the developed set-

up, a local position estimator (LPE) software module of autopilot is used, which is responsible for processing the position data from internal or external sensors. LPE is based on an extended Kalman filter algorithm, often used for nonlinear discrete systems. The Kalman filter is a set of mathematical equations that provides an efficient computational (recursive) means to estimate the state of a process, in a way that minimizes the mean of the squared error. The filter is powerful in several aspects: it supports estimations of past, present, and even future states by prediction, and it can do so even when the precise nature of the modeled system is unknown (Welch and Bishop 2004). LPE is capable of fusing multiple position sources, such as GPS, Motion Capture or Computer Vision, potentially improving the precision of the resulting estimate, however, in the presented set-up, only the robotic MS60 Multi Station has been used, as it alone provides position estimates for moving targets with millimeter precision. From LPE estimator, the position data gets passed on to another software module of PX4 autopilot, the “Position Controller”. It is based on a proportional-integral-derivative (PID) controller method and is responsible for calculating the amount and direction of force that the vehicle needs to produce in order to reach the destination target setpoint. The position controller has multiple, separate closed-loop systems, controlled by PID controllers, for different aspects of the motion of the vehicle, e.g. vertical and horizontal movements as well as velocities. These controllers need to be tuned properly, for achieving acceptable motion accuracy of the vehicle. If the controllers are untuned, the vehicle tends to oscillate around a target setpoint, never actually reaching it. In worst cases, the amplitude of oscillations will increase and the vehicle becomes completely unstable. In this project, the PID controllers were tuned using an heuristic approach, which has proven to be sufficient for eliminating oscillations. Detailed description on the PID controller theory and tuning can be found in Mann et al. (2005) or Busch (2012). The output from the position controller is passed to the “Attitude Controller”, a software module, which gets the attitude information (roll, pitch yaw) from an onboard IMU and is as well based on a PID controlled closed-loop system. The attitude information is then passed to the “motor mixer” and the “motor driver” software modules, which control the speed of the rotors.

2.2.3 Local Reference Frame Orientation

An important point is achieving correct reference frame orientation of the total station. This coordinate frame can be established by the “free stationing” technique. The autopilot utilizes an internal compass sensor, for determining its orientation heading in space. The autopilot navigation frame is North-East-Down (NED), which means its X, Y axes are pointing along the magnetic North, East directions respectively and the Z axis points perpendicular to the other axes,

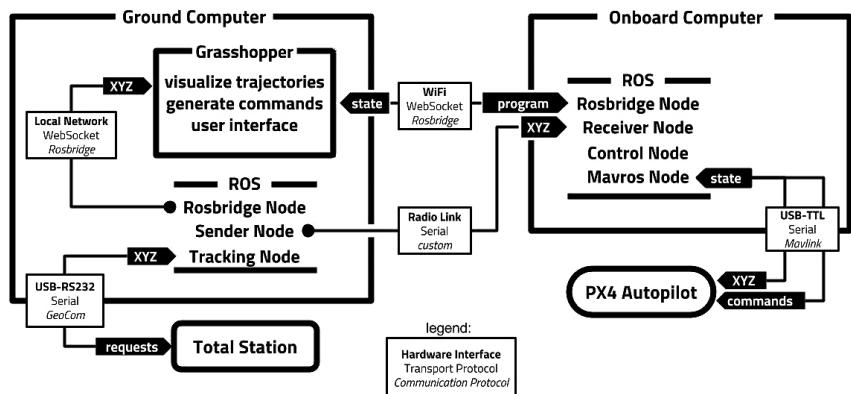


Fig. 6: Guidance System Architecture

downwards. By convention, ROS operates in another coordinate frame, the ENU (East-North-Up). Therefore the coordinates form the instrument should be converted to ENU format. The Mavros node (Fig. 6) is responsible for converting ENU coordinates to the NED convention and passing them to the PX4 Autopilot. The information about the vehicle's orientation heading is provided by an onboard magnetometer and is the main source of the heading information. This sensor, which measures the magnetic field of the earth to define the orientation of the platform, is easily affected by various magnetic disturbances, caused by onboard power cables, motors and even by large metallic objects in the surrounding environment. In this case, the onboard compass heading could be sufficiently distorted during the flight operation and become unreliable or imprecise. The resulting effect is a misorientation during the flights causing deviations from the desired trajectory. In this context the problem of an insufficient heading determination of the UAV might be present in some cases, but wasn't addressed in this investigation, as the performed flights have shown that slight misalignment of the frames by few degrees is not critical for the given application. During the performed experimental flights only small deviations from the expected trajectory during the vehicle's movement could be detected. The solution for this circumstance would be an additional orientation estimation source, e.g. a computer vision system, use of the reference trajectory or the use of the effective trajectory sections according to Beetz (2012).

2.2.4 Design and Execution of Custom Flight Trajectories

The direct control of vehicle behaviour and functionality is achieved using a custom "Control" node as described previously (Fig. 6). This node is a functional

“core” of the system, allowing for the execution of flight programs in an automated mode, stored onboard. It serves as a communication hub as well, feeding commands and position measurements to the autopilot and reading vehicle status and passing the information on to the user. The flight trajectories are processed by the visual scripting interface, to generate a custom-formatted code, consisting of an index, position and orientation information for every point along the flight path. The flight code generation is tightly connected to the design workflow, where the flight paths can either be drawn manually in a CAD software, or produced automatically from the computationally defined filament winding order. This flight program is then sent and stored in the onboard “Control” node and is later executed line-by-line during the flight. At startup there is a discrepancy between the internal local position, defined as zero by autopilot firmware, and its real-world position, defined by the measurement in the coordinate frame of the total station. Therefore, one of the “Control” node tasks is to offset both, measured position and trajectory targets, by the initial startup world position offset, which allows to coordinate everything to the same superordinate reference frame. The offset must be considered for a 3 dimensional case. The target setpoints, the measured prism position, as well as the architectural fabrication model inside CAD software can now be represented in the ENU world frame, making the system easy to use by avoiding unnecessary frame rotations.

3 Test Results

The guidance system was tested in context of a full-scale filament winding experiment. It is based on a freestanding configuration of four winding frames, with one 4 m high in the center and three 1.5 m high, equally spaced around, to form a triangle with a side of 7 m ([Fig. 7](#)). After arranging the frames, the MS60 Total Station was used to scan the environment to find both, the surrounding boundaries of the fabrication space and the precise position of the frames themselves. This allowed the construction of the flight trajectories around measured objects in the CAD software. The resulting flight path is then converted into custom-formatted instructions for the vehicle and uploaded to the onboard system. After the total station guidance has been set up and the vehicle was receiving its measured position, the user activated the automatic flight mode for the quadrotor to start executing the program.

[Fig. 8](#) exemplarily depicts the effective flight path and the reference flight path between the waypoints.

In order to evaluate the control quality for the tachymetric guided UAV, the 3D distances between reference and effective flight path have been analysed. This approach was inspired by 2D evaluation approaches, e.g. represented in Lerke

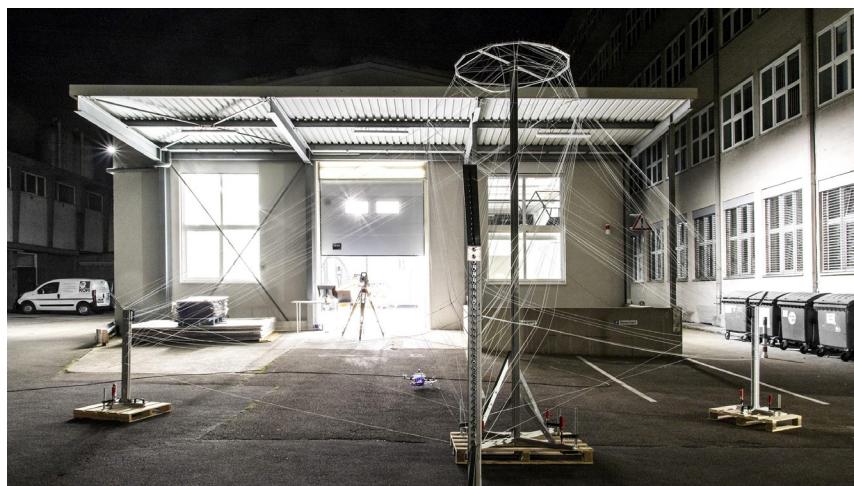


Fig. 7: Experiment Site and Construction Object

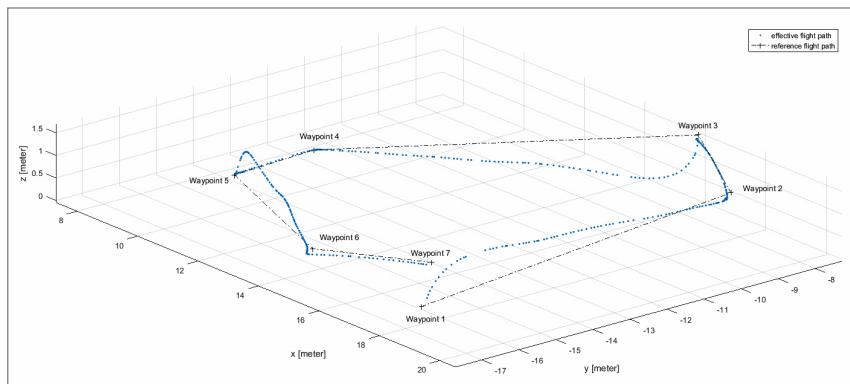


Fig. 8: 3-D Flight Path (shown exemplarily for one round)

und Schwieger (2015) or Beetz (2012), but has been adapted for a 3D scenario. The adapted method analyses the shortest distance between the measured positions at timestamp i and the reference flight path. To determine this distance a cross-product approach has been used to calculate the plumb line through the measured position perpendicular to the reference flight path. Subsequently the length of the plumb line has been calculated and analysed. Details on cross-product theory can be found at e.g. Merziger and Wirth (2010).

In order to examine the control quality, minimum and maximum distances, as well as the mean value and the root mean square (RMS) have been calculated. The formula for the RMS is given below:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (1)$$

$$d_i = \sqrt{(X_i^{REF} - X_i^{EFFECTIVE})^2 + (Y_i^{REF} - Y_i^{EFFECTIVE})^2 + (Z_i^{REF} - Z_i^{EFFECTIVE})^2} \quad (2)$$

d_i – length of the plumb line i , n number of measurements,

X_i^{REF} , Y_i^{REF} , Z_i^{REF} – coordinate triple for point i of the reference trajectory,

$X_i^{EFFECTIVE}$, $Y_i^{EFFECTIVE}$, $Z_i^{EFFECTIVE}$ – coordinate triple for point i of the effective trajectory.

Tab. 1 shows the summarized results on the above described evaluation method.

The histogram in **Fig. 9** shows the distance sample distribution for the complete recorded flight path. The y-axis represents the amount of samples, the x-axis represents the calculated distances. The histogram reveals that over 40 % of the sampled distances are below 100 mm. Around 25 % of the samples are between 100 mm and 200 mm and the remaining 35 % are between 200 mm and 1,000 mm. The results show a wide value range and therefore a wide range of the resulted control quality.

Tab. 1: 3D Flight Path Evaluation

Section of the Flight Path	Min. Distance [mm]	Max. Distance [mm]	Average [mm]	RMS [mm]
1	4	967	273	371
2	6	919	195	284
3	3	906	262	352
Complete (1 + 2 + 3)	3	967	235	329

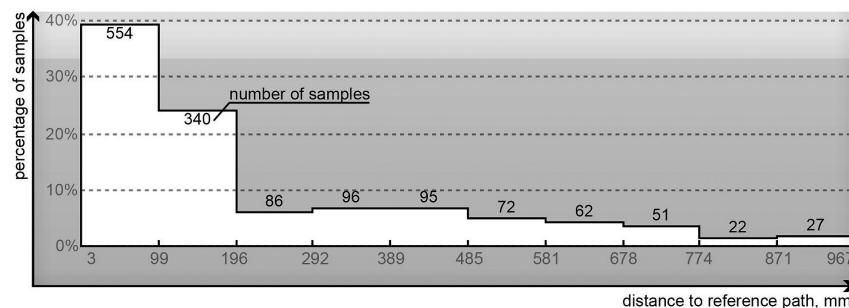
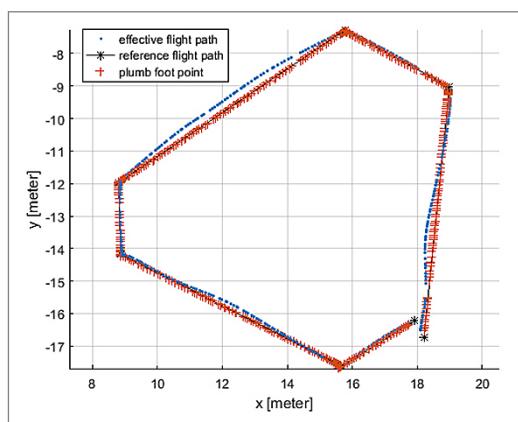


Fig. 9: Distribution of 3D distances to reference trajectory for complete flight path; number on bars equal to number of samples

To take a closer look on the situation, the flight movement has been separated into a horizontal and a vertical component. Firstly, an evaluation of the horizontally projected trajectory has been conducted. Fig. 10 depicts a flight path section with the reference flight path, the effective flight path and the plumb foot points, projected on the x-y plane.

The numerical values for the horizontal component of the movement are summarized in Tab. 2. The values show, that the lateral deviation of the effective flight path is in the range between 0 mm and 300 mm. Thus the guidance quality, referred to the x-y plane, is approximately three times better than for the 3D case. The histogram in Fig. 11 depicts the samples distribution

Fig. 10: 2-D Flight Path, projected to x-y plane



Tab. 2: 2D flight path evaluation (referenced to x-y plane)

Section of the Flight Path	Min. Distance [mm]	Max. Distance [mm]	Average [mm]	RMS [mm]
1	1	303	96	129
2	<1	296	80	99
3	<1	186	65	82
Complete (1 + 2 + 3)	<1	303	81	104

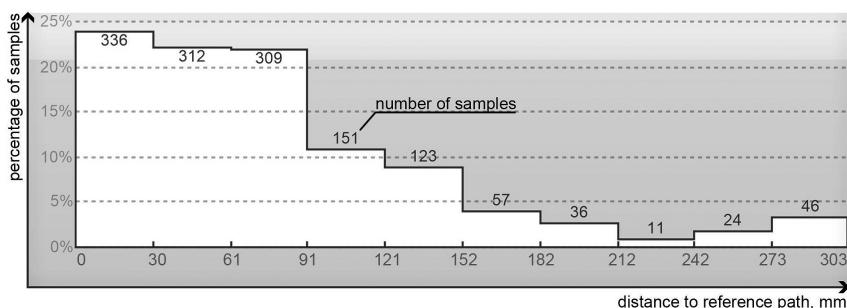


Fig. 11: Distribution of 2D distances to reference trajectory, projected to x-y plane; number on bars equal to number of samples

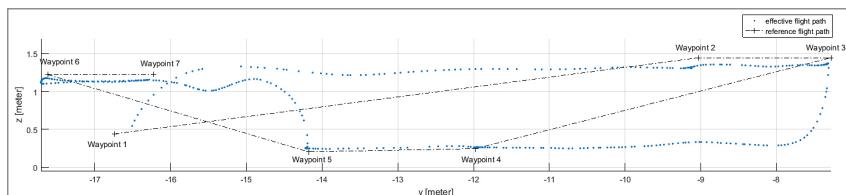


Fig. 12: 2-D Flight Path, projected to y-z plane

Tab. 3: 2D flight path evaluation (referenced to y-z plane)

Section of the Flight Path	Min. Distance [mm]	Max. Distance [mm]	Average [mm]	RMS [mm]
1	0	966	260	361
2	0	916	181	273
3	0	901	251	344
Complete (1 + 2 + 3)	0	966	222	319

of the plane based method. The histogram shows that approximately 70 % of the overall distances are below 90 mm.

For the completion of the analysis, the evaluation of the vertically projected trajectory has been performed. Fig. 12 shows the 2-D flight path, referenced to the y-z plane. It is noticeable from Fig. 12, that the effective flight path exhibits large vertical deviations from the reference flight path. Tab. 3 summarizes the numerical values for the vertical component of the flight movement.

The analysis shows, that the vertical component of the flight movement has the greatest impact on the examined distances. Thus, the altitude control (along z-axis) has the worst performance. The histogram in Fig. 13 shows, that only 40 % of the calculated distances are smaller than 100 mm.

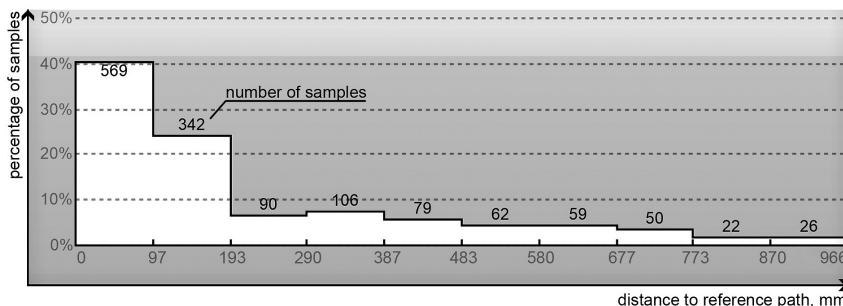


Fig. 13: Distribution of 2D distances to reference trajectory, projected to y-z plane; number on bars equal to number of samples

According to the datasheet of the tachymeter, the accuracy is 3 mm to 5 mm for positioning in kinematic mode and thus its influence on the resulted guidance accuracy is neglectable. The values from Tab. 1, Tab. 2 and Tab. 3 comprise frame misalignment, PID controller parameter settings, as well as flight dynamical aspects and further unknown influences. Especially the z-component, underlying the gravitational forces, has the largest share of the reduction of guidance quality.

4 Conclusion and Outlook

The guidance of UAVs by robotic total stations is possible and enables the exploration of novel large scale on site automated fabrication processes for architectural structures. The conducted experiments have shown, that tachymetric guided UAVs fulfill the quality requirements for fabrication of large scale on site construction on the example of a filament structure.

For the 3D control quality a RMS of 329 mm could be detected for the complete flight path. The horizontally projected evaluation of the control quality, referenced to the x-y plane, revealed a RMS of 104 mm and the vertically projected evaluation, referenced to the y-z plane, indicated a RMS of 319 mm. Although these results suggest a marginal control quality, they comply with the given requirements for core-less filament winding methods. This method allows for a relatively large tolerance range, as the accuracy of the fabricated piece is determined by the winding frame and is not a direct representation of the flight path.

The reciprocal constraints of payload, drone size, battery capacity and flight time define boundary conditions for the presented fabrication method. Future trajectories of development towards a specific fully functional fabrication method for large scale fiber composite parts could include stationary positioning of the fiber spool, thus the spool is not part of the payload. In this scenario the UAV is mainly utilized as a fiber guidance and positioning vehicle. This would allow for a more continuous fabrication process, as the reduced payload allows for longer flight time and a ground supported spool could be significantly larger, requiring less frequent spool changes. A second aspect relevant for scaling of this technology is the balance between slack and tension force in the fiber roving. While UAVs allow for low tension stringing of filament over large distances with a comparatively low level of precision, a robotic arm allows for high precision positioning of filament with a substantial amount of pre-tension within a limited operation space. Combination of industrial robots and UAVs render a very promising future opportunity, as it combines both the UAVs benefit of a large operation space with local robotic precision and strength to pre-tension fibers over long distance.

Beyond the specific application for large scale fabrication of filament structures, the general control and localization method using a robotic total station has wider fields of application in automated construction processes. For the emerging research field of mobile fabrication agents, a robust localization system can be an important key technology to enable coordination of fabrication robots often proposed to be utilized in large quantities with semi-autonomous group behaviour. Beyond positioning of fabrication machinery, total stations can fulfill multiple tasks, e.g. tracking of the fabrication process, thus allowing to inform the fabrication agents behaviour as an inline control mechanism, or final measuring and quality control.

Sensor integrated fabrication strategies, such as total station enabled aerial vehicle localization and control, set the base for adaptive modes of fabrication that allow for both, higher accuracy and control in known processes, and exploration of novel fabrication strategies.

Acknowledgements

Funded by Volkswagen Foundation.

References

- Augugliaro, F.; Lupashin, S.; Hamer, M.; Male, C.; Hehn, M.; Mueller, M. W.; Willmann, J. S.; Gramazio, F.; Kohler, M.; D'Andrea, R. (2014): The Flight Assembled Architecture installation: Cooperative construction with flying machines. In: IEEE Control Systems, vol. 34, no. 4, pp. 46–64, Aug. 2014.
- Beetz, A. (2012): Ein modulares Simulationskonzept zur Evaluierung von Positionssensoren sowie Filter- und Regelalgorithmen am Beispiel des automatisierten Straßenbaus. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Burger, S.; Elflein, A.; Völter, U. (2016): Photo-based-scanning als Erweiterung des ingenieurgeodätischen Leistungsspektrums. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg 2016, S. 175–189.
- Busch, P. (2012): Elementare Regelungstechnik. 8., überarbeitete Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg.
- Fitz, D. (2013): Bestimmung von Referenz-Positionen für die photogrammetrische Auswertung von UAV-Bildflügen mittels einer automatisierten Totalstation. Master Thesis, Institute of Engineering Geodesy, University of Stuttgart, Stuttgart (unpublished).
- Gläser, A.; Möhlenbrink, W.; Schwieger, V. (2008): A Contribution to Construction Machine Automation. Journal of Applied Geodesy 2 (2008). DOI: [10.1515/JAG.2008.011](https://doi.org/10.1515/JAG.2008.011).
- Heikkilä, R.; Jaakkola, M. (2003): Automatic Control of Road Construction Machinery – Feasibility and Requirements. 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Eindhoven, Netherlands.

- Leica, 2016: http://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/nova_ms60/brochures-datasheet/Leica%20Nova%20MS60%20DS_en.pdf.
- Lerke, O.; Schwieger, V. (2015): Evaluierung der Regelgüte für tachymetrisch gesteuerte Fahrzeuge. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2015, 140. Jahrgang. DOI: [10.12902/zfv-0080-2015](https://doi.org/10.12902/zfv-0080-2015).
- Mahony, R.; Kumar, V.; Corke, P. (2012): Multirotor Aerial Vehicles: Modelling, Estimation, and Control of Quadrotor. IEEE Robotics & Automation Magazine 19(3): 20–32.
- Mann, H.; Schiffelgen, H.; Frorer, P. (2005): Einführung in die Regelungstechnik. 10. Aufl., Carl Hanser Verlag, München Wien.
- Maxim, A. (2016): MAV Assisted Fabrication Strategy for Large Scale Fiber Composite Structures. Master Thesis, Institute for Computational Design, University of Stuttgart, Stuttgart (unpublished).
- Meier, L.; Honegger, D.; Pollefeyns, M. (2015): PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA, 2015, pp. 6235–6240. DOI: [10.1109/ICRA.2015.7140074](https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140074).
- Merziger, G.; Wirth, T. (2010): Repetitorium Höhere Mathematik. 6. Aufl., Binomi Verlag Barsinghausen, ISBN: 978-3-923923-34-2.
- Meyer, H.J. (2003): Anwendung von geodätischen Positionsmesssystemen in Straßenbau-maschinen. Baumaschinentechnik 2003 – Erfahrungen, Methoden, Innovationen – Fachtagung 20./21.03.2003 Dresden. Heft Nr. 23 der Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen.
- Mirjan, A.; Gramazio, F.; Kohler, M.; Augugliaro, F.; D'Andrea, R. (2013): Architectural fabrication of tensile structures with flying machines: BT – Green Design, Materials and Manufacturing Processes, 513–518.
- Reichert, S.; Schwinn, T.; La Magna, R.; Waimer, F.; Knippers, J.; Menges, A. (2014): Fibrous structures: an integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles. Computer-Aided Design, 52, pp. 27–39.
- ROS (2016): www.ros.org/about-ros, last access 21.11.2016.
- Rose, A. (2016): Einsatz von UAV bei Katastervermessungen – ein Update. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg 2016, S. 191–201.
- Schieber, G.; Koslowski, V.; Knippers, J.; Dörstelmann, M.; Prado, M.; Vasey, L.; Menges, A. (2015): Integrated Design and Fabrication Strategies for Fibrous Structures. In: Modelling Behaviour (pp. 237–245). Springer International Publishing.
- Stempfhuber, W. (2008): Navigation of Construction and Agriculture Machinery, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zurich, Switzerland, 2008.
- Vidal, E. (1991): New Formulation and Improvements of the Nearest-Neighbour Approximating and Eliminating Search Algorithm (AESA). Pattern Recognition Letters, Vol. 15, Issue 1, (1994).
- Welch, G.; Bishop, G. (2004): An Introduction to the Kalman Filter. Technical Report TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill.

Willmann, J.; Augugliaro, F.; Cadalbert, T.; D'Andrea, R.; Gramazio, F.; Kohler, M. (2012):
Aerial robotic construction towards a new field of architectural research. International
journal of architectural computing, 10(3), pp. 439–459.

Kontakt

Artyom Maxim | Marshall Prado | Moritz Dörstelmann | Achim Menges

Institute for Computational Design, University of Stuttgart

Keplerstrasse 11, 70174 Stuttgart

artyom.maxim@gmail.com

marshall.prado@icd.uni-stuttgart.de

moritz.doerstelmann@icd.uni-stuttgart.de

achim.menges@icd.uni-stuttgart.de

Otto Lerke | Volker Schwieger

Institute of Engineering Geodesy, University of Stuttgart

Geschwister-Scholl-Strasse 24D, 70174 Stuttgart

otto.lerke@ingeo.uni-stuttgart.de

volker.schwieger@ingeo.uni-stuttgart.de

Anwendung von Radarsensoren in UAV

Dieter Genschow

1 Motivation

Radarsensoren sind aus der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Während bis vor 15 Jahren das Wort Radar hauptsächlich für große und sehr teure Überwachungsanlagen im Militär- sowie Luft- und Raumfahrtbereich stand, sind heute ganz andere Dimensionen anzusetzen. Die Grundlagenentwicklung für Radarsysteme sind zwar schon Mitte des vergangenen Jahrhunderts begonnen worden, jedoch waren für die Implementierung aufgrund des hohen Signalverarbeitungsaufwandes und der erreichbaren Frequenzen bisher enorme Ressourcen nötig, um die Systeme zu realisieren. Mit der immer fortschreitenden Miniaturisierung und Steigerung der Leistungsfähigkeit integrierter Schaltungen ist es in den letzten Jahren möglich geworden,

Radarsensoren auch für Forschungszwecke und vor allem auch für Consumermärkte herzustellen ([Abb. 1](#)).

Ein weiterer Markt, der stark von dieser Miniaturisierung und Leistung profitiert, sind kleine, unbemannte Flugzeuge (UAV), welcher in den letzten Jahren zu den weltweit am stärksten wachsenden Märkten zählte.

Dadurch bieten sich heute für den Privatanwender, aber auch für professionelle Anwendungen bisher unvorstellbare Möglichkeiten. Es ist sinnvoll und an der Zeit diese beiden aufstrebenden Märkte miteinander zu verbinden, um ihre Potenziale weiter auszuschöpfen. Nachfolgend werden wir die moderne Radartechnik im Überblick beleuchten, um die Einsatzfähigkeit miniaturisierter Radarsensoren für kleine UAV zu zeigen.

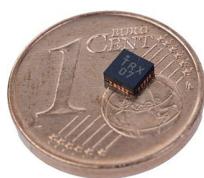


Abb. 1:
122 GHz Miniatur-Radarsensor mit integrierten Antennen der Fa. Silicon Radar im 5 × 5 mm-Gehäuse

2 Geschichte des Radars

Der Grundstein für die heutigen Radarsysteme wurde 1904 durch Christian Hülsmeier ([Abb. 2](#)) gelegt, der ein Patent für ein „Verfahren, um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden“ anmeldete. Er wollte damit Schiffe auf dem Rhein auch bei schwierigem Wetter detektieren, um die Schifffahrt sicherer zu machen.



Abb. 2: Christian Hülsmeyer (rechts) und sein „Telemobiloskop“ (links, 1904), Deutsches Museum München

Im zweiten Weltkrieg wurde das Radarverfahren weiterentwickelt und hauptsächlich dazu genutzt, feindliche Luftfahrzeuge und Schiffe frühzeitig zu melden und zu orten. Ein imposantes Beispiel dieser Entwicklungen waren die sogenannten „Würzburg Riesen“ der Fa. Telefunken (Abb. 3), die z. B. als Teil der deutschen Küstenverteidigungsline in Frankreich und Dänemark eingesetzt

wurden¹. Die über zehn Tonnen schweren Radargeräte basierten auf den sog. Würzburg Radargeräten und wurden innerhalb von drei Jahren entwickelt und in die Serienproduktion gebracht.

In den 1950er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde das Synthetische Apertur Radar (SAR) entwickelt (Abb. 4), welches dazu genutzt wird, hochauflösende Bilder von Landschaften und Objekten mit relativ kleinen Antennen zu erstellen. Dabei wird die zu erfassende Szene aus mehreren Positionen mit dem Radar beleuchtet und aus der Überlappung und



Abb. 3: Würzburg Riese in Dänemark

der genauen Position des Radargerätes künstlich die Apertur der Antenne vergrößert. Dieses Verfahren benötigt extrem hohe Rechenleistungen und ist auch heute noch mit viel Aufwand verbunden.

In den 1970er Jahren starteten zivile Entwicklungen mit dem Aufkommen der ersten automobilen Radare². In Deutschland waren auf diesem Gebiet damals vor allem AEG-Telefunken, VDO und Standard Elektrik Lorenz AG aktiv.

Heutzutage sind bereits verschiedenste Radarsysteme in Mittelklasse-Wagen zu finden, und die Entwicklung auf diesem Gebiet geht weiter in Richtung kleinerer, leistungsfähigerer, schnellerer und sparsamerer Radarsysteme (Abb. 5).

1 Foundation Centre for German Communication and related Technology, cdvandt.org, Dez. 2016.

2 Vortrag: W. Holpp: The Century of Radar. EADS Deutschland GmbH.

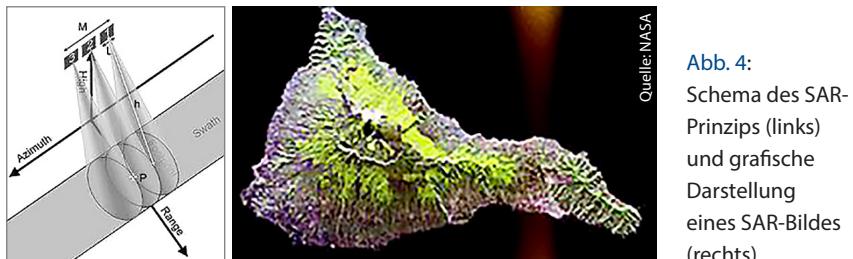


Abb. 4:
Schema des SAR-
Prinzips (links)
und grafische
Darstellung
eines SAR-Bildes
(rechts)

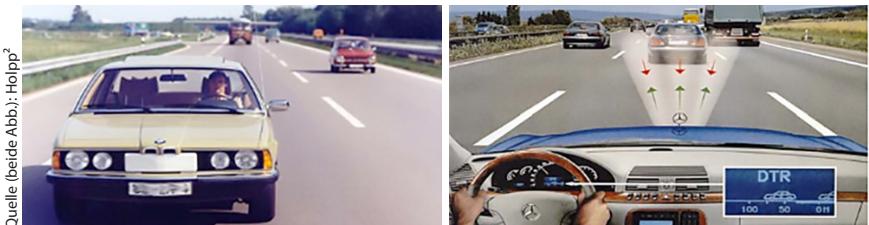


Abb. 5: Frühes Entwicklungsmuster eines 35 GHz Autoradars (links) und Darstellung des Mercedes Benz Distronic Systems von 1999 (rechts)

3 Frequenzen und Standards

Mit zunehmender Miniaturisierung müssen auch die Antennen für Radarsysteme immer kleiner werden. Außerdem sind immer kleinere Sendeleistungen erwünscht, um batteriebetriebenen Systemen eine längere Betriebsdauer zu ermöglichen. Diese beiden Randbedingungen führen dazu, dass die Frequenzen, mit denen die Radarsysteme arbeiten, immer höher gehen müssen. Während zu Zeiten des Zweiten Weltkrieges noch mit Frequenzen weit unter 1 GHz gearbeitet werden konnte, geht die Entwicklung heute zu Frequenzen oberhalb von 50 GHz. Im Automobilbereich ist heute 77 GHz als Standard festgelegt, in anderen Bereichen arbeitet man mit 24, 60, 90 oder auch über 100 GHz. In Abb. 6 ist eine Übersicht über heutige Radarfrequenzbänder oberhalb von 1 GHz dargestellt.

4 Radartechnologien

4.1 Pulsradar

Die einfachste und verständlichste Form des Radars ist das Pulsradar. Bei diesem Verfahren wird ein Frequenzpuls P ausgesendet und die Zeit gemessen, die das rückgestreute Echo des Objektes benötigt, um vom Transceiver wieder detektiert

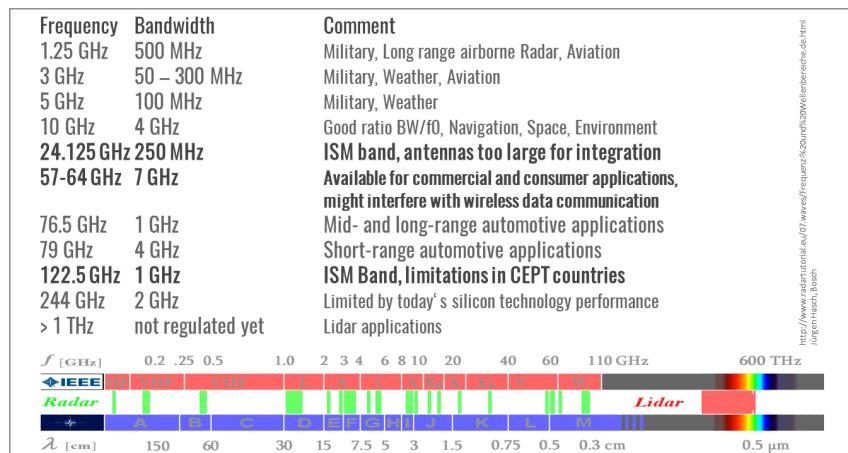


Abb. 6: Übersicht über das Frequenzspektrum >1 GHz

zu werden (t_{RX}). Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit als konstant angenommen werden kann (Lichtgeschwindigkeit c_0), ist eine Berechnung des Abstandes R sehr einfach über den Zusammenhang

$$R = c_0/2 * (t_p + t_{RX}) \mid t_p = \text{Pulsdauer}$$

zu berechnen. Gleichzeitig zeigt diese Formel auch eine fundamentale Randbedingung des Pulsradios, nämlich den Mindestabstand, der detektiert werden kann. Dieser ist von der Pulsdauer abhängig, da während des Aussendens des Pulses kein Empfang möglich ist.

Ein weiterer limitierender Faktor für das Pulsradios ist die maximale Reichweite. Sie ist von der Pulswiederholfrequenz abhängig. Bei sehr hohen Reichweiten (eher für Militär und Luftfahrt interessant) kann es passieren, dass ein Objektecho erst so spät zurückkommt, dass es in den Zeitintervall eines neuen Messpulses fällt und damit aussieht wie ein sehr nahe Ziel. Um das zu verhindern, kann z. B. die Pulswiederholfrequenz (1/PRT) an die maximale Reichweite (R_{max}) angepasst werden:

$$R_{max} = c_0/2 * (\text{PRT} - t_p)$$

Der große Vorteil von Pulsradios ist das einfache Messprinzip einer Zeitmessung und die einfache Auswertung der Distanzinformation. Gleichzeitig bedeutet das aber auch den großen Nachteil des Verfahrens, denn die Zeitmessung muss hochgenau im Pico- oder Femtosekundenbereich geschehen, wenn genaue oder kurze Abstände gemessen werden sollen. Außerdem bedeutet die genaue

Zeitmessung, dass auch im selben Zeitraster digital gesampled werden muss, was auch heutzutage noch eine extreme Herausforderung an die Schaltungstechnik bedeutet. Dies führt natürlich zu höheren Kosten und Energiebedarf, was für batteriebetriebene Massenapplikationen unvorteilhaft ist.

Weitere Parameter werden im folgenden Kap. 4.2 besprochen.

4.2 Dauerstrichradar (CW)

Der Begriff „Dauerstrichradar“ (engl. Continuous Wave – CW) bezeichnet eine Familie von Radarverfahren, bei denen gleichzeitig gesendet und empfangen wird. Anders als beim Pulsradar wird also der Sender nicht abgeschaltet, sondern läuft kontinuierlich während einer Messung. Dadurch kann der Transceiver immer das empfangene Signal mit dem derzeit ausgesendeten Signal vergleichen und eine Differenz zwischen diesen Signalen bilden. Naturgemäß ist eine Differenzmessung empfindlicher als eine Messung des Absolutwertes. Das Differenzsignal enthält damit nur noch die Signalanteile, die unterschiedlich sind im Sende- und Empfangspfad, was unter anderem die Objektechos beinhaltet.

Während beim Pulsradar die Objektinformation (Abstand, Geschwindigkeit, Richtung) im Zeitbereich codiert ist, wird diese Information im CW-Radar durch die Differenzbildung (Faltung) zwischen TX-Signal und RX-Signal in den Frequenzbereich transferiert.

Beim einfachsten CW-Radar (Abb. 7) ist nur eine Frequenzverschiebung aufgrund des Doppler-Effektes messbar, jedoch keine Entfernung zum Radarziel. Daher wird dieses Verfahren auch in Geschwindigkeitsmessgeräten (Doppler-Radar) eingesetzt (Abb. 8).

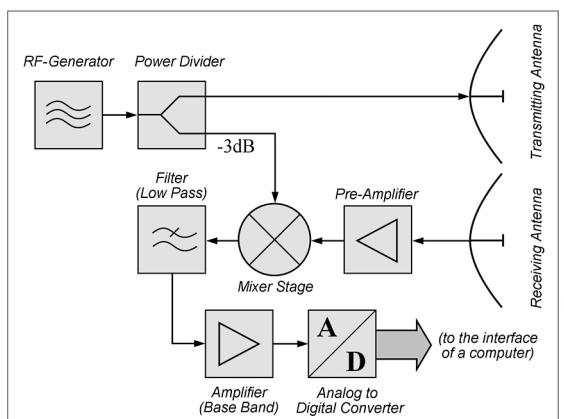


Abb. 7: Prinzipschaltbild eines CW-Radars

Quelle: Wikimedia³

³ „Bsp2 CW-Radar.EN“ by Charly Whisky – Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons – [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bsp2_CW-Radar.EN.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bsp2_CW-Radar.EN.png#/media/File:Bsp2_CW-Radar.EN.png).

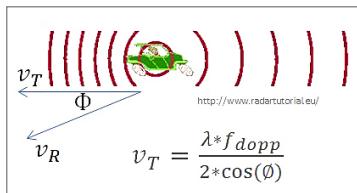


Abb. 8: Berechnung der Geschwindigkeit eines Objektes anhand der Dopplerfrequenz

Der Vorteil des CW-Verfahrens liegt im einfachen Aufbau und der einfachen Auswertung mit preiswerter Technik. Außerdem ist das Verfahren sehr robust und unanfällig gegen Störungen aber gleichzeitig sehr empfindlich für die Objektinformation, weil nur ein sehr genau bekanntes Signal gesucht werden muss. Der Nachteil liegt in der Unfähigkeit, Distanzen zu messen.

4.3 Dauerstrichradar moduliert (FMCW)

Der Nachteil des CW-Radars lässt sich relativ einfach beheben, indem man das ausgesendete Signal in einer bekannten Art zeitlich moduliert, so dass im Empfangssignal nur eine zeitlich verschobene Version des ausgesendeten Signals gesucht werden muss. Wird z. B. die Frequenz des Signals moduliert, erhält man das FMCW-Radar (frequency modulated continuous wave) (Abb. 9).

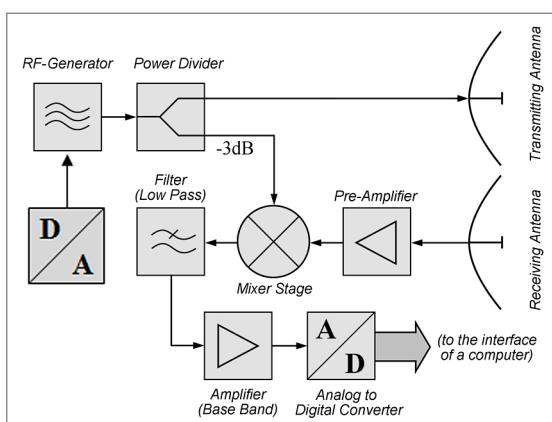


Abb. 9: Prinzipschaltbild eines FMCW-Radargerätes

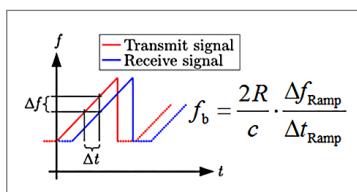


Abb. 10: FMCW-Radarsignale zur Entfernungsmeßung

Hierbei werden die Vorteile des CW-Radars durch die Fähigkeit ergänzt, eine Distanz zum Radarziel messen zu können. Im einfachsten Fall wird die Frequenz linear moduliert. Dabei hat der Transmitpfad zum Empfangszeitpunkt bereits eine höhere Frequenz als das zeitlich versetzt eintreffende Empfangssignal, was nach der Faltung eine Differenzfrequenz ergibt, die im statischen Fall allein vom Abstand zwischen Sender und Empfänger abhängt. Da die Parameter der Modulation bekannt sind, entsteht eine einfache Gleichung nach der man den Abstand aus der Differenzfrequenz bestimmen kann (Abb. 10).

Der Nachteil des FMCW-Verfahrens liegt darin, dass bewegte Ziele einen Doppleranteil und einen entfernungsabhängigen Anteil auf das Mischsignal aufprägen. Es entstehen also zwei unbekannte Variablen (Entfernung und Geschwindigkeit) und nur eine bekannte Größe (Differenzfrequenz). Damit sind sie nicht mehr eindeutig bestimmbar.

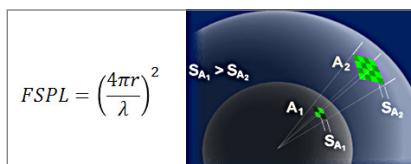
Dieser Nachteil des linearen FMCW-Verfahrens (LFMCW) lässt sich durch komplexere Modulationsarten und/oder Mehrfachmessungen lösen.

5 Universelle Radarparameter

Die spezifischen Parameter der einzelnen Radarverfahren wurden bereits besprochen. Zusätzlich gelten jedoch weitere Parameter, die universell für alle Radarverfahren gelten. Dazu gehören die Auflösung und Genauigkeit, Pfadverlust, Radarquerschnitt und andere.

5.1 Pfadverlust

Die maximale Reichweite eines Radarsystems hängt grundsätzlich von mehreren Faktoren ab. Ein wichtiger Faktor ist der Pfadverlust (Abb. 11). Bei Kommunikationssystemen, wo Sender und Empfänger örtlich getrennt sind, aber direkt miteinander kommunizieren, nimmt die Sendeleistung, die in den Halbraum abgegeben wird, quadratisch mit der Entfernung ab. Bei klassischen Radarsystemen hingegen, wo das Signal einmal vom Sender zum Objekt gesendet und dann wieder vom Objekt zum Empfänger reflektiert wird, wird das Signal zweimal in den Halbraum abgegeben. Dadurch verringert sich die Empfangsleistung mit der vierten Potenz der Entfernung.



Quelle:
www.radartutorial.eu

Abb. 11: Darstellung des Pfadverlustes für den einfachen Kommunikationsfall. Für den Radarfall wird die Empfangsleistung nochmals um das Quadrat der Entfernung reduziert.

5.2 Radargleichung

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_{E_{min}} \cdot (4\pi)^3 \cdot L_{ges}}}$$

Die Radargleichung beinhaltet alle analogen Parameter eines Radarsystems.

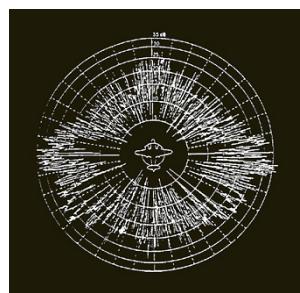
Wie bereits besprochen geht der Abstand zum Objekt mit der vierten Potenz in die Empfangsleistung ein. Zusätzlich sind Parameter wie Sendeleistung P_s , Antennengewinn von Sender und Empfänger G , die Wellenlänge des ausgesendeten Signals λ , die Zielparameter zusammengefasst im sog. Radarquerschnitt σ , die Empfindlichkeit des Empfängers P_{Emin} , sowie alle Rauschanteile der beteiligten Komponenten zusammengefasst in L_{ges} zu berücksichtigen.

Die Sendeleistung P_s kann für militärische und avionische Pulsradar-Anwendungen bis in den Megawatt-Bereich gehen. Demgegenüber sind heutige miniaturisierte Radarsysteme mit Sendeleistungen im Milli- bis Nanowattbereich angesiedelt.

5.3 Radarquerschnitt

Der sogenannte Radarrückstreuquerschnitt (radar cross section – RCS) bezeichnet verschiedene Objektparameter, die in einem virtuellen Querschnitt zusammengefasst werden (Abb. 12). Ein Objekt mit großem RCS reflektiert mehr Leistung zum Transceiver, als ein Objekt mit kleinem RCS und ist damit auch auf größere Distanzen detektierbar.

Leider ist der RCS ein extrem komplexes Thema. In die Berechnung gehen Parameter wie Größe, Material, Einfallswinkel, Wellenlänge, Oberfläche, Form usw. ein. Daher ist es für Objekte in der echten Welt extrem schwierig einen RCS zu berechnen. Berechnungsformeln existieren jedoch für sehr einfache Objekte wie Platten, Zylinder, Kugel usw. (siehe Tab. 1)



Quelle: www.radartutorial.eu

Abb. 12: Darstellung des winkelabhängigen Radarquerschnitts eines B26-Bombers

Tab. 1: RCS von ausgewählten Objekten für 24 und 122 GHz

Objekt	RCS [m^2] @ 24 GHz	RCS [m^2] @ 122 GHz
Metallplatte 50 × 50 cm	20.000	519.549
Retroreflektor 10 cm	24	623
Auto	10	?
Cola Büchse	0,5	2,66
Mensch	0,5–1	?
Baum	>1	>1

6 Prozessierung

Nachdem die Radarsignale aus dem sogenannten Frontend, also der Funkschnittstelle extrahiert wurden, müssen weitere Verarbeitungsschritte unternommen werden, um die gesuchten Variablen wie Entfernung oder Geschwindigkeit zu ermitteln. Im Fall eines einfachen LFM-CW-Radarsystems geschieht dies meistens anhand eines digitalen Signalprozessors (DSP), der die Signalaufbereitung und Weiterverarbeitung übernimmt. Typischerweise beinhaltet dies die Fourier Transformation (meistens FFT), um die aufgenommenen Signale vom Zeitbereich in den Frequenzbereich zu überführen. Dort können die Abstands- und Dopplerfrequenzen relativ einfach gemessen und für viele verschiedene Radarziele ausgegeben werden. Im Anschluss wird im Normalfall ein sog. Target-tracking durchgeführt, das dafür sorgt, dass alle in einer Szene erkannten Objekte bei der nächsten Messung den neu erkannten Objekten zugeordnet werden.

Anhand von Targettracks und Rohdaten kann bei komplexeren Radarsystemen außerdem eine Objektklassifizierung vorgenommen werden. So sind heutzutage zum Beispiel Automobilradare in der Lage zwischen Fußgängern, Radfahrern, Autos und LKW zu unterscheiden. Die Entwicklung geht auch hier hin zu immer komplexeren und leistungsfähigeren Sensoren.

7 Implementierungen

Es sind inzwischen viele verschiedene Radarsysteme am Markt verfügbar. Gerade im Bereich der Automobilfrequenzen (24 GHz und 77 GHz) sowie der ISM Frequenzen (z. B. 60 GHz) werden derzeit viele Systeme verschiedenster Komplexität angeboten. Meistens sind dies entweder sehr einfache Frontends und Sensoren, die keine tiefergehende Signalverarbeitung besitzen ([rfbeam.ch](http://www.rfbeam.ch)), oder hochkomplexe Systeme, die dem Nutzer viele Signalverarbeitungsschritte abnehmen, aber dadurch recht unflexibel im Einsatz sind ([Abb. 13](#) und [Abb. 14](#)).

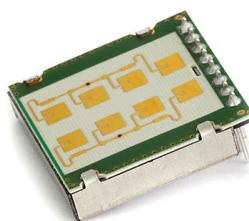


Abb. 13: Quelle:
www.rfbeam.ch



Abb. 14: Quelle:
www.tactron.de

Meistens sind dies entweder sehr einfache Frontends und Sensoren, die keine tiefergehende Signalverarbeitung besitzen ([rfbeam.ch](http://www.rfbeam.ch)), oder hochkomplexe Systeme,

die dem Nutzer viele Signalverarbeitungsschritte abnehmen, aber dadurch recht unflexibel im Einsatz sind ([Abb. 13](#) und [Abb. 14](#)).

Die Fa. Silicon Radar bietet Evaluationskits an, die auf jeder Ebene der Signalverarbeitung von den Rohdaten bis zum Targettracking Datenschnittstellen zur Verfügung stellen. Damit ist für Einsteiger das Thema der Radarsi-



Abb. 15: EasyRadar der Fa. Silicon Radar

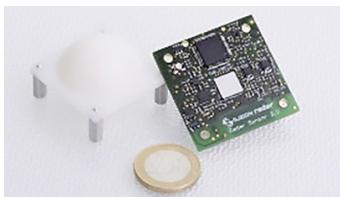


Abb. 16: SimpleRadar der Fa. Silicon Radar

gnalverarbeitung in kürzester Zeit erfassbar, aber auch professionelle Anwender können mit dem System sehr schnell verschiedenste Applikationen testen und einen Sensor erstellen ([Abb. 15](#) und [Abb. 16](#)).

Kontakt

Dieter Genschow
Silicon Radar GmbH
Im Technologiepark 1, 15236 Frankfurt (Oder)
info@siliconradar.com

Die Erfassung dreidimensionaler geometrischer Daten ist eine der Hauptaufgaben der Geodäsie, die von unbewegten oder kinematischen Plattformen aus geschehen kann. Seit einigen Jahren werden Unbemannte Flugsysteme (englisch: Unmanned Aerial Vehicles oder Systems; UAV oder UAS) als fliegende Plattformen eingesetzt. Sie spielen bei Vermessungsanwendungen eine zunehmende Rolle: Katastervermessungen, Gebäudeinspektionen, Geländeaufnahmen sind nur einige Beispiele für den erfolgreichen Einsatz der UAVs.



ISBN: 978-3-95786-107-8

A standard linear barcode representing the ISBN number 978-3-95786-107-8.

9 7 8 3 9 5 7 8 6 1 0 7 8

Schriftenreihe des DVW
Band 86 / 2017
Printversion: 28,20 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaezie.info

