

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

## UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen

Beiträge zum 169. DVW-Seminar am  
19. und 20. Februar 2018 in Hamburg



Schriftenreihe des DVW  
Band 89 / 2018

Wißner



Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

# UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen

Beiträge zum 169. DVW-Seminar am  
19. und 20. Februar 2018 in Hamburg

Redaktion:  
Thomas P. Kersten

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



Schriftenreihe des DVW  
Band 89  
Wißner-Verlag

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

[www.dvw.de](http://www.dvw.de)  
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW  
Band 89

**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.  
Internetadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.  
Kostenfreier PDF-Download unter [www.geodesie.info](http://www.geodesie.info).

**Zitierhinweis:**

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):  
UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 2018, 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: 978-3-95786-146-7  
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2018  
[www.geodesie.info](http://www.geodesie.info)

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg  
Bildnachweis Cover: Carlos Acevedo Pardo (HafenCity Universität Hamburg)

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: Einführung und Grundlagen

Kay Wackwitz	
Aktuelle Entwicklungen der europäischen Drohnenbranche	9
Michael Wieland	
Risiken, klassische Einstiegsprobleme und Strategien für den UAS-Einsatz in Ingenieurbüros	13
Carsten Brandt	
Unbemannte Luftfahrtssysteme in Deutschland – rechtlich gesehen	23
Thomas Luhmann	
Bildbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion – Möglichkeiten und Grenzen	31

## Session 2: Kameras, Testfeld und Aerotriangulation

Henry Meißner   Heinz-Jürgen Przybilla   Michael Cramer   Karsten Stebner	
UAV-Kameras – Bewertung von Kalibrierung, Langzeitstabilität und optischem Auflösungsvermögen	47
Heinz-Jürgen Przybilla   Manfred Bäumker   Johannes Vieten	
Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund	61
Maren Lindstaedt   Thomas P. Kersten	
Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge	81

### **Session 3: Kataster, Küste & Katastrophe – Erfahrungen aus der Praxis**

Markus Gerke | Claudia Stöcker | Sophie Crommelinck | Mila Koeva  
UAV für das Kataster – das EU-Projekt its4land \_\_\_\_\_ 105

Holger Dirks  
UAV für eine effiziente Vermessung im Insel- und Küstenschutz \_\_\_\_\_ 117

Thomas Kraft | Steven Bayer | Daniel Hein | Karsten Stebner |  
Daniela Lesmeister | Ralf Berger  
Echtzeit-Lagekarten für die Katastrophenhilfe \_\_\_\_\_ 123

### **Session 4: Praxisbeispiele und Innovationen**

Michael Maurer | Manuel Hofer | Friedrich Fraundorfer | Horst Bischof  
Automatische Inspektion von Hochspannungsleitungen durch  
UAV-basierte Bilddaten \_\_\_\_\_ 139

Albrecht von Ruffer | Simon Mondry  
Forstwirtschaft 4.0 – Inventur und Schädlingsfrüherkennung mit Drohne,  
Photogrammetrie und Multispektralanalyse \_\_\_\_\_ 157

Mario Finkbeiner  
Einsatz von UAV im Bereich der Deutschen Bahn AG \_\_\_\_\_ 163

# Vorwort

Unbemannte Luftfahrzeuge (engl. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) haben in den letzten Jahren zur Erweiterung des Aufgabenspektrums und einer effizienteren Erfüllung von geodätischen Aufgaben beigetragen. Als Trägerplattform für (geodätische) Sensoren erweitern UAV den Raum, in dem Vermessungen durchgeführt werden können. Sie füllen durch ihre flexiblen Einsatzmöglichkeiten bei der Aufnahme die Lücke zwischen der klassischen Luftbildphotogrammetrie mit Flugzeug oder Helikopter und der geodätischen/photogrammetrischen Aufnahme vom Boden. Die rasanten technologischen Entwicklungen haben dazu geführt, dass seit einigen Jahren unbemannte Flugsysteme als fliegende Plattformen mit unterschiedlich leistungsstarker Positionierungs- und Aufnahmesensorik eingesetzt werden. Eine Vielzahl an kommerziellen und forschungsnahen UAV-Systemen, mit LIDAR und optischen Sensoren zur Umgebungserfassung, ist heute verfügbar. UAV sind Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen, von Entwicklungen für geodätische Sonderaufgaben und werden bereits vielfach in der Praxis erfolgreich eingesetzt. Durch einen hohen Grad an Automation in der Datenerfassung und in der Auswertung großer Datenmengen können die stetig steigenden Anforderungen an aktuelle Geodaten auch durch UAV effizient erfüllt werden. UAV stellen inzwischen eine attraktive Thematik auf zahlreichen nationalen und internationalen wissenschaftlichen Tagungen wie z. B. der UAV-g oder der INTERGEO® dar.

Das 169. DVW-Seminar „Unmanned Aerial Vehicles 2018 (UAV 2018)“ hat zum Ziel, Forscher, Entwickler und Anwender über Trends, neue technische Entwicklungen und Anwendungen von UAVs bei Vermessungsprojekten zu informieren. In vier Sessions werden insgesamt 14 Vorträge während des Seminars angeboten. Davon sind 13 Beiträge in diesem Tagungsband enthalten. In der ersten Session „Einführung und Grundlagen“ werden kommerzielle Einsatzmöglichkeiten, die neuen rechtlichen Rahmenbedingungen und Risiken, Probleme und Strategien für den UAV-Einsatz aufgezeigt. Möglichkeiten und Grenzen der bildbasierten 3D-Oberflächenrekonstruktion aus photogrammetrischer Sicht runden diese Session ab. In der zweiten technischen Session „Karte, Kameras, Testfeld und Aerotriangulation“ werden eine Luftfahrtkarte für UAV vorgestellt, UAV-Kameras untersucht und die Untersuchungsergebnisse in einem UAV-Testfeld sowie von Aerotriangulationen mit unterschiedlichen Passpunktkonfigurationen gezeigt. Erfahrungen aus der Praxis werden in der dritten Session „Kataster, Küste & Katastrophe“ vorgestellt. „Praxisbeispiele und Innovationen“ mit UAV sind Thema der vierten Session, in der die Inspektion

von Hochspannungsleitungen, die Forstwirtschaft 4.0 und der UAV-Einsatz im Bereich der Deutschen Bahn AG präsentiert werden.

Das Seminar bleibt auch in diesem Jahr wieder eine gemeinsame Veranstaltung unterschiedlicher Trägerorganisationen, denn es wird nicht nur im Rahmen der GEODÄSIE-AKADEMIE realisiert, sondern fachlich wird es neben dem DVW AK 3 „Messmethoden und Systeme“, dem BILDUNGSWERK VDV FG 2 „Messverfahren“ und dem DVW Hamburg/Schleswig-Holstein e. V. auch von der DGPF (Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation) mit den beiden AKs „Sensoren und Plattformen“ und „Optische 3D-Messtechnik“ mitgestaltet.

Wir hoffen, dass das diesjährige Seminar an der HafenCity Universität Hamburg einen ähnlich großen Erfolg erreichen wird wie die beiden Veranstaltungen an der Universität Bonn (2016) und an der Universität Stuttgart (2017). Wir wünschen einen guten Verlauf des Seminars, interessante Vorträge und Diskussionen, nette Gespräche in den Pausen sowie einen hohen Erkenntnisgewinn sowohl für die Praxis als auch für die Forschung und Entwicklung.

Thomas Kersten, HafenCity Universität Hamburg, DGPF  
Harald Sternberg, HafenCity Universität Hamburg, DVW  
Volker Schwieger, Universität Stuttgart, DVW  
Norbert Haala, Universität Stuttgart, DGPF  
Danilo Schneider, TU Dresden, DGPF  
Klaus Fritzensmeier, Leica Geosystems GmbH, München, BW VDV FG 2

# **Session 1:**

## **Einführung und Grundlagen**



# Aktuelle Entwicklungen der europäischen Drohnenbranche

Kay Wackwitz

Drohnen erarbeiten sich ihren Platz in der Wirtschaft und werden bald nicht mehr wegzudenken sein. Das Potenzial Aufgaben schneller, sicherer und mit gleichbleibender Qualität zu erledigen entfaltet sich besonders an Stellen wo der regelmäßige Einsatz von Personal entweder gefährlich oder sehr teuer ist.

Die fliegenden Datensammler gibt es sowohl im hobby- als auch im militärischen Bereich. Vor ein paar Jahren haben beide Seiten erkannt, dass es sich



Abb. 1: Die fünf Kategorien des kommerziellen Drohnenmarkts

lohnt den kommerziellen Markt zu bedienen und nun treffen sich diese beiden Strömungen quasi auf halbem Weg. Dieser Markt besteht aus generell fünf Kategorien (Abb. 1): Hardware (Drohne, Sensoren, Equipment, ...), Service (Retail, Engineering, DaaS, Wartung, ...), Software (Flugplanung, Analyse, Asset Management, ...), Counter-Drone (physische und nicht-physische Drohnenabwehr) und AAT (autonomous aerial taxis).

Mittlerweile hat dieser kommerzielle Markt seine Kinderschuhe verlassen und viele marktreife Lösungen zu bieten – damit meine ich keine Lieferdienste, obwohl da auch so einiges in Bewegung ist. Aber von vorn: aktuell erobern Drohnen Bereiche wie Vermessung und Inspektion im Sturm. Sie können in sehr kurzer Zeit sehr viele hochpräzise Daten sammeln – ohne, dass z.B. eine

Baustelle dafür geschlossen werden muss. Durch die regelmäßige Wiederholung dieser Aufgaben kann man Baufortschrittskontrollen genauer machen, Verzögerungen verringern, BIM-Daten erstellen und abzutragende Volumina auf eine Handvoll Kiesel genau bestimmen. Außerdem kann man Zufahrtswege prüfen und mit Vorher-/Nachheraufnahmen sogar eventuelle Schadensersatzansprüche klären. Ob in Steinbrüchen, Tagebauen, im Hoch- oder Tiefbau – Dronentechnologie ist ein echter Paradigmenwechsel, wenn es um die Erstellung von operativ wichtigen Daten geht.

Im Bereich der Inspektion und Monitoring werden die Möglichkeiten noch größer: Bahntrassen und Hochspannungsleitungen können auf Schäden untersucht werden und die Vegetation ringsum gleich mit. Brücken, Schornsteine und Windkraftanlagen können in kurzer Zeit inspiziert werden, ohne dass sich Industriekletterer in gefährliche Höhen begeben müssen. Waldbestände, Erntezzeitpunkte und Wildschäden, sowie Schädlingsbefall, Bodenzustand und voraussichtlicher Ernteertrag können bestimmt – ja sogar Rehkitze vor dem Mäh-drescher bewahrt werden.

Nun macht eine Drohne das alles nicht ganz allein und genau da liegt der Hase im Pfeffer. Obwohl der Grad der Automatisierung ein extrem hohes Niveau erreicht hat, scheuen sich viele davor diese Technologie zu adaptieren. Das liegt weniger am Fluggerät selbst, sondern an den starken Einschränkungen seitens des Gesetzgebers und daran, was nach dem Flug mit den Daten gemacht werden muss. Aus 10 Gigabyte Fotos von der Unterseite einer Brücke muss erst einmal eine Aussage herausgearbeitet werden. Auch da kommt uns die Technologie stark entgegen: Asset-Management Softwarelösungen gibt es und die ersten Deep-Learning Algorithmen, getrimmt darauf, die Daten nach Mustern wie z. B. Rissen oder Korrosion zu durchsuchen, sind auch bereits verfügbar. Kurzum: durch die Automatisierung wird der Workflow der Datenakquise und -analyse (also der Weg vom Problem zum Report) immer besser komplettiert. Die ohnehin immensen Einsparungen der Datengenerierung werden dadurch noch größer.

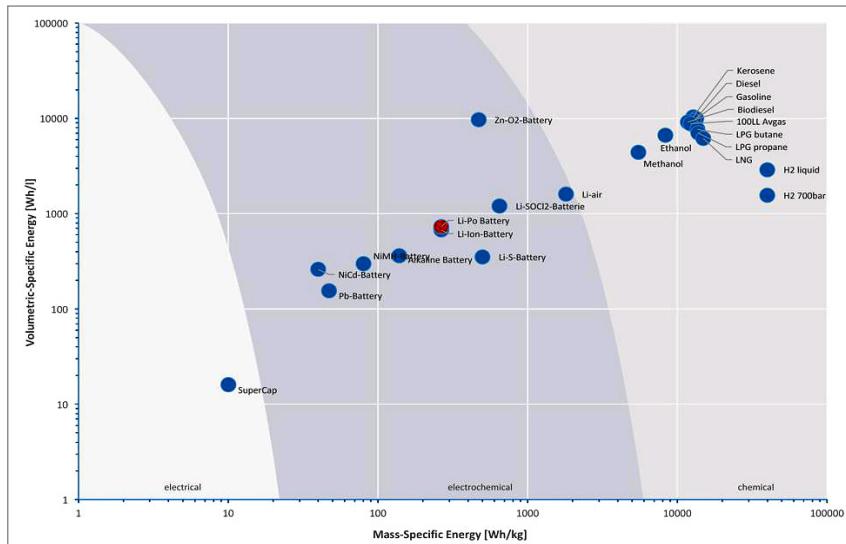
Jetzt müssen die Daten nur noch automatisiert von der Drohne in den Rechner kommen und man hat fast keine menschliche Interaktion mehr im Prozess. Das kann auf zwei Wegen passieren: entweder durch den upload in eine Cloud, wobei die Bandbreite heute einen erheblichen Engpass darstellt oder über sogenanntes on-board-processing – in diesem Fall fliegt der Computer mit den entsprechenden Algorithmen gleich mit. Da die heutigen Drohnen eher klein sind und die Flugzeit von der Menge der mitgenommenen Batterien bestimmt wird, bleiben meist keine Nutzlastkapazitäten für Computer übrig (die ja auch mit Strom versorgt werden wollen). Auf eine komplett vernetzte und in IoT Infrastruktur eingebundene Drohne werden wir also noch ein wenig warten müssen. Das liegt nicht an der Drohne selbst (die ja meist bereits heute über eine sehr gute Konnektivität verfügt), sondern an dem Ökosystem um sie herum, in das

**Abb. 2:**

Beispiel einer automatisierten Lösung in der Landwirtschaft (CASE IH Traktor)

sie eingebunden werden muss. Das kann z. B. eine Baumaschine oder ein Traktor sein (Abb. 2), der Datensätze hochladen und die entsprechenden Maßnahmen selber ausführen kann. Von flächendeckendem Einsatz solcher Geräte sind wir noch weit entfernt – Drohnen können aber auch hier den Druck auf Lösungen mit höherem Automatisierungsgrad in der Industrie erhöhen.

An der Front der Energiequellen tut sich auch einiges: die Mobilfunkindustrie und die Elektromobilität sind die Haupttreiber einer stetigen Steigerung der Energiedichte (Abb. 3). Die klassischen Lithiumpolymer-Akkus haben ein hohes Niveau erreicht, doch das wird langfristig nicht genug sein. Im Drohnenmarkt bedient man sich heute aus einer Vielzahl verfügbarer Lösungen wie z. B. Batterien, Wasserstoff, Benzin, Kerosin oder einer Mischung dieser Quellen (Hybrid). Diese Systeme erzielen bereits heute überragende Flugleistungen und die oben genannten Industrietrends werden diese Antriebe weiter verkleinern und leichter machen.

**Abb. 3:** Spezifische Energiedichte verschiedener Quellen pro [kg] Masse und [l] Volumen

Der Drohnenmarkt als Schmelziegel der Technologien bringt in unglaublicher Geschwindigkeit neue Lösungen hervor. Diese Entwicklung wird durch strategische Partnerschaften von Hardware, Software, Service und R&D Firmen noch weiter beschleunigt. Eine reine Hardware oder Softwarelösung auf den Markt zu bringen, bedient meist nur einen Ausschnitt der Wertschöpfungskette – Kunden wollen aber eine end-to-end-Lösung, die sich am besten noch mühelos in den Firmen-Workflow integrieren lässt. Größere Player wie z. B. Intel haben das auch erkannt und bauen sich ein eigenes Drohnen-Ökosystem dazu auf. Von Hardware über Flugplanung, Datenanalyse, Schnittstellen bis hin zum Asset- und Datenmanagement zählt bereits alles zum Portfolio. Andere haben das auch erkannt und tragen somit zu einer starken Konsolidierung und Professionalisierung des Drohnenmarktes bei. Die fliegende one-fits-all Drohne hat sich stark zu einem industrie- und anwendungsspezifischem Gerät entwickelt und ist in der Lage, hochpräzise Daten zu sammeln oder eben auch Pakete auszuliefern.

Warum letzteres so schwierig ist, liegt hauptsächlich an drei Dingen:

1. Die Gesetzgebung erlaubt keine Flüge außerhalb der Sichtweite und schon gar nicht über dicht besiedeltem Gebiet.
2. Der Datenschutz und die Akzeptanz der Bevölkerung müssen gesichert sein.  
Das ist vor allem in Mitteleuropa ein großes Thema – in Afrika, wo Drohnenlieferungen mittlerweile täglich stattfinden, ja sogar der erste Drohnen-Flughafen in Ruanda gebaut wird, stellen Drohnen einen Lebensretter dar, was Akzeptanzfragen gar nicht erst aufkommen lässt.
3. Die Technik, die zwar schon sehr viel kann, muss bei Lieferungen bis vor die Haustür mit einer Menge Problemen umgehen – und das autonom. Das heißt es muss, zusätzlich zum Paket, eine Menge Sensorik mitgenommen werden, um bei der Landung vor Ort Bäumen, Sträuchern, Laternen, Windverwirbelungen und anderen Fallen ausweichen zu können, ohne dass ein Mensch eingreift. Mikrowellen- und Lasersensorik werden in naher Zukunft auch diese Lücken schließen und damit der ganzen Branche weiter Aufwind geben.

Es sind wirklich aufregende Zeiten und der Einsatz von Drohnen wird sehr vieles Gutes tun auf der Welt. Was es jetzt noch braucht, sind mehr Pioniere, die diese Technologie adaptieren und das volle Potenzial nutzen, was Drohnen bereits bieten.

## Kontakt

Kay Wackwitz

Drone Industry Insights

Astraturm, 2ter Stock, Zirkusweg 2, 20359 Hamburg

[kay.wackwitz@droneii.com](mailto:kay.wackwitz@droneii.com)

# Risiken, klassische Einstiegsprobleme und Strategien für den UAS-Einsatz in Ingenieurbüros

Michael Wieland

## 1 Motivation

Der UAV DACH e. V. – Verband für unbemannte Luftfahrt – gegründet im Jahr 2000 vertritt die Interessen seiner Mitglieder, den Markt für unbemannte Luftfahrzeuge (UAS) und Anwendungen mit diesen zu entwickeln. Durch Beiträge in den Medien, Wissensaustausch in Fachgruppen sowie durch Qualifizierung von Personal trägt der Verband zu einer Professionalisierung bei und fördert die kommerzielle Nutzung von UAS.

Neben der Kommentierung von Gesetzen und Verordnungen unterstützt der Verband Unternehmen, die in die unbemannte Luftfahrt als Dienstleister, Zulieferer oder Betreiber eintreten wollen. Durch die aktuelle Entwicklung steigen die Mitgliederzahlen ständig an. 2017 waren schon über 180 Unternehmen aus mehreren Ländern Europas Teil des UAV DACH e. V.

Die unbemannte Luftfahrt ist keine solitäre Branche, sondern eine Technologie, die in fast allen Branchen eine neue Dimension eröffnet. Als ein Ergebnis der Verbandsarbeit hat sich herausgestellt, dass der Eintritt in die unbemannte Luftfahrt mit Barrieren verbunden ist. Schon mit der Anschaffung des UAS stellt sich die Frage, wofür das Luftfahrzeug letztendlich genutzt wird. Soll es als Werkzeug für eine Anwendung spezialisiert sein oder für diverse Anwendungen als Arbeitsplattform dienen? Wie kann ein Ingenieurbüro diese Technologie für sich einsetzen?

## 2 Markt

Der Markt der unbemannten Luftfahrt wird von Forschungsinstituten als eine weltweit einzigartige Chance bezeichnet. Die Umsatzvorhersagen übertreffen in jeder Veröffentlichung vorherige Schätzungen. Als belastbare Quelle verweist der UAV DACH auf die SESAR Studie von 2016 (Abb. 1), die einen jährlichen Umsatz von 10 Milliarden Euro bis zum Jahre 2035 vorhersagt.

in EUR	2035 impact				2050 impact			
	Products	Services	Others	Total	Products	Services	Others	Total
Agriculture 	800 M€	3 200 M	500 M€	4 500 M	600 M	3 200 M	400 M	4 200 M
Energy 	<100 M	1 600 M	<100 M	1 600 M	<100 M	1 600 M	<100 M	1 600 M
P.S.S <sup>1</sup> 	300 M	800 M	300 M	1 400 M	300 M	700 M	200 M	1 200 M
Delivery 	600 M	800 M	600 M	2 000 M	700 M	1 400 M	800 M	2 900 M
Mobility 	<100 M	<100 M	<100 M	<100 M	400 M	2 600 M	600 M	3 600 M
Others 	200 M	700 M	100 M	1 000 M	200 M	800 M	100 M	1 100 M

1; Public safety and security  
Note: Figures rounded to EUR 50M and 1K jobs, differences in totals due to rounding; Nominal 2016 EUR

SESAR 2016:80

**Abb. 1:** Prognostizierte Umsatzzahlen nach Branchen laut SESAR Outlook Studie aus dem Jahr 2016

Wie viele Unternehmen unbemannte Luftfahrzeuge heute einsetzen oder die genaue Anzahl der Steuerer in Deutschland ist bislang nicht bekannt. Auch der sog. Drohnenführerschein, der seit Oktober 2017 für die Steuerer von UAS über 2 kg Abfluggewicht vorgeschrieben ist, wird diese Zahlen nicht liefern, da damit kein zentrales Meldesystem verbunden ist. Allerdings geht man in Deutschland aufgrund der Umsatz- und Verkaufszahlen ebenfalls von einem starken Zuwachs an gewerblich genutzten UAS aus.

Die zukünftige Marktentwicklung wird von der Betriebsart sowie von der Nachfrage nach Leistungen mit unbemannten Luftfahrzeugen beeinflusst werden. Die Nachfrage wird vor allem durch Kostenvorteile zu klassischen Methoden und dem Zugang zu neuen Perspektiven getrieben. Hingegen ist das Angebot in Europa noch von fragmentierten Regeln und der noch nicht etablierten Möglichkeit, außerhalb der Sichtweite zu fliegen begrenzt. Die Europäische Kommission hat erkannt, wie wichtig ein erweiterter und gleichzeitig sicherer Zugang zum untersten Luftraum (bis 150 m über Grund) für kommerzielle UAS ist. Sie plant daher die stufenweise Einführung eines Systems, das UAS ermöglicht Flüge automatisch und über größere Strecken durchzuführen. Der Plan für den sogenannten U-Space (Urban Airspace) sieht vor, im Jahr 2019 noch vor einem System in den USA mit der ersten Phase zu starten. Von der Ausprägung und dem Zeitpunkt der Einführung hängt entscheidend ab, wie sich in Europa der Markt für die unbemannte Luftfahrt entwickeln wird.

### 3 Chancen und Risiken für den Einsatz von UAS

Die Nutzung von unbemannten Luftfahrzeugen war lange militärischen Anwendungen und Hobbyisten vorbehalten. Mit der Automatisierung und dem Massenverkauf flugfertiger Geräte ab 2011 änderte sich dies dramatisch. Mit minimalem Vorwissen, kurzen Rüstzeiten und niedrigen Stückkosten konnten Luftfahrtfremde Messdaten mit Hilfe den neuen Luftfahrzeugen liefern.

Beim Einsatz der hochentwickelten UAS in Verbindung mit einer professionellen Durchführung der Einsätze ergibt sich ein hohes Maß an Sicherheit. Dies begründet sich auf dem Verantwortungsbewusstsein der Steuerer und den Steuerungssystemen der UAS, die bei Fehlfunktionen den Steuerer unterstützen oder selbstständig Sicherheitsprozesse initiieren. Zudem agieren bodennahe Einsätze zur Inspektion und Vermessung in Bereichen, in denen üblicherweise keine bemannten Luftfahrzeuge fliegen. Bei professioneller Vorbereitung, entsprechender Absperrung und Wahl der Flugbahn ist daher das Risiko für Menschen am Boden in Verbindung mit dem niedrigen Gewicht eines UAS gegenüber einem Helikopeter relativ gering. Bei Inspektionen ist das UAS gegenüber dem Einsatz von Menschen auf Gerüsten oder mit Abseiltechnik als deutlich sicherer zu bewerten.

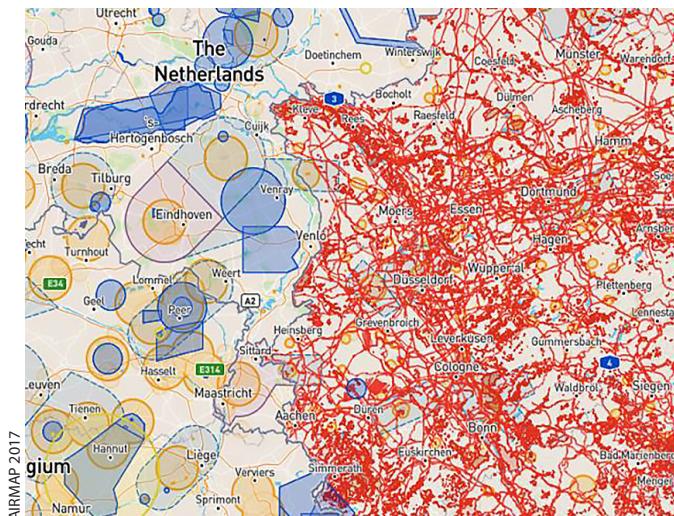
Sue Siegel von GE Ventures stellte schon 2014 die Vorteile von UAS mit fünf Begriffen dar, den 4+1 „D“s. Laut Siegel sind die Anwendungen von UAS effizient, die für Menschen zu

1. Dull – stumpfsinnig,
2. Dirty – dreckig,
3. Dangerous – gefährlich,
4. Distant – unzugänglich

sind. Zusätzlich und als fünftes Argument liefern UAS digitale Daten für die Dokumentation und Auswertung.

Einsätze, die eines der vier „D“s überwinden und zusätzlich die gewonnenen Daten nutzen ermöglichen heute schon, dass UAS durch Unternehmen oder als Dienstleistung erfolgreich eingesetzt werden. Die Vorteile für Unternehmen ergeben sich vor allem durch die Erhöhung der Erfassungsgeschwindigkeit und der Einsparung von Ressourcen. Der Anbieter der Auswertereplattform Drone Deploy (2017) spricht davon, dass Vermessungen mit UAS bis zu dreimal schneller erstellt werden als mit herkömmlichen Technologien. Chris Bartlett, Direktor der Sequel Group stellt dar, dass durch UAS die Produktivität auf der Baustelle sogar um 75 % gestiegen ist.

Die Risiken für Unternehmen sind hingegen diffiziler zu erkennen und treten meist erst direkt vor den Einsätzen auf. Das größte Problem besteht durch die noch komplexe und unübersichtliche Gesetzgebung. Solange noch nicht feststeht, wie und wann für die Anwendung von UAS eine einheitliche Regelung



**Abb. 2:**  
Luftraumdarstellung mit Einschränkungen für die Planung von UAS-Flügen am Beispiel Deutschland-Benelux

in Europa existiert, muss vor der Einführung von UAS Anwendungen dieses Risiko berücksichtig werden. Der Kartenausschnitt von AIRMAP (Abb. 2) verdeutlicht, welche unterschiedlichen Regeln existieren. Während in Benelux nur um die Flughäfen Zonen mit Einschränkungen für UAS definiert sind, sieht die deutsche Gesetzgebung weitaus mehr und kleinteiligere Beschränkungen vor.

Verzögerungen durch Wettereinflüsse sind ein weiterer Risikofaktor. Während ein Gerüst erst bei Sturm zu Fall kommt, ist bei 30 km/h Wind für viele UAS Schluss. Auch bei Starkregen, Nebel und Schneefall sind Einsätze mit UAS nur stark eingeschränkt möglich. Gerade im Winter ist daher die UAS Technologie verglichen mit anderen Anwendungen im Nachteil.

In der dynamischen Entwicklung und der Komplexität der Technik liegt ein zusätzlicher Risikofaktor. Beispielsweise beendete der Marktführer DJI die Produktion der Phantom P4 schon nach elf Monaten. Langfristig geplante Projekte müssen einen möglichen Wechsel der Arbeitsplattform daher mit einplanen. Ersatzteilbeschaffung, die Möglichkeit einer Reparatur, der Softwaresupport sind für die Investition in das Produktionsmittel UAS genauso wichtig, wie die Kosten für die Anschaffung.

Die Kosten für Betriebssicherheit stellen für kleine Unternehmen ebenfalls ein Risikofaktor dar. Ununterbrochene Dokumentation der Flüge bis hin zu sicheren Verarbeitung und Speicherung der gewonnenen Daten sind zwingend notwendig. Die großen Datenmengen führen schnell zu hohen Kosten für die Verarbeitung und Speicherung. Verluste und Veränderungen in den Messergebnissen müssen unbedingt vermieden werden, da Schadenersatzansprüche drohen.

Am Ende ist der Mensch immer ein Risikofaktor. Denn bis UAS völlig autonom fliegen, benötigt der Einsatz eine Crew. Diese muss geschult und koordiniert arbeiten. Genehmigungen der Luftfahrtbehörde sind an die eingetragene Person des Steuerers gebunden. Dessen Ausfall führt zu Verzögerungen und stellt im besonderen Maße ein Risiko für terminorientierte Einsätze dar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Einführung von UAS in einem Unternehmen viele Chancen und Risiken bewertet werden müssen. UAS können in einigen Bereichen hervorragende Ergebnisse liefern. Gerade kleinere Ingenieurbüros sollten eine individuelle Strategie entwickeln, um nicht von unerwarteten Kosten und Einschränkungen überrascht zu werden.

## 4 Herausforderungen für Ingenieurbüros

In der Vergangenheit reichte es, ein Fluggerät zu kaufen, um nach kurzer Zeit Dienstleistungen mit UAS anzubieten. Mit der Marktentwicklung stieg der Druck, Qualität zu einem konkurrenzfähigen Preis zu liefern.

Voraussetzungen für die Einführung von UAS sind:

- Planen,
- Geschäftsleitung einbinden,
- Training aufsetzen,
- Erfolg messen.

Heute ist die Entscheidung UAS-Anwendungen zu Nutzen Chefsache. Da die Einführung von UAS Auswirkungen in fast alle Bereiche des Unternehmens bedeutet, werden klare Handlungsanweisungen von der Geschäftsleitung benötigt. Teams sollten Ihren Plan immer mit der Führung abstimmen, wenn das Projekt mehr als eine Eintagsfliege werden soll.

Für Steuerer der UAS ist ein Schulungsprogramm zu installieren. Ausgewählte Mitarbeiter durchlaufen ein intensives Aus- und Weiterbildungsprogramm und wiederholen dieses regelmäßig. Zusätzlich benötigen diese Mitarbeiter zugewiesene Arbeitszeit, um sich über Neuerungen informieren und intern umzusetzen zu können.

Bei aller Diskussion über die Technik, darf der wirtschaftliche Erfolg nicht vergessen werden. Trotz der Faszination über die Fähigkeiten des Fluggeräts, zählen am Ende Ergebnisse. Nur wer Kennwerte aufnimmt, kann regelmäßig Erfolge und Trends messen. Typische Kennwerte sind:

- feste und variable Betriebskosten,
- geplante vs. erreichte Umsätze durch/mit UAS,
- Ersparnisse bzw. Erfolge gegenüber klassischen Produkten,
- Anzahl der Zwischenfälle, Nacharbeiten.

Für kleinere Unternehmen nicht zu vernachlässigen sind die Datenverarbeitung und Dokumentation. Für den Betrieb von lokalen Systemen entstehen durch die großen Datens Mengen nicht unerhebliche Kosten. Cloud Lösungen stellen eine Alternative dar und locken mit niedrigen Preisen. Die Dienste basieren auf sicheren, schnellen Internetverbindung, die vorhanden sein müssen. Entscheidend ist, dass die Strecke der Datenverarbeitung transparent ist, Fehlerquellen von vorne herein eliminiert und mit Referenzmessungen systemische Fehler möglichst vermieden werden.

Der oftmals enge Kontakt der Ingenieurbüros zum Kunden stellt eine gute Voraussetzung für die Einführung von UAS dar. Die hohe Flexibilität lässt eine gezielte und kundenorientierte Anwendung zu. Da jedoch die Einführung mit nicht unerheblichen Kosten verbunden ist, die über die Investition in das Fluggerät und eine Initialschulung hinausgehen, bedarf es eines konkreten Plans. Vor der Entscheidung sollte das Gesamtpotenzial gegenüber dem Aufwand bekannt sein, denn nur eine professionelle Anwendung dient der Entwicklung der unbemannten Luftfahrt und der eigenen Marke.

## 5 Strategieentscheidungen die den effizienten Einsatz von UAS in Ingenieurbüros

Eine Vorhersage für das Jahr 2018 besagt, dass immer mehr Unternehmen UAS mit eigenen Einheiten einsetzen (Ziering 2017). Glaubt man diesen Vorhersagen, ist der Zeitpunkt also günstig, um ebenfalls UAS zu nutzen. Welche Leitfragen gilt es zu beantworten, um UAS Anwendungen in einem Ingenieurbüro zu etablieren?

### 5.1 Auswahl der Technologie: Standardsystem vs. Spezial UAS

Je nach Ergebnis, Qualität und Präzision aber auch nach der benötigten Flexibilität muss das richtige UAS ausgewählt werden. Dabei stehen zwei Gesichtspunkte im Vordergrund.

#### a) Flugsystem: Multicopter oder Flächen-UAS

Während Quadcopter einfach, günstig und flexibel sind, kommen wieder mehr Hexa- und Octocopter auf. Die Anzahl der Antriebe steht im Allgemeinen für größere Lasten und mehr Sicherheit. Alternativ gibt es Flächen-UAS, die wie ein Flugzeug aussehen. also Flügel mit einem Antrieb für den Vorschub besitzen. Durch den Auftrieb der Flügel bestechen diese UAS durch eine deutlich höhere Flugzeit. Allerdings können die Flächen-UAS nicht schweben, was die Inspektion oder Bildaufnahme beeinträchtigt. Zwitter vermischen die beiden Ansätze.

Die sogenannten VTOLs können trotz Flügel senkrecht starten und nutzen den Vorteil des Auftriebs ihrer Tragflächen im Vorwärtsflug. VTOLs werden deutlich zunehmen, sobald Flüge außerhalb der Sichtweite genehmigt werden, da sich damit z. Z. größere Gebiete befliegen lassen.

b) Sensorik: Integrierte Kamera oder Spezialkamera bzw. Laser Abstands Messung (LIDAR)

Die Sensorik muss den Anforderungen des Produktes entsprechen. Integrierte Kameras lassen sich leicht Bedienen und die Daten sind direkt mit Flugdaten verknüpft. Spezialkameras bzw. Laser Messgeräte (LIDAR) liefern wesentlich höhere Auflösungen und Genauigkeiten. Die Auswertung ist jedoch deutlich aufwendiger an individuelle Systeme gebunden.

## 5.2 Auswahl der Steuerer: Fachexperte vs. UAS-Experte

UAS werden als Zusatzprodukt oder als Ersatz einzelner Anwendungen eingeführt. Es liegt daher nahe, den jeweiligen Fachexperten zusätzlich zum Steuerer auszubilden. Er kann vor Ort Messung beurteilen und Korrekturen vornehmen. Für wiederkehrende Messungen, gleichartige und regelmäßige Einsätze, die unabhängig vom Einsatzort beurteilt werden können, sind spezialisierte UAS Steuerer günstiger. Tab. 1 zeigt die jeweiligen Vor- und Nachteile.

## 5.3 Zentrale Drohneneinheit vs. standortorientierter Verteilung

Vor allem bei größeren Unternehmen stellt sich die Frage, ob UAS dezentral an jedem Standort eingesetzt oder alle Systeme an einem oder wenigen Orten zusammengefasst werden. Für wenige Standorte sprechen eine hohe Kompetenzdichte, sowie die einfachere Gestaltung der Wartung und Verwaltung. Systeme

**Tab. 1:** Gegenüberstellung Fachexperte gegenüber UAS-Pilot

	Fachexperte	UAS-Pilot
Pro	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ergebnisgetrieben</li> <li>▪ Hohe Fachkompetenz vor Ort</li> <li>▪ Erkennt Fehler frühzeitig und vermeidet Messfehler.</li> <li>▪ Wertet eigene Flüge aus.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Präzise Flugmanöver</li> <li>▪ Kürzere Flugzeiten</li> <li>▪ geringe Personalkosten</li> <li>▪ Kann Systemfehler vor Ort reparieren</li> </ul>
Contra	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Personalkosten</li> <li>▪ Fachkompetenz gebunden</li> <li>▪ Wenig Flugerfahrung</li> <li>▪ Wenig Luftrechterfahrung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auslastungsdruck</li> <li>▪ Meist fachfremd, muss im Fachgebiet geschult werden.</li> </ul>

werden meist verteilt, wenn die Fachexperten die UAS fliegen und an verschiedenen Standorten sitzen. Dadurch sinkt der Auslastungsgrad der UAS, der Aufwand für die Anfahrt und der einheitlichen Wartung steigen. Ebenso erhöhen sich die Kosten für regelmäßige Trainings, um die Qualität und Sicherheit hoch zu halten.

## 5.4 Datenauswertung und Dokumentation lokal vs. Cloud

Die Auswertung der Daten muss möglichst nahtlos in bestehende Systeme integrieren. Anpassungen sind fast nie zu vermeiden. Wenn die Anforderungen es zulassen, können Daten durch Dienste in der Cloud ausgewertet werden. Die Systeme werden ohne hohe Investitionskosten als Service angeboten. Die Angebote folgen den Ansprüchen der meisten Kunden und bieten kaum individuelle Anpassungen. Die Investition in ein lokales System muss so gewählt werden, dass es innerhalb der Nutzungsperiode benötigte Resultate liefern kann. Ansonsten belasten Neuinvestitionen das Ergebnis. Letztlich entscheiden die Vorgaben zur Datensicherheit, vorhandene Schnittstellen und die Kosten für Wartung und Updates, welche Form der Auswertung genutzt werden kann.

## 6 Fazit

In wenigen Jahren werden UAS in allen Lebenslagen zur Menschheit gehören, wie das Telefon. Der Einstieg oder die Erweiterung eines Unternehmensprofils mit UAS lohnt sich in vielen Fällen schon heute. Allerdings bedarf der Einsatz eines konkreten Plans, strikte Vorgaben, konkrete Strategieentscheidungen und Konzentration auf Ergebnisse. Was große Unternehmen oft mit „Tiger Teams“ erledigen, müssen Ingenieurbüros nebenbei und mit zusätzlichen Anstrengungen erreichen. Dafür sollten sich gerade kleinere Unternehmen gezielt beraten lassen, um unnötige Kosten und Fehlschläge zu vermeiden.

Der UAV DACH versteht sich als Partner der Industrie und unterstützt die Einführung von UAS. Durch die Aufbereitung von Nachrichten und das vorhandene Wissen sind Mitglieder des Verbands stets aktuell informiert. Angebote zur Qualifizierung von Personal und Zertifizierung von Prozessen garantieren einen hohen Standard. Der Verband vermittelt Kontakte und über die Mitarbeit in den Fachgruppen können Vertreter kleinerer Unternehmen bei Entwicklungen neuer Standards aktiv teilnehmen. Als UAV DACH begrüßen wir daher jedes Unternehmen, das sich entscheidet UAS-Technologie professionell zu nutzen oder qualitativ hochwertige Dienstleistungen mit UAS anzubieten.

## Literatur

- AIRMAP (2017): Everything you need to coordinate and scale drone operations in ever-changing airspace conditions. [www.airmap.com](http://www.airmap.com), letzter Zugriff 15.1.2018.
- DroneDeploy (2017): Preparing for Takeoff – Guide 2017. [www.dronedeploy.com/resources/ebooks/ultimate-guide-setting-up-drone-operation](http://www.dronedeploy.com/resources/ebooks/ultimate-guide-setting-up-drone-operation), letzter Zugriff 15.1.2018.
- SESAR (2016): European Drones Outlook Study – Unlocking the value for Europe. [www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European\\_Drones\\_Outlook\\_Study\\_2016.pdf](http://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European_Drones_Outlook_Study_2016.pdf), letzter Zugriff 15.1.2018.
- Ziering, J. (2017): Three Commercial Drone Industry Predictions That Will Surprise You. [www.suasnews.com/2017/12/three-commercial-drone-industry-predictions-will-surprise](http://www.suasnews.com/2017/12/three-commercial-drone-industry-predictions-will-surprise), letzter Zugriff 30.12.2017.

## Kontakt

Michael Wieland

UAV D A C H e.V.

Lilienthalplatz 1, 38108 Braunschweig

[geschaefsstelle@uavdach.org](mailto:geschaefsstelle@uavdach.org)



# **Unbemannte Luftfahrtsysteme in Deutschland – rechtlich gesehen**

Carsten Brandt

## **1 Einführung**

Nichts ist beständiger als die Veränderung. Obwohl es manchen Anwender überraschen mag, gilt dies natürlich auch für das Luftverkehrsrecht.

Die Entwicklung auf dem Sektor der unbemannten Luftfahrtsysteme ist rasant. Das Wachstum der Branche, sowohl nach Anzahl der Geräte und Nutzer als auch nach den Umsätzen, sucht seinesgleichen. Alles Neue erzeugt jedoch in der Gesellschaft auch eine gewisse Skepsis, manchmal auch Misstrauen gegenüber dem Unbekannten.

Die Geschwindigkeit, mit der sich Entwicklungen vollziehen, ist oft deutlich größer als die Geschwindigkeit, mit der die rechtlichen Grundlagen angepasst werden. Der Gesetzgeber steht also stets in der Verantwortung, zügig, aber auch vorausschauend diesen Entwicklungen Rechnung zu tragen. Er muss für Regeln sorgen, die das Sicherheitsbedürfnis der Bevölkerung berücksichtigen, aber auch den jeweiligen Wirtschaftszweig mit all seinen Beteiligten nicht über Gebühr behindern.

## **2 Warum gesetzliche Regeln für Drohnen?**

Auf den Bereich der Multicopter bezogen sorgen die vielen neuen Möglichkeiten und vor allem die große Zahl der Geräte dafür, dass früher oder später vermutlich jeder mit einer „Drohne“ in Kontakt kommt. Kaum ein Film oder eine Fernsehsendung kommt heute noch ohne Dronenaufnahmen aus; ein Kameramann, der keine Drohne besitzt, bekommt diesen Wettbewerbsnachteil hautnah zu spüren.

Was vor ein paar Jahren noch eine durchaus fünfstellige Investition bedeutete, kann man heute im Drogeriemarkt um die Ecke kaufen. Jeder kann sich sein Haus von oben ansehen und spektakuläre Aufnahmen machen, ohne dass dabei ein Hubschrauber oder Kran bemüht werden muss.

Eine Mutter, die sich an die Polizei wendet, weil ihr Nachbar schon seit Tagen jeden Abend eine Drohne vor dem Zimmer ihrer zwölfjährigen Tochter

schweben lassen würde, gehört bestimmt zu den Helikoptereltern. Der Nachbar macht bestimmt nur Aufnahmen vom Sonnenuntergang.

Wenn ein Pilot es für zu riskant hält, am Unfallort zu landen, weil schon Schaulustige mit einer Drohne Aufnahmen vom Geschehen machen und seinen Rettungshubschrauber lieber ein paar hundert Meter weiter weg landet, stellt er sich bestimmt nur an. Was soll so ein kleines Spielzeug schon einer EC 135 mit einem Einsatzgewicht von fast drei Tonnen anhaben?

Die neuen Drohnen sind klein und wendig. Die teureren sind auch richtig schnell, so etwa 100 km/h. Die Bilder, die man sogar als Amateur damit machen kann, sind spitze. Eine Drohne hinter dem Fahrrad herfliegen zu lassen – kein Problem, sie hält sogar ganz stabil die Position relativ zum Fahrer, und das vollautomatisch. Sogar neben einem Auto klappt das! Und die Aufnahmen, wenn man die Drohne direkt im Endanflug positioniert und einen Airbus in zehn Metern Entfernung darunter hindurchdurchfliegt – der absolute Wahnsinn. Man kann sogar das Weiße in den Augen der Piloten sehen.

Disconebel ist super. Er kommt nur leider immer aus fest installierten Düsen. Es ist doch absolut cool, wenn man mit einer Drohne über den Festivalbesuchern fliegen würde und von da aus farbigen Rauch über die Menge wehen lässt.

Vielelleicht haben Sie beim Überfliegen den Eindruck gewonnen, dass es an mancher Stelle doch ganz sinnvoll ist, gewisse Regeln für den Umgang mit Drohnen zu haben.

### 3 Gesetze und Zuständigkeiten

Die Luftfahrt ist in hohem Maße eine länderübergreifende Angelegenheit. Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO), in der Deutschland seit 1956 Mitglied ist, hat deshalb für fast alle Bereiche der Luftfahrt Standards festgelegt, die die Mitgliedsstaaten jeweils in nationales Recht umsetzen müssen.

Dem Grundgesetz nach ist in Deutschland der Bund für die Luftfahrtgesetzgebung zuständig. Das Luftverkehrsgesetz regelt den groben Rahmen; die nachgeordneten Verordnungen (Luftverkehrsordnung, Luftverkehrs-Zulassungsordnung etc.) regeln die Einzelheiten.

Der Bund hat im Rahmen der Bundesauftragsverwaltung Aufgaben an andere Stellen delegiert. Zuständig für die Erteilung von Erlaubnissen und die Verfolgung von Verstößen im Bereich der unbemannten Luftfahrt sind die Landesluftfahrtbehörden. Hierzu ist anzumerken, dass diese in der Auslegung der Regelungen und in der Festlegung ihrer Verfahren frei sind. Es mag also Unterschiede in den Verfahren und den Erlaubnissen geben.

Um diese Unterschiede auf das absolut notwendige Minimum zu reduzieren, werden in Bund-Länder-Arbeitsgruppen allgemeine Grundsätze erarbeitet, an

denen sich alle Länder orientieren, soweit dies aufgrund der regionalen Bedingungen möglich ist.

Zuletzt wurden die Vorschriften für den Betrieb unbemannter Luftfahrtsysteme durch die Änderung der Luftverkehrsordnung im April 2017 angepasst.

Mit der (geplanten) Änderung der EU-Verordnung 216/2008 wird aller Voraussicht nach die Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA) für Regelungen im Bereich der unbemannten Luftfahrt zuständig sein und einen Verordnungsentwurf zur Kommentierung vorlegen. Europäisches Recht steht höher als nationales Recht. Mit Inkrafttreten der europäischen Drohnen-Regelungen wird also das „neue“ deutsche Drohnenrecht schon wieder weitgehend gegenstandslos.

## 4 Drohne? Flugmodell? UAS?

Nach dem Luftverkehrsgesetz sind Flugmodelle und unbemannte Luftfahrtsysteme (UAS) **Luftfahrzeuge** und unterliegen den entsprechenden Regeln.

Worin liegt der Unterschied? Was macht eine Drohne zum Flugmodell oder zum UAS? Anders als in allen anderen Bereichen der Luftfahrt ist die Unterscheidung im **Einsatzzweck** begründet. Ein Multicopter kann im einen Moment ein Flugmodell sein, nämlich dann, wenn er **zum Zwecke des Sports oder der Freizeitgestaltung** betrieben wird. Derselbe Multicopter kann im nächsten Moment ein unbemanntes Luftfahrtsystem sein, nämlich dann, wenn der Steuerer mit dem Einsatz einen **anderen Zweck** als den Sport oder seine Freizeitgestaltung verfolgt.

Vor der Novellierung der Luftverkehrsordnung im April 2017 brauchte der Betreiber eines UAS **immer** eine Erlaubnis der zuständigen Behörde, der Steuerer eines Flugmodells (also desselben Gerätes) in vielen Fällen nicht. Diese – aus Sicht vieler UAS-Betreiber unfaire – Unterscheidung wurde durch die neuen Regeln weitgehend aufgehoben. Die Nutzer von Flugmodellen haben noch einige Erleichterungen, insbesondere hinsichtlich des Kenntnisnachweises für Steuerer sowie auf den Modellfluggeländen, für den Alltagsbetrieb von UAS ist es jedoch deutlich leichter geworden.

## 5 Aktuelle Rechtslage

Die Frage „Darf ich hier mein UAS aufsteigen lassen?“ zu beantworten, erfordert einige Vorbereitung und Kenntnisse über den Aufstiegsort. Grundsätzlich sind verschiedene Dinge zu berücksichtigen:

1. Benötige ich eine Erlaubnis?
2. Benötige ich eine Flugverkehrskontrollfreigabe?
3. Lassen die Wetterbedingungen den Aufstieg zu?
4. Bestehen Betriebsverbote an dem Ort, für die ich eventuell eine Ausnahmegenehmigung beantragen muss?
5. Brauche ich einen Kenntnisnachweis („Drohnenführerschein“)?
6. Muss meine Drohne gekennzeichnet sein?
7. Ist mein Copter noch richtig versichert?

## 5.1 Erlaubnis

Eine Aufstiegserlaubnis kann allgemein oder für den Einzelfall erteilt werden, zuständig ist die für den Aufstiegsort zuständige Landesluftfahrtbehörde.

Nach der geltenden Luftverkehrsordnung (LuftVO, hier § 21a) bedürfen einer Erlaubnis nur UAS

- mit mehr als 5 kg Abflugmasse,
- in einer Entfernung von weniger als 1,5 km von Flugplätzen (hierzu gehören Flughäfen, Landeplätze und Segelfluggelände; die sogen. Public Interest Sites an Krankenhäusern, die keinen genehmigten Hubschrauberlandeplatz haben, genießen diesen Schutz aufgrund des wesentlich geringeren Verkehrs nicht),
- bei Nacht (zusätzlich müssen sie über eine Positionsbeleuchtung verfügen).

Keiner Erlaubnis bedarf der Betrieb von UAS von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben oder unter der direkten Aufsicht von diesen.

Vermessungsaufgaben im staatlichen Auftrag können also, sofern die Behörde direkt den Betrieb beaufsichtigt, ohne Erlaubnis durchgeführt werden, wenn ein sicherer Betrieb möglich ist und der übrige Luftverkehr nicht gefährdet wird. Auch von den Betriebsverboten des § 21b LuftVO (siehe Kap. 5.4) kann ein solcher Betrieb ausgenommen sein. Die zuständige Landesluftfahrtbehörde erteilt hierzu Auskunft.

## 5.2 Flugverkehrskontrollfreigabe

Vor dem Aufstieg eines UAS im kontrollierten Luftraum (Luftraum der Klassen C-E) hat der verantwortliche Steuerer eine Flugverkehrskontrollfreigabe bei der zuständigen Flugverkehrskontrollstelle einzuholen. Je nach „Betreiber“ der Kontrollzone können dies unterschiedliche Stellen sein. An den großen deutschen Verkehrsflughäfen ist hierfür die Deutsche Flugsicherung GmbH ([www.dfs.de](http://www.dfs.de)) zuständig, an Militärflugplätzen die Bundeswehr, an kleineren Flugplätzen mit Kontrollzone können andere Flugsicherungsunternehmen (z. B. Airbus, AustroControl) zuständig sein.

Die Deutsche Flugsicherung GmbH hat für „ihre“ Kontrollzonen eine Allgemeinfreigabe bis zu einer Höhe von 50 m erteilt, sofern der Aufstieg außerhalb von 1,5 km um einen Flugplatz erfolgt.

UAS-Aufstiege sind über 100 m zwar ohnehin verboten (s. unten), der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass der kontrollierte Luftraum in Kontrollzonen am Boden, außerhalb dieser in 1.000 ft (300 m) und in größerer Entfernung spätestens in 2.500 ft. (760 m) über Grund oder Wasser beginnt.

### 5.3 Wetterbedingungen

Solange ich das UAS sehen kann, kann ich es starten lassen. – Leider ist das ein Trugschluss. Die Wetterbedingungen, die der Gesetzgeber für den Luftverkehr festgelegt hat, gelten für alle Luftfahrzeuge, also auch für UAS und Flugmodelle.

Im **unkontrollierten** Luftraum (Luftraum der Klasse G) ist mindestens eine Sichtweite von 1,5 km erforderlich, auch wenn das UAS gar nicht so weit wegfliegen soll. Zudem dürfen Wolken nicht berührt werden, was innerhalb der Sichtweite des Steuerers ohnehin nicht möglich ist.

Im **kontrollierten** Luftraum (C-E), also auch in einer **Kontrollzone**, beträgt die Sichtweite mindestens 5 km und die Mindest-Wolkenuntergrenze 1.500 ft. (450 m). In der Kontrollzone ist hierfür das amtlich festgestellte Flugplatzwetter entscheidend (es gibt kostenfreie Flugwetter-Apps, die diese Berichte (METAR) darstellen können). In Hamburg kann dies z. B. dazu führen, dass ein UAS-Aufstieg an der Elbe bei bestem Wetter nicht stattfinden darf, weil der Flughafen Hamburg noch im Nebel liegt.

### 5.4 Betriebsverbote

Durch den § 21b LuftVO sind einige Bereiche besonders geschützt, in ihnen ist der Betrieb von UAS und Flugmodellen grundsätzlich verboten. Die zuständige Landesluftfahrtbehörde kann zwar Ausnahmen hiervon genehmigen, zumeist werden hierbei jedoch strenge Maßstäbe angelegt. Nach den neuen Allgemeinen Grundsätzen für die Erteilung von Erlaubnissen kann die Behörde eine Sicherheitsbewertung (SORA, *Special Operations Risk Assessment*) und für besonders kritische Aufstiegsvorhaben auch spezielle Sicherheitsvorkehrungen verlangen.

Einige dieser Betriebsverbote gelten nicht, wenn der entsprechende Betreiber oder Eigentümer dem Betrieb vorher zugestimmt hat. Es wird empfohlen, diese Zustimmung schriftlich einzuholen, damit im Zweifelsfall die Zustimmung belegt werden kann.

Der Betrieb von UAS ist grundsätzlich verboten

- **außerhalb der Sichtweite des Steuerers** sofern die Startmasse des Geräts 5 Kilogramm und weniger beträgt,
- über und in einem **seitlichen Abstand von 100 Metern** von **Menschenansammlungen, Unglücksorten, Katastrophengebieten** und anderen Einsatzorten von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben, **Bundeswehr**,
- über und in einem **seitlichen Abstand von 100 Metern** von der Begrenzung von **Industrieanlagen, Justizvollzugsanstalten, Einrichtungen des Maßregelvollzugs, militärischen Anlagen, Anlagen der Energieerzeugung und -verteilung**, soweit nicht der Betreiber der Anlage dem Betrieb ausdrücklich zugestimmt hat,
- über und in einem **seitlichen Abstand von 100 Metern** von Grundstücken, auf denen die **Verfassungsorgane, oberste und obere Bundes- oder Landesbehörden oder diplomatische und konsularische Vertretungen, Polizei**, soweit nicht die Stelle dem Betrieb ausdrücklich zugestimmt hat,
- über und in einem **seitlichen Abstand von 100 Metern** von **Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen**, soweit nicht die zuständige Stelle dem Betrieb ausdrücklich zugestimmt hat,
- über **Naturschutzgebieten, Nationalparken**, soweit der Betrieb von unbemannten Fluggeräten in diesen Gebieten nach landesrechtlichen Vorschriften nicht abweichend geregelt ist,
- über **Wohngrundstücken**, wenn die Startmasse des Geräts mehr als 0,25 Kilogramm beträgt oder das Gerät oder seine Ausrüstung in der Lage sind, optische, akustische oder Funksignale zu empfangen, zu übertragen oder aufzuzeichnen, es sei denn, der betroffene Eigentümer oder sonstige Nutzungsberchtigte hat dem Überflug ausdrücklich zugestimmt,
- in **Flughöhen über 100 Metern** über Grund, es sei denn, der Steuerer verfügt über einen Kenntnisnachweis,
- in **Kontrollzonen über 50 Meter** über Grund,
- zum **Transport** von gefährlichen Stoffen sowie von Gegenständen, Flüssigkeiten oder gasförmigen Substanzen, die geeignet sind, bei Abwurf oder Freisetzung Panik, Furcht oder Schrecken bei Menschen hervorzurufen,
- über und in einem **seitlichen Abstand von 100 Metern** von der Begrenzung von **Krankenhäusern**.

(Auszug aus § 21b LuftVO)

## 5.5 Kenntnisnachweis

Steuerer von UAS über 2 kg benötigen einen Kenntnisnachweis, nach § 21a Abs. 4 Nr. 3 LuftVO einen Kenntnisnachweis. Diesen erhält man nach einer entsprechenden Schulung und erfolgreichem Bestehen eines Abschlusstests.

Die Stellen, die solche Kenntnisnachweise ausstellen, müssen vom Luftfahrt-Bundesamt (LBA) anerkannt sein. Auf der Homepage des LBA ([www.lba.de](http://www.lba.de)) sind die anerkannten Stellen veröffentlicht.

Eine gültige Lizenz für Luftfahrzeugführer ersetzt diesen Kenntnisnachweis.

Steuerer von Flugmodellen können einen Kenntnisnachweis durch eine Einweisung eines Berechtigten erlangen. Dieser ist jedoch zum Betrieb von UAS nicht ausreichend.

## 5.6 Kennzeichnungspflicht

Seit dem 1. Oktober 2017 müssen alle UAS und Flugmodelle, die schwerer als 250 g sind, mit einer feuerfesten Kennzeichnung versehen sein, die fest mit dem Fluggerät verbunden ist. Hierauf müssen Name und Anschrift in dauerhafter Beschriftung angegeben sein.

## 5.7 Versicherungspflicht

Alle Luftfahrzeuge müssen nach dem Luftverkehrsgesetz über eine Haftpflichtversicherung verfügen. Die Mindest-Deckungssumme beträgt 750.000 Sonderziehungsrechte (SDR, zurzeit ca. 890.000 Euro) für Luftfahrzeuge bis 500 kg.

Eine normale Privat- oder Betriebshaftpflichtversicherung greift für Schäden, die durch Fahrzeuge (also auch Luftfahrzeuge und somit auch UAS) verursacht werden normalerweise nicht. In jedem Fall wird dringend empfohlen, sich vom Versicherer bescheinigen zu lassen, dass der Betrieb von UAS nach den Regelungen des Luftverkehrsgesetzes mitversichert ist. Zumeist ist eine spezielle Luftfahrt-Haftpflichtversicherung notwendig, da die Schadenersatzregelungen und Haftungsgrenzen sich von der Haftung nach dem Bürgerlichen Gesetzbuch unterscheiden.

# 6 Verantwortung

Wie eingangs beschrieben, sind unbemannte Luftfahrtsysteme **Luftfahrzeuge**. Steuerer von UAS sollten sich stets bewusst sein, dass sie denselben Luftraum benutzen, wie die bemannte Luftfahrt und das für sie auch die gleichen Regeln

gelten. Dies verpflichtet zu einer gewissenhaften Flugvorbereitung und -durchführung.

Zur Vorbereitung gehört neben einem technischen Check und dem Blick auf das Wetter auch eine genaue Betrachtung des **Aufstiegsortes**. Liegt er in einer Kontrollzone? Sind Behörden oder Konsulate in der Nähe? Sind dort viele Menschen unterwegs?

Eine **Menschenansammlung** ist nach einem Gerichtsurteil definiert als eine Gruppe von Personen, deren Anzahl nicht auf Anhieb erfasst werden kann. Ab zehn Personen kann also spätestens von einer Menschenansammlung ausgegangen werden. Diese müssen nicht dicht beieinanderstehen oder zusammengehören. Dies bedeutet, dass sich auf dem Rathausmarkt in Hamburg z. B. tagsüber sehr selten keine Menschenansammlung aufhält.

Apropos: Das Rathaus in Hamburg ist ein Verfassungsorgan, also gelten schon zwei Betriebsverbote gleichzeitig. Darüber hinaus sind in Hamburg 100 Konsulate ansässig, von denen auch ein Mindestabstand von 100 m gehalten werden muss. Auch ist Hamburg, wie jede größere Stadt, durchzogen von Bahnanlagen, Bundesfernstraßen und Bundeswasserstraßen. Viele Dinge also, die es zu berücksichtigen gibt.

## 7 Hilfe und Unterstützung

Es gibt inzwischen einige recht gute Apps, die dem Steuerer einen Teil der aufwendigen Recherchearbeit abnehmen. Ein Blick aufs Smartphone genügt oft, um zu sehen, ob an einem Ort Besonderheiten zu beachten sind, ob eine Erlaubnis erforderlich ist oder eine Ausnahmegenehmigung beantragt werden muss. Leider sind die Regelungen sehr speziell und ein vollständiger Datenstand ist praktisch nicht möglich und so entbindet eine solche App natürlich den Steuerer nicht von der Pflicht zu einer gewissenhaften Vorbereitung.

Die **Landesluftfahrtbehörden** unterstützen gern bei allen Fragen rund um Aufstiege von UAS. Auf deren Homepages finden Sie die meisten relevanten Informationen, Kontaktdata sowie regionale Sonderregelungen.

### Kontakt

Carsten Brandt  
Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation  
Referat Luftverkehr – Luftaufsicht  
Alter Steinweg 4, 20459 Hamburg  
[carsten.brandt@bwvi.hamburg.de](mailto:carsten.brandt@bwvi.hamburg.de)

# Bildbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion – Möglichkeiten und Grenzen

Thomas Luhmann

## 1 Einleitung

Seit mehr als drei Jahrzehnten wird in der Photogrammetrie intensiv an der Erforschung und Entwicklung von bildbasierten Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Oberflächen gearbeitet. Lange bestand das Hauptaugenmerk auf der Erfassung digitaler Geländemodelle aus Luftbildern, z.B. mittels analytischer Stereoplottter, bei denen Bildausschnitte analoger Bilder durch Digitalkameras erfasst wurden und anschließend eine Stereokorrelation auf Basis von Epipolarbedingungen oder Vertical Line Locus vorgenommen wurde. Parallel entstanden erste Entwicklungen für die Messung industrieller Oberflächen, z.B. Zeiss Indusurf.

In der Folgezeit gerieten photogrammetrische Verfahren zunehmend in den Hintergrund, da sowohl produktionsreife flugzeuggetragene als auch terrestrische Laserscanningsysteme verfügbar wurden und durch die direkte Erfassung von Punktwolken zahlreiche Vorteile gegenüber bildbasierten Methoden aufwiesen (z.B. Ackermann 1999, Niemeier et al. 2002).

Entwicklungen aus dem Computer-Vision-Bereich, ständig steigende Rechenleistung von Prozessoren und Computern sowie eine dramatische Entwicklung preiswerter und leistungsfähiger digitaler Bildsensoren und Kameras haben seit ca. zehn Jahren erhebliche Fortschritte in der 3D-Bildauswertung mit sich gebracht und zahlreiche neue Anwendungsgebiete erschlossen. Heute stehen Methoden und Systeme zur Verfügung, welche die vollautomatische Orientierung praktisch beliebiger Bildverbände gestatten (Structure-from-motion), dichte Punktwolken erzeugen und ggf. Echtzeitauswertungen erlauben, z.B. für industrielle Prozesssteuerungen, Robotik oder Fahrerassistenzsysteme. Punktwolken stellen die Grundlage für 3D-Modellierungen, Karten und Pläne oder Orthophotos dar.

Mit professionellen Softwarelösungen wie Pix4Dmapper (Pix4D), PhotoScan (Agisoft) oder RealityCapture (Capturing Reality) sowie zahlreichen Open-Source-Lösungen ist es möglich geworden, dass photogrammetrische Verfahren nunmehr von jedermann eingesetzt werden können, z.B. für UAS-Anwendungen, mobile Plattformen, Lowcost-Systeme usw. (Kersten 2016). Praktisch alle Anwendungsgebiete, in denen digitale Bilddaten erzeugt werden können,

sind für solche Verfahren zugänglich und haben dazu geführt, dass bildbasierte photogrammetrische Verfahren einen enormen Aufschwung erleben, deren Weiterentwicklung derzeit kaum absehbar ist. Weitere Übersichten finden sich z. B. in Remondino et al. (2012) und Luhmann (2018).

## 2 Kamerakalibrierung

Typischerweise werden in den meisten praktischen Anwendungen heute Digitalkameras eingesetzt, die nicht speziell für die photogrammetrische Messtechnik konstruiert sind. Sie müssen daher fortlaufend kalibriert werden, da nicht von einer Langzeitstabilität der mechanischen und optischen Komponenten ausgegangen werden kann, wie es bei Spezialkameras für die Luftbildauswertung oder hochgenaue industrielle und medizinische Anwendungen der Fall ist.

Aufgabe der Kamerakalibrierung ist die Ermittlung der Parameter der inneren Orientierung (intrinsische Parameter) mit einer Qualität, die adäquat zur nachfolgenden Anwendung ist. Hierzu zählt die Genauigkeit der Parameter eines mathematischen Kameramodells aus einer analytischen Berechnung (i. d. R. Bündelausgleichung), die Gültigkeit dieser Parameter bis und für den Zeitraum der Bilderfassung sowie die numerische Unabhängigkeit der Parameter zu anderen Größen, insbesondere zu den Parametern der äußeren Orientierung. Da in der Photogrammetrie die erreichbare Messgenauigkeit im Objektraum immer vom aktuellen Bildmaßstab abhängt, sind im Bildraum extrem kleine Messunsicherheiten anzustreben. Diese liegen typischerweise im Bereich von  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{1}{50}$  Pixel bzw. von 1 bis 2  $\mu\text{m}$  bis zu 0,3  $\mu\text{m}$ . Prinzipiell muss die Güte einer digitalen Bildauswertung (Messung von Zielmarken oder Merkmalen) einhergehen mit der geometrischen Stabilität von Kamera, Objektiv und Bildsensor, d. h. an das Aufnahmesystem werden extrem hohe geometrische Ansprüche unterhalb der Mikrometergrenze gestellt. Diese Forderung ist nur durch hochwertige Kameras, geeignete Aufnahmekonfigurationen für die Kamerakalibrierung, korrekte mathematische Modellierung der optischen Abbildung und Anwenderwissen über den richtigen Einsatz zu gewährleisten.

Modelliert werden im Standardfall die räumliche Lage des Projektionszentrums im Kamerakoordinatensystem (Kamerakonstante, Lage des Bildhauptpunkts) sowie die Parameter von bildfehlerbeschreibenden Funktionen (radialsymmetrische Verzeichnung, tangentiale und asymmetrische Verzeichnung, Affinität und Scherung des Bildsensors). Kameras, die mit diesem Ansatz nicht hinreichend beschrieben werden können (z. B. Fisheye-Kameras, Unterwasserkameras, Kameras mit Umlenkspiegeln, nicht ebene Bildsensoren, Rolling Shutter), benötigen eine aufwändigere Modellierung, z. B. über lokale Korrekturgitter, bildvariante Kalibrierung oder Polynome höherer Ordnung (Fourier-Reihen,

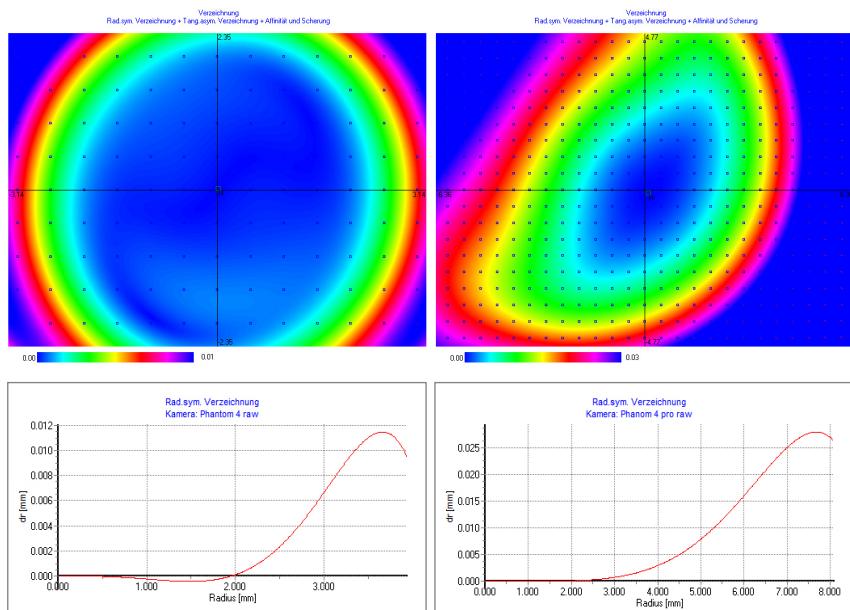


Abb. 1: Ergebnisse einer Kamerakalibrierung

Lagrange-Polynome). Ausführliche Darstellungen zur Kamerakalibrierung finden sich in Luhmann (2018).

Abb. 1 zeigt das Ergebnis einer kalibrierten Objektivverzeichnung für zwei verschiedene UAS-Kameras (Daten von M. Cramer, ifp, Universität Stuttgart). Dabei sind signifikante radial-symmetrische, aber auch asymmetrische Effekte erkennbar. Abb. 2 stellt die Veränderung von Kamerakonstante und Bildhauptpunkt während einer handgehaltenen Aufnahmeserie mit einer Spiegelreflexkamera dar, die durch bildvariante Kalibrierung ermittelt worden ist.

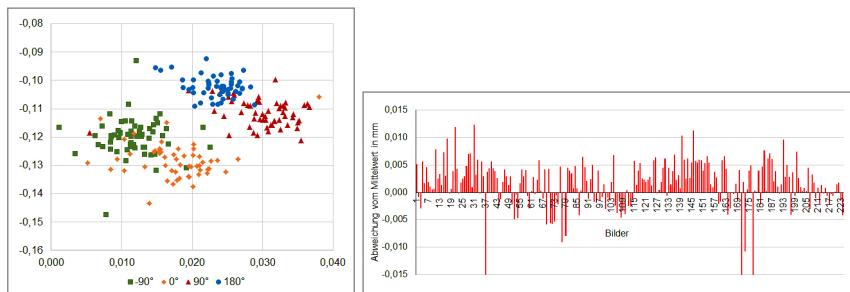


Abb. 2: Veränderung von Bildhauptpunkt (links) und Kamerakonstante während einer Aufnahmeserie

Die Berechnung der Kalibrierparameter erfolgt, mit wenigen Ausnahmen (erweiterter räumlicher Rückwärtsschnitt, DLT), durch photogrammetrische Bündelausgleichung mit zusätzlichen Parametern (Simultankalibrierung). Dabei werden gleichzeitig die innere Orientierung der verwendeten Kamera(s), die äußere Orientierung aller aufgenommenen Bilder sowie die 3D-Koordinaten aller gemessenen Bildpunkte bestimmt, d. h. innere und äußeren Orientierung sowie die Objektoberfläche sind miteinander korreliert. Dies ist in der Regel so lange unkritisch, wie die aus der Bündelausgleichung berechneten Objektkoordinaten das Endergebnis einer Auswertung darstellen. Wenn jedoch die Parameter der Kamera getrennt voneinander in einen weiteren Rechenprozess eingehen (z. B. die vorab kalibrierte innere Orientierung für eine spätere UAS-Befliegung), werden Korrelationen vernachlässigt und damit ggf. verfälschte Messergebnisse erzielt.

Bei den Aufnahmeanordnungen zur Kamerakalibrierung ist auf ausreichende Objekttiefe zu achten, da ansonsten die Kamerakonstante nicht signifikant bestimmbar ist. Aus diesem Grund ist für weitgehend senkrechte Aufnahmen über ebener Objektfläche eine stabile, vorab sicher kalibrierbare Kamera zu bevorzugen, wie es in klassischen Luftbildanwendungen üblich ist. Generell ergeben Kalibrierungen über dreidimensionale Testfelder genauere und zuverlässigere Kalibrierparameter, die weitgehend entkoppelt zu den Parametern der äußeren Orientierung sind. Für die Kalibrierung von Luftbildkameras bieten Kreuzbefliegungen zusätzlich nutzbare Informationen, für UAS-Befliegungen sind Aufnahmen aus unterschiedlichen Flughöhen vorteilhaft für die Kamerakalibrierung.

Restfehler der inneren Orientierung wirken sich negativ auf die Objektrekonstruktion aus. So bewirkt eine fehlerhafte Kamerakonstante einen Maßstabsfehler im Objektraum, besonders in Aufnahmerichtung. Ungenau bestimmte Verzeichnungspараметre führen zu einer systematischen Verbiegung des Objektraums, z. B. „durchhängenden“ digitalen Oberflächenmodellen. Diese systematischen Fehler können häufig am Ergebnis einer Bündelausgleichung nicht abgelesen werden und sind nur aufdeckbar, wenn im Objektraum hinreichend viele unabhängige Referenzdaten zur Verfügung stehen.

### 3 Bildorientierung

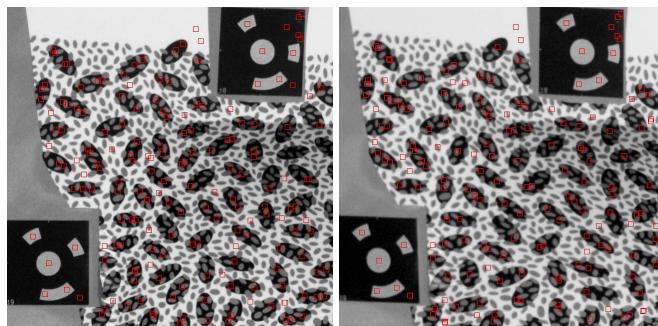
Die Orientierung aller beteiligten Bilder geschieht durch Bündelausgleichung. Sie beruht auf den nicht linearen Kollinearitätsgleichungen, die im Rahmen der Ausgleichung an Näherungswerten der Unbekannten linearisiert werden (Kraus 2004, Luhmann 2018). Die Bestimmung hinreichend guter Näherungswerte, insbesondere für die äußeren Orientierungen, ist daher eine essenzielle

Aufgabe. Für Anwendungen, in denen regelmäßige Bildanordnungen vorliegen (z. B. klassischer Bildflug), können die Näherungswerte aus Planungs- oder Navigationsdaten abgeleitet werden. Für beliebig gestaltete Bildverbände, wie sie in der Nahbereichsphotogrammetrie häufig vorkommen, muss der Prozess der Näherungswertbeschaffung durch geeignete Strategien von nacheinander ausgeführten relativen Orientierung, Rückwärtsschnitten und 3D-Transformaionen durchgeführt werden.

Eine seit einigen Jahren verfügbare Strategie ist mit dem Verfahren Structure-from-Motion (SfM) gegeben. Die wesentlichen Schritte bestehen dabei aus:

- Automatische Erkennung von Bildmerkmalen, die sich für die anschließende Bildzuordnung (Matching) eignen.
- Zuordnung der Merkmale über Abstandsminimierung hochdimensionaler Merkmalsvektoren (z. B. SIFT).
- RANSAC-basierte relative Orientierung benachbarter Bilder und sukzessive Bildung eines Gesamtmodells mit Eliminierung von Ausreißern.
- Bündelausgleichung zur Ermittlung der endgültigen Parameter der inneren und äußereren Orientierung sowie der 3D-Koordinaten der gemessenen Merkmalspunkte (dünne Punktwolke).

Der SIFT-Operator (Lowe 2004) ist eine der am weitesten verbreiteten Methoden zur Merkmalserkennung. Er sucht Merkmale in einem pyramidenbasierten Verfahren, das im Wesentlichen die lokalen Gradientenverteilungen nach einer



**Abb. 3:**  
Beispielhaftes  
Ergebnis einer  
SIFT-Operation

Laplacian-of-Gaussian-Filterung ermittelt und daraus einen 128-dimensionalen Merkmalsvektor aufbaut. SIFT bestimmt Merkmale nicht dort, wo ein menschlicher Operator markante Punkte messen würde, sie liegen im Nachbarbild jedoch an einer ähnlichen Position (siehe Abb. 3). Die geometrische Genauigkeit der Merkmalsfindung liegt bei 0,5 bis 1 Pixel.

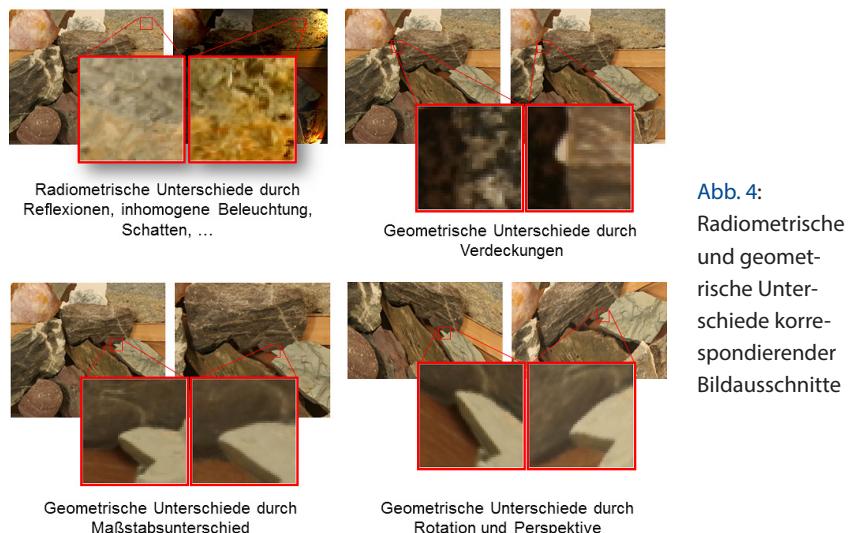
SfM setzt hinreichend texturierte Objektoberflächen und relativ kleine Basisabstände zwischen benachbarten Bildern voraus, d. h. es ist bei der Bildauf-

nahme auf hohe gegenseitige Überlappung zu achten. Die Datumsdefinition erfolgt entweder über Passpunkte, die in die Bündelausgleichung integriert sind, oder eine nachfolgende räumliche Ähnlichkeitstransformation. Umfangreiche Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von SfM finden sich in Remondino et al. (2012).

Die Nutzung von UAS für die photogrammetrische Oberflächenerfassung hat sich dank SfM erheblich verbreitet und führt i. d. R. verlässlich zu dichten Oberflächenbeschreibungen. Unklar bleibt häufig, welche software-internen Prozesse tatsächlich ablaufen und welche mathematischen Ansätze zur Kamerakalibrierung, Datumsfestlegung und stochastischen Analyse implementiert sind. Typischerweise lassen sich Lagegenauigkeiten von ca. 1 Pixel (GSD) und Höhengenauigkeit von 2 bis 3 Pixel erreichen. Weitere Angaben zur Genauigkeit werden in [Kap. 5](#) diskutiert.

## 4 Oberflächenrekonstruktion

Wenn die in [Kap. 3](#) dargestellte dünne Punktwolke nicht ausreicht, um die Objektoberfläche hinreichend zu beschreiben, erfolgt üblicherweise eine dichte Bildzuordnung, bei der im Idealfall jedes Pixel der beteiligten Bilder einen 3D-Wert erhält, das Objekt also geschlossen in der Ortsauflösung (ground sampling distance GSD) durch eine dichte Punktwolke beschrieben wird. Das Matching muss dabei möglichst unabhängig von geometrischen und radio-



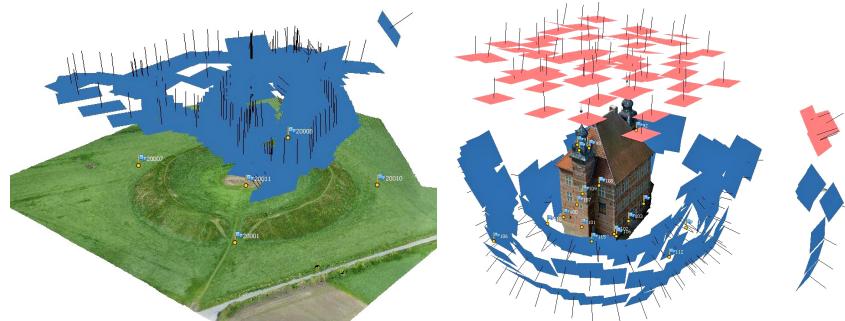
**Abb. 4:**  
Radiometrische  
und geomet-  
rische Unter-  
schiede korre-  
spondierender  
Bildausschnitte

metrischen Unterschieden zwischen den Bildern sein. Abb. 4 stellt einige der auftretenden Abweichungen zwischen Bildern zusammen.

Das derzeit populärste Verfahren zur dichten Bildzuordnung ist das semi-globale Matching (SGM, Hirschmüller 2005). SGM berechnet für jedes Pixel eines Ausgangsbildes den korrespondierenden Bildpunkt auf der Epipolarlinie eines Stereopartners durch Minimierung einer Kostenfunktion, in der die Ähnlichkeit der beiden Bildausschnitte positiv (Kostenreduktion) und die Überschreitung der berechneten Parallaxe (Disparität) gegenüber Grenzwerten negativ (Kostensteigerung) bewertet wird. Dazu wird ein Suchraum aufgebaut, in dem die Suche nach korrespondierenden Bildpunkten entlang bestimmter Pfade erfolgt, in denen dann die Disparitäten gespeichert und bewertet werden. Die Vorteile von SGM liegen in:

- sehr weit verbreiteter Dense-Matching-Ansatz,
- gute Ergebnisse auch in schlecht oder schwach texturierten Bereichen (Glättung),
- gute Modellierung von Diskontinuitäten/abrupten Höhenänderungen,
- Auflösung feiner/hochfrequenter Objektstrukturen durch Verwendung pixelbasierter Kostenfunktionen/kleinen Matching-Fenstern,
- ein Tiefenwert für jedes Bildpixel.

SGM ist der Kernelalgorithmus im weit verbreiteten Programmsystem SURE und in zahlreichen SfM-Programmen, aber auch in offenen Softwarebibliotheken



a) Ringwallanlage Lembecksburg

b) Torhaus Seedorf

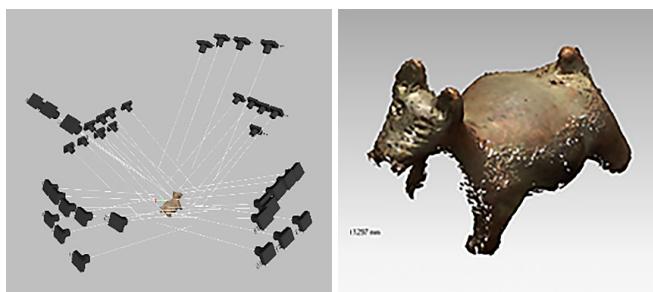
Abb. 5: Oberflächenrekonstruktionen aus UAS-Bildverbänden mit SfM

wie OpenCV. Wenn mehr als zwei Bilder vorliegen, wird i. d. R. der Ansatz des Multi-View Stereo (MVS) genutzt, bei dem paarweise Stereoauswertungen mit anschließender Fusion der einzelnen Punktwolken berechnet werden.

Abb. 5 zeigt Beispiele von Objektrekonstruktionen aus UAS-Bildflügen, die mithilfe von SfM und SGM (Agisoft PhotoScan) berechnet worden sind. Abb. 5a

stellt die Auswertung der Vermessung einer historischen Ringwallanlage dar, bei der Abweichungen an Passpunkten von 6 mm in XY und 2 mm in Z resultieren, im Vergleich zu am Boden gemessenen Tachymeterpunkten jedoch Höhenabweichungen von bis zu 40 cm auftreten, da die photogrammetrische Auswertung die Oberfläche von Bewuchs erfasst (Kersten et al. 2016). Abb. 5b zeigt das Beispiel einer kombinierten Auswertung mit terrestrischen Aufnahmen (blau) und Bildern eines UAS-Flugs (rot) zur allseitigen Erfassung eines Bauwerks (Kersten 2016). Die mittlere Verbesserung an Passpunkten liegt bei 1,2 cm.

Ein gegenüber SGM erweitertes Verfahren ist das objektraumbasierte semi-globalen Mehrbild-Matching OSGM (Bethmann und Luhmann 2017). Im OSGM wird die Kostenfunktion im Objektraum formuliert, der dazu als Voxelraum organisiert wird. Die Kostenberechnung schließt wiederum Ähnlichkeitsmaße und Strafterme ein, erlaubt jedoch die Einbeziehung sämtlicher Bilder simultan, also echtes Mehrbild-Matching (Beispiele in Abb. 6 und Abb. 7). Darüber hinaus entsteht unmittelbar ein 3D-Volumenmodell sowie daraus abgeleitete True-Orthophotos. Die Auflösung des Voxelraums (Größe der Voxel) kann weitgehend beliebig festgelegt werden, z. B. in der Größe des GSD der Bilder oder abhängig von der Oberflächenkrümmung.



a) Aufnahmekonfiguration 1      b) Berechnete Punktwolke

**Abb. 6:**  
Ergebnis einer dichten Punktzuordnung mit objektbasiertem SGM



a) Schattierte Punktwolke      b) Detailausschnitt aus a)

**Abb. 7:**  
Kombinierte Oberflächenrekonstruktion aus Nadir- und Schrägluftbildern mit OSGM

Für die verfeinerte Bildzuordnung eignet sich die Kleinste-Quadrat-Zuordnung, bei der die Transformation zweier Bildausschnitte aufeinander durch eine radiometrische und eine geometrische Transformation im Rahmen einer Ausgleichsrechnung erfolgt. Damit sind Zuordnungsgenauigkeiten von bis  $\frac{1}{10}$  Pixel erreichbar.

## 5 Genauigkeitsbetrachtungen

Da Photogrammetrie ein komplexer Aufnahme- und Auswerteprozess ist, hängt die erreichbare Genauigkeit der Objektrekonstruktion von zahlreichen ineinander greifenden Einflussgrößen ab, die an dieser Stelle nicht vollständig beschrieben werden können. Die wesentlichen Einflussgruppen können aber wie folgt zusammengefasst werden:

- Aufnahmesystem,
- Aufnahmekonfiguration und Bildmaßstab,
- Objektbeschaffenheit,
- Bildauswertung,
- Datums- und Maßstabsfestlegung.

Nach Fraser (1996) kann folgende Gleichung zur Abschätzung der Genauigkeit im Objektraum  $S_{XYZ}$  herangezogen werden:

$$S_{XYZ} = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot m \cdot s_{x'y'}. \quad (1)$$

Die Bildmessgenauigkeit  $s_{x'y'}$  beschreibt die Unsicherheit einer Bildpunktmesung. Sie reicht von ca.  $\frac{1}{20}$  Pixel für signalisierte Punkte bis zu ca. 1 bis 2 Pixel für natürliche Merkmale, die mittels Interest-Operator (z.B. SIFT) bestimmt worden sind. Die Bildmaßstabszahl  $m$  als Quotient von Aufnahmedistanz zu Kamerakonstante (Brennweite) überträgt die Bildmessgenauigkeit in den Objektraum. Der sog. Design-Faktor  $q$  beschreibt den Einfluss der Aufnahmekonfiguration sowie anderer äußerer Umstände und kann Werte zwischen 0,4 und 0,7 (Mehrbildkonfiguration mit guten Schnittbedingungen) annehmen, so dass bei hinreichender Redundanz in allen Koordinatenrichtungen ähnliche Messgenauigkeiten erreichbar sind, die mit  $q < 1$  die maßstabsbedingte Grenze sogar unterschreiten. Für Stereoauswertungen unterscheidet sich die erreichbare Genauigkeit in Z von der Lagegenauigkeit in XY, da in diesem Fall  $q = h/b$  als Wert für das Höhen-Basis-Verhältnis eingesetzt werden muss. Der Faktor  $k$  beschreibt die Anzahl der Bilder, die von einem Standpunkt aufgenommen wurden. Er kann ungefähr gleichgesetzt werden mit der Anzahl der Stereobildpaare, die beim

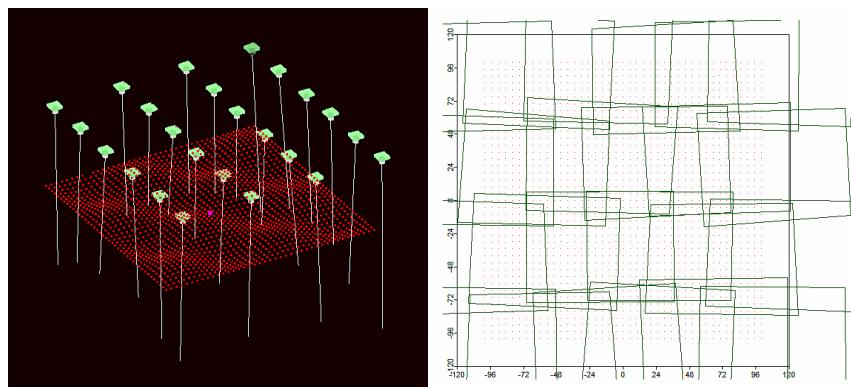
**Tab. 1:** Abschätzung erreichbarer Objektgenauigkeiten

Beispiel UAV-Bündelausgleichung	Beispiel UAV-Stereoauswertung
$h = 80 \text{ m}$	$h = 80 \text{ m}$
$b = 40 \text{ m}$	$b = 40 \text{ m}$
$q = 2$	$q = h/b = 2$
$k = 4$	$k = 1$
$c = 10 \text{ mm}$	$c = 10 \text{ mm}$
$m = h/c = 8.000$	$m = h/c = 8.000$
GSD = 20 mm	GSD = 20 mm
$s_{xy} = 2,6 \mu\text{m}$	$s_{xy} = 2,6 \mu\text{m}$
$s_{XY} = 10 \text{ mm}$	$s_{XY} = 21 \text{ mm}$
$s_z = 10 \text{ mm}$	$s_z = 41 \text{ mm}$

Multi-View Stereo für eine fusionierte Punktwolke zur Verfügung stehen (siehe unten).

Das Zahlenbeispiel (Tab. 1) verdeutlicht den Unterschied zwischen einer Mehrbildauswertung mit Bündelausgleichung und einer Stereoauswertung für die Erzeugung einer dichten Punktwolke. Es wird dazu ein beispielhafter UAS-Flug aus 80 m Flughöhe und 60 % gegenseitiger Überlappung angenommen.

Das Beispiel macht deutlich, dass im Rahmen der Bündelausgleichung in allen Koordinatenrichtungen gleiche Genauigkeiten erreichbar sind, wenn wie in diesem Beispiel mit  $k = 4$  Bildern pro Objektpunkt gerechnet wird. Dagegen zeigt die einfache Stereoauswertung den typischen Genauigkeitsverlust in Z-Richtung von ca. Faktor 2. Ergänzend kommt hinzu, dass die inneren und äußeren Orientierungen in der Bündelausgleichung mitbestimmt werden, während sie bei der Stereoauswertung als vorab gegeben betrachtet werden.

**Abb. 8:** Aufnahmekonfiguration (1) mit  $p = 60 \%$  und  $q = 20 \%$

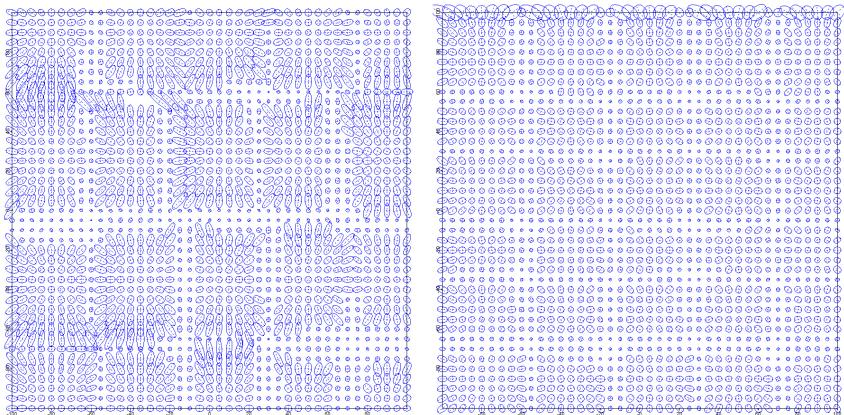
**Tab. 2:** Simulierte Aufnahmekonfigurationen

Konfiguration	1: 60-20	2: 60-60	3: 90-90
$p$	60 %	60 %	90 %
$q$	20 %	60 %	90 %
Bilder	24	42	520
Bilder pro Punkt	2,4	4,7	65,5
RMS XY (Max)	0,015 m (0,027)	0,010 m (0,020)	0,003 m (0,006)
RMS Z (Max)	0,043 m (0,060)	0,026 m (0,053)	0,006 m (0,018)

In einer Monte-Carlo-Simulation wird untersucht, welchen Einfluss die gewählte Längsüberdeckung  $p$  und Querüberdeckung  $q$  auf die Genauigkeit von Objektpunkten hat, deren Koordinaten durch räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmt werden. Dazu wird unter den o.g. Aufnahmeparametern ein Feld von  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  Ausdehnung mit Höhenunterschieden von  $10 \text{ m}$  beobachtet (Abb. 8). Die Kameraparameter bleiben dabei konstant, d.h. es wird nur die Auswirkung von zufälligem Rauschen der Bildkoordinaten auf die 3D-Koordinaten analysiert. Ausgewertet werden die erreichten Standardabweichungen in X, Y und Z, die räumliche Lage der Konfidenzellipsoide sowie der Effekt der gegenseitigen Überdeckung, die zu unterschiedlich vielen Bildern pro Punkt führt. Hier wird wiederum angenommen, dass dies dem Resultat der Punktwolkenfusion in MVS entspricht.

Tab. 2 zeigt drei exemplarische Aufnahmeszenarien, wie sie für UAS-Flüge auftreten könnten. Konfiguration (3) stellt dabei ein Extrembeispiel mit 90 % Überdeckung in jeder Richtung dar, das theoretisch zu einer sehr hohen Anzahl Bilder pro Objektpunkt führt. Die jeweils erreichten Standardabweichungen (RMS 1-Sigma) liegen im erwarteten Bereich von ca.  $\frac{1}{2}$  GSD in der Lage und 1 bis 2 GSD in der Höhe für die Konfigurationen (1) und (2). Die erhöhte Querüberdeckung in (2) bringt erwartungsgemäß vor allem einen Gewinn in der Höhengenauigkeit. Abb. 9 zeigt die resultierenden Konfidenzellipsoide (überhöhte Darstellung), die sich über eine Eigenwertanalyse der Kovarianzmatrizen aus dem räumlichen Vorwärtsschnitt ableiten lassen.

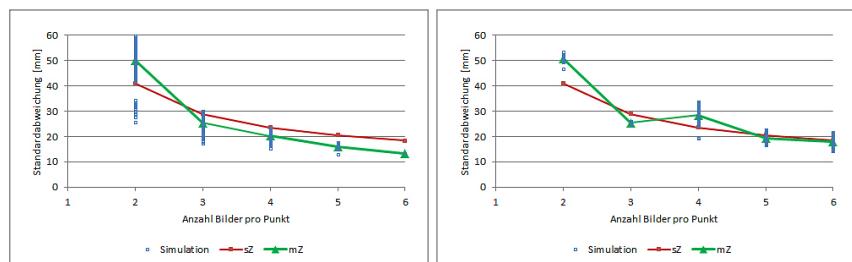
Abb. 10 stellt die Standardabweichungen für die Z-Koordinaten der Objektpunkte und der Anzahl der Bilder pro Punkt dar, wie sie aus der Simulation (blaue Punkte), den daraus berechneten Mittelwerten (grüne Linie,  $m_Z$ ) und nach Gleichung (1) (rote Linie,  $s_Z$ ) abgeleitet werden. Dabei fällt zum einen auf, dass die theoretische Genauigkeitsabschätzung mit der empirischen (simulierten) Abschätzung weitgehend übereinstimmt. Zum anderen ist erkennbar, dass für beide Konfigurationen praktisch gleiche Kurvenverläufe resultieren, d.h. die



Konfiguration 1 (60-20)

Konfiguration 2 (60-60)

Abb. 9: Fehlerellipsoide nach Monte-Carlo-Simulation (nur XY)



Konfiguration 1 (60-20)

Konfiguration 2 (60-60)

Abb. 10: Zusammenhang zwischen Bildanzahl pro Punkt und erreichbaren Genauigkeiten

in Tab. 2 gezeigten Genauigkeitsunterschiede zwischen den Konfigurationen sind in erster Linie durch die höhere Anzahl von Objektpunkten zu erklären, die in nur zwei oder drei Aufnahmen gemessen werden können.

Insgesamt zeigen die Simulationen ein realistisches Bild der erreichbaren Messqualität unter den vorgegebenen Eingangsparametern. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass der Einfluss der Kamerakalibrierung und Bildorientierung nicht berücksichtigt wird. Dies ist insbesondere bei luftbildartigen Aufnahmekonfigurationen problematisch, bei denen es zu hohen Korrelationen zwischen innerer und äußerer Orientierung und systematischen Abweichungen im Objektraum kommen kann (siehe Kap. 2).

## 6 Zusammenfassung

Der Beitrag stellt einige wichtige Aspekte der automatischen photogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion zusammen. Für ausführliche Darstellungen sei auf Luhmann (2018) und die dort aufgelistete weiterführende Literatur verwiesen.

Moderne photogrammetrische Verfahren wie Structure-from-Motion erlauben die vollautomatische Orientierung praktisch beliebiger Bildverbände bei gleichzeitiger Kalibrierung der verwendeten Kamera. Durch die hohe Verbreitung entsprechender Softwarelösungen und wenig dokumentierte Algorithmik bleibt häufig offen, welche messtechnische Qualität mit diesen Ansätzen erreichbar ist. Vielen Anwendern ist darüber hinaus nicht bewusst, welchen Einfluss die Aufnahmesituation auf die Güte der Kamerakalibrierung hat und welche Wirkung die Kalibrierung wiederum auf das Endergebnis hat. Hier versucht dieser Beitrag, einige der wichtigen Aspekte dazu zusammenzufassen und den Leser zu sensibilisieren, den Bildverband geeignet zu planen und dabei eine hochwertige und stabile Kamera einzusetzen. Dies ist insbesondere bei UAS-Anwendungen wichtig, da hier nicht immer mit den aus der hochgenauen Industriephotogrammetrie üblichen Grundsätzen gearbeitet werden kann.

Grundsätzlich verhält sich die photogrammetrische Objektgenauigkeit auch bei den neuen Verfahren wie seit Jahrzehnten bereits bekannt. Wesentliche Einflussgrößen wie Bildmaßstab, Bildmess- und Matching-Genaugkeit und Konfigurationen von Strahlenschnitten (z. B. Höhen-Basis-Verhältnis) sind nach wie vor gültig. Galt früher das Prinzip, mit so wenig Aufnahmen wie möglich ein adäquates photogrammetrisches Ergebnis erzielen zu wollen, so sind heute keine Grenzen bezüglich der Anzahl der verwendeten Bilder gesetzt. Dies führt zum einen zu einer höheren Sicherheit der Punktbestimmung, ergibt aber auch leicht zu optimistische Angaben, da berechnete Standardabweichungen und RMS-Werte von der Redundanz abhängen. Als Faustformel kann gelten, dass in der Lage (XY) etwa 1 GSD und in der Höhe (Z) etwa 2 bis 3 GSD für die mittlere Standardabweichung (1 Sigma) von Objektkoordinaten erreichbar ist. Je nach Beschaffenheit der Oberflächentextur und der verfügbaren Bilder treten jedoch auch häufig Messfehler auf, die um den Faktor 2 bis 3 größer ausfallen können.

## Literatur

- Ackermann, F. (1999): Airborne Laser Scanning – Present Status and Future Expectations. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2), S. 64–67.
- Bethmann, F.; Luhmann, T. (2017): Object-based semi-global multi-image matching. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Heft 6, 2017.
- Fraser, C. (1996): Network design. In: Atkinson (ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, Caithness, UK, S. 256–281.

- Hirschmüller, H. (2005): Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In: Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, S. 807–814.
- 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, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 135–158.
- Kersten, T.; Lindstaedt, M.; Mechelke, K.; Omelanowsky, D.; Prenting, J. (2016): Low-Cost vs. High-End Systeme im Vergleich – 3D-Aufnahme der Ringwallanlage Lembecksburg auf der Nordseeinsel Föhr. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der 15. Oldenburger 3D-Tage, Wichmann, Offenbach/Berlin, S. 150–161.
- Kraus, K. (2004): Photogrammetrie. Band 1: Geometrische Informationen aus Photogrammetrischen und Laserscanneraufnahmen. W. de Gruyter Verlag, Berlin, 516 S.
- Lowe, D.G. (2004): Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: International Journal of Computer Vision, 60(2), S. 91–110.
- Luhmann, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Beispiele. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann, VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach, 783 S.
- Niemeier, W.; Thomsen, S.; Schäfer, M. (2002): 3-D-Geometrieerfassung mit terrestrischen Laserscannern. In: Luhmann (Hrsg.): Photogrammetrie und Laserscanning – Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management. Wichmann, Heidelberg, S. 15–26.
- Remondino, F.; Del Pizzo, S.; Kersten, T.; Troisi, S. (2012): Low-cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – a Critical Overview. In: Ioannides et al. (Hrsg.): EuroMed 2012 – Int. Conference on Cultural Heritage, Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Volume 7616, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, S. 40–54.

## Kontakt

Thomas Luhmann

Jade Hochschule

Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik

Ofener Straße 16, 26121 Oldenburg

[thomas.luhmann@jade-hs.de](mailto:thomas.luhmann@jade-hs.de)

## **Session 2: Kameras, Testfeld und Aerotriangulation**



# UAV-Kameras – Bewertung von Kalibrierung, Langzeitstabilität und optischem Auflösungsvermögen

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

## 1 Einführung

Während der letzten Jahre hat sich die Luftbildaufnahme mit unbemannten Trägern (UAV) zu einer etablierten Methode für die 3D-Objektpunkt-Rekonstruktion entwickelt. Der Einsatz dieser Systeme hat Vorteile hinsichtlich Flexibilität und Verfügbarkeit besonders für die großmaßstäbige Kartierung räumlich begrenzter Gebiete. Darüber hinaus wird die UAV-Technologie vermehrt in klassischen ingenieurtechnischen Vermessungsszenarien verwendet und ersetzt in manchen Fällen die punktbasierte Objektvermessung mit Tachymetern. Anspruchsvolle ingenieurgeodätische Aufgaben, wie z. B. Inspektion und Überwachung, erfordern eine hohe Bodenauflösung und entsprechende Genauigkeit oftmals im Subzentimeterbereich.

Neben der korrekten Bildgeometrie und den angewandten Verarbeitungsschritten ist die Wahl des Kamerasystems von großer Bedeutung. Die Kamera als bildgebendes System ist der primäre Sensor und liefert die Daten aus denen die späteren Produkte (3D-Objektpunkte und/oder Punktwolken) abgeleitet werden. Die Qualität der Bildpunktmeßung beeinflusst direkt die Qualität der Datenprodukte. Aus diesem Grund ist die Kamerageometrie und die zugehörige Kalibrierung ein wichtiger Aspekt, der berücksichtigt werden muss (Cramer et al. 2017a). Neben der geometrischen Kalibrierung sollten radiometrische Eigenschaften nicht unbeachtet bleiben, da sie die Qualität von Systemen und deren (effektiver) optischen Auflösung mitbestimmen. Die automatische Detektion von Verknüpfungspunkten für den photogrammetrischen Bündelblockausgleich ist ein weiterer Schritt in der Verarbeitungskette. Das zugrundeliegende Bild-Matching für die Merkmalsextraktion beeinflusst die erreichbare geometrische Genauigkeit, da es hauptsächlich auf den Grauwertinformationen eindeutiger Punkte bzw. Regionen beruht. Folglich ist die optische Abbildungsleistung eines Kamerasystems (neben Überlappung und Aufnahmegeradeometrie) maßgeblich für die Qualität des Matchings und gleichzeitig für die geometrische Stabilität des Blocks.

Die im UAV-Bereich verwendeten Aufnahmegeräte sind oftmals handelsübliche oder in Serie produzierte Kameras. Das Hauptaugenmerk liegt oftmals auf dem Gewicht und dem Potenzial der Integrierbarkeit in das Gesamtsystem. Sehr häufig haben photogrammetrische Aspekte (z. B. langzeitstabile innere Orientierung) eine geringe Priorität bei der Wahl der Komponenten. Die aktuell verfügbaren Kameras können in verschiedene Gruppen, abhängig von deren Spezifikationen/Systemdesign eingeteilt werden (z. B. Kompaktkameras, System- oder Bridge-Kameras, proprietäre Systeme, speziell angefertigt für UAV-Anwendungen). Typische Vertreter dieser Gruppen wurden empirisch hinsichtlich Langzeitstabilität der inneren Orientierung und des optischen Auflösungsvermögens untersucht. Die Ergebnisse werden hier in Form einer Benchmark-Übersicht gegeben.

Aus diesem Grund ist der Beitrag wie folgt aufgebaut: In [Kap. 2](#) werden die Kameras vorgestellt, die an der Untersuchung/Benchmark teilgenommen haben. Anschließend wird in [Kap. 3](#) das verwendete Verfahren zur Bestimmung der inneren Orientierung und Langzeitstabilität erläutert und die Ergebnisse diskutiert. [Kap. 4](#) behandelt ein Verfahren zur Bestimmung der effektiven optischen Auflösung und liefert die zugehörigen Ergebnisse.

## 2 Kameras für UAV-Anwendungen

Mittlerweile kommen verschiedenste Kamerasysteme in UAV-Anwendungen zum Einsatz, die sich bzgl. Sensorgröße, Trigger-Event-Kontrolle, Systemgewicht, Schnittstellenerreichbarkeit und Anschaffungskosten deutlich unterscheiden können. Diese Systeme werden oftmals gruppiert als a) proprietäre Systeme speziell für UAV-Einsätze entwickelt b) Groß- bzw. Mittelformatkameras c) Bridge- bzw. Systemkameras und d) Spiegelreflexkameras (Przybilla 2017). Dabei ist festzustellen, dass die, für die UAV-Photogrammetrie verwendbaren Kameras, in sehr kurzen Entwicklungszyklen zur Verfügung stehen. Die Aufnahmegeräte, die in diesem Beitrag verglichen werden, basieren jedoch auf Testreihen, die bereits im Jahr 2016 begonnen haben (vgl. [Abb. 1](#)). Die DP1 von Sigma wird in der Kategorie „Others/Andere“ geführt. Das ist dem Umstand geschuldet, dass diese Kamera einen Foveon-Sensor (Hubel et al. 2004) besitzt, der für jedes Pixel die zugehörigen Farbwerte in der Sensorpixeltiefe detektiert im Gegensatz zu Bayermuster-Kameras, die die entsprechenden Werte aus der direkten Nachbarschaft interpolieren (Cramer et al. 2017a).

Camera Class	Purpose built / Proprietary					Large Format	System / Bridge Cameras		DSLR	Other
	DJI Inspire 1 Pro 12mm lens	DJI Inspire 1 Pro 15mm lens	DJI Phantom 3 Advanced	MACS Micro 24mm lens	MACS Micro 50mm lens		PhaseOne IXU1000 55mm lens	Ricoh GXR Mount A12 21mm lens	Sony Alpha 7R 35mm lens	
Camera	Olympus M.Zuiko 12mm f2.0	DJI MFT ASPH 15mm f1.7	Integrated lens 3.6mm f2.8	Schneider Kreuznach Apo-Xenoplan	Leica APO Summicron 50/2.0	Redenstock 50mm f/5.6	Zeiss Biogon 21/2.8	Voigtländer Skopar 35/2.5	Canon EF 24 f/1.4L II USM	Integrated lens
MPx	16	16	12	12	16	100	12	36	52	4,7*
Approx. weight (incl. lens)	545 g	545 g	188 g	320 g	720 g	930 g	916 g	591 g	1626 g	277 g
Fixed aperture	4,0 f	4,0 f	2,8 f	4,0 f	2,8 f	4,0 f	7,1 f	5,6 f	5,6 f	5,6 f
Pixel pitch	3,75 µm	3,75 µm	1,55 µm	4,7 µm	7,4 µm	4,6 µm	5,5 µm	4,87 µm	4,14 µm	7,8 µm
Focal length	12 mm	15 mm	3,61 mm	24 mm	50 mm	50 mm	21 mm	35 mm	24 mm	16,6 mm
Pixel count in X	4608 px	4608 px	4072 px	4000 px	4864 px	11608 px	4288 px	7360 px	8688 px	2640 px
Pixel count in Y	3456 px	3456 px	3044 px	3000 px	3232 px	8708 px	2848 px	4912 px	5792 px	1760 px
FOV diagonal	84,0 °	71,5 °	95,0 °	52,2 °	46,7 °	67,4 °	68,0 °	67,2 °	84,0 °	73,4 °
FOV in X	71,5 °	59,9 °	82,3 °	42,8 °	39,6 °	56,2 °	58,6 °	57,9 °	73,7 °	63,6 °
FOV in Y	56,7 °	46,7 °	66,3 °	32,7 °	26,9 °	43,7 °	40,9 °	40,5 °	53,1 °	44,9 °
Image Acquisition Parameter										
Distance	16,0 m	20,0 m	11,7 m	25,6 m	33,8 m	54,2 m	19,1 m	36,0 m	29,0 m	10,7 m
Native ground resolution (image center)	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm

Abb. 1: Spezifikationen der verglichenen Kameras für UAV-Anwendungen

### 3 Langzeitstabilität der inneren Orientierung

In mehreren Tagungsbeiträgen (u.a. Cramer et al. 2017b) wurde darauf hingewiesen, dass sich die klassische Photogrammetrie auf die exakte 3D-Objektmodellierung, die geometrische Kalibrierung und deren Langzeitstabilität fokussiert. Diese Stabilität soll in diesem Abschnitt für die vorgestellten Kameras aus Kap. 2 untersucht und diskutiert werden.

#### 3.1 Durchgeführte Kalibriermethode

Kalibrierungen mittels Testfeld bieten die Möglichkeit das geometrische Verhalten eines Kamerasytems über einen längeren Zeitraum oder unter variablen Betriebsbedingungen zu prüfen. Das hier genutzte 3-dimensionale 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 Zielmarken. Die Bilderfassung bei der Kalibrierung erfolgt über einen höhengestaffelten „Halbrundverband“. Um eine Bestimmung der Hauptpunktlage sowie von Affinitäts- und Nicht-Orthogonalitätsparametern zu ermöglichen, beinhaltet der Datensatz um  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  gekantete Aufnahmen.

Die Kalibrierung wird als Bündelblockausgleich durchgeführt unter Benutzung der Aicon 3D-Studio-Software. Typischerweise wurden 70 Bilder pro Kalibrierepoche und Kamera aufgenommen. Die Anzahl der Bilder für die

DJI-Systeme ist etwas geringer, da die Kamera bei diesen Systemen nicht vom Träger zu lösen ist und somit nicht alle Kantungen realisierbar waren. Die verwendete Kalibrationssoftware hat dabei das Standardverzeichnungsmodell nach Brown implementiert mit zusätzlichen physikalischen Parametern für die Korrektur von Kamerakonstante, Bildhauptpunkt, radialer und tangentialer Verzeichnung sowie Affinität und Scherung. Alle Bildpunkte wurden automatisch durch Ellipsen-Fit extrahiert. Die Geometrie von Kalibrierblöcken ist sehr ähnlich und so wurden hier ähnliche Aufnahmekonfiguration für alle Systeme realisiert und sind somit direkt miteinander vergleichbar. Um Aussagen über die Stabilität treffen zu können, wurde jede dieser Kameras mehrfach (z. T. über mehrere Tage) kalibriert. Außer zwei Systemen wurde jede Kamera zu vier verschiedenen Zeitpunkten kalibriert. Dabei dient die erste Kalibrierung jeweils als Referenzepoch. Dabei wurde auf eine einheitliche Aufnahmegeometrie geachtet, sodass sich Korrelationseffekte zwischen innerer und äußerer Orientierung über alle Epochen nahezu identisch verhalten.

### 3.2 Ergebnisse der Methode zur Langzeitstabilität

Die in Abb. 2 dargestellten Werte zeigen die Ergebnisse der vorgestellten Methode zur Bestimmung der Stabilität der inneren Orientierung für die untersuchten UAV-Kameras. Vergleichsparameter sind dabei die Kamerakonstante und der Bildhauptpunkt.

Offensichtlich ist, dass jede Kamera Abweichungen zu ihrer Referenzepoch aufweist. Diese Abweichungen bzw. Veränderungen sind Indikatoren für die opto-mechanische Stabilität der Kamera. Bei näherer Betrachtung lassen sich dennoch Unterschiede feststellen. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass sich die Skalierungen der einzelnen Diagramme teilweise unterscheiden.

Die eigens für UAV-Anwendungen entwickelte MACS Micro 12MP bleibt unter 0,9 Pixel hinsichtlich Bildhauptpunktlage und unter 0,4 Pixel hinsichtlich Brennweitenänderung. Bezuglich der System- und Bridgekameras sind die Unterschiede der Sigma DP1 und Ricoh GXR deutlich unter 0,9 Pixel für alle Parameter, wobei die DP1 ein wenig stabiler wirkt. Als ein möglicher Grund kann das festverbaute Objektiv der DP1 angenommen werden. Anschließend ordnet sich die Mittelformatkamera PhaseOne IXU 1000 ein. Die Canon EOS 5 DSR zeigt die größten Abweichungen; der Wert der Kammerkonstante ändert sich um mehr als 14 Pixel für die letzten beiden Epochen. Dazwischen rangiert die Sony Alpha 7R. Interessant zu beobachten ist der Vergleich der beiden proprietären Systeme von DJI. Die Phantom 3 weist nur geringe Veränderungen auf, die vermutlich auch auf die Festmontage des Objektivs zurückzuführen sind. Somit kann die Phantom 3, in Bezug auf die geometrische Stabilität, als eine dem Konzept einer (photogram-)metrischen Kamera nahestehenden

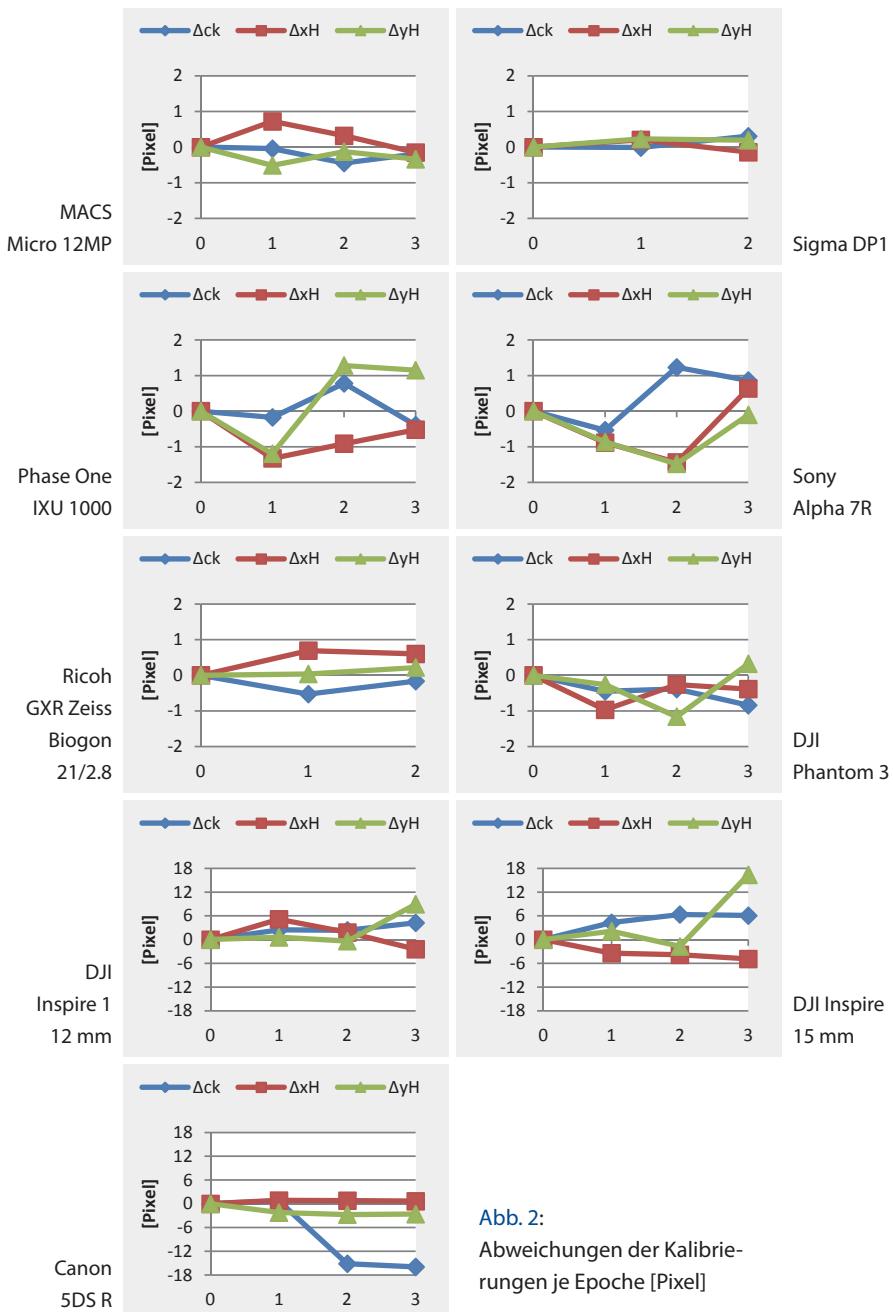


Abb. 2:  
Abweichungen der Kalibrierungen je Epoche [Pixel]

Entwicklung angesehen werden. Das wird noch offensichtlicher, wenn man die Werte mit denen des DJI Inspire 1 Systems (mit Wechselobjektiven) vergleicht. Dort sind die Abweichungen sowohl bezüglich der Brennweite als auch der Bildhauptpunktllage deutlich größer.

Es gibt teilweise erhebliche Unterschiede in Bezug der Stabilität der inneren Orientierung der Kameras. Prinzipiell sind Änderungen der inneren Orientierung einer Kamera dann vernachlässigbar, sofern die Aufnahmegeometrie eine Insitu-Kalibrierung zulässt (Cramer et al. 2017a) und sich die Kameraparameter während der Befliegung nicht verändern.

## 4 Effektives optisches Auflösungsvermögen

Die radiometrische Qualität optischer Sensoren wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Lichtstrahlen, die von einem Objekt reflektiert und von der Kamera detektiert werden, durchlaufen auf ihrem Weg einen Teil der Erdatmosphäre und verlieren dabei auf Grund von Absorption und Diffusion an Energie. Dieser Anteil ist im UAV-Kontext relativ gering und soll hier nicht weiter betrachtet werden. Anschließend passiert das Licht ein (komplexes) Linsensystem mit integrierter Blende. Somit werden die effektiven Raumwinkel für den Lichteinfall begrenzt. Die Konsequenz ist, dass sowohl das Objektiv als auch die Blende die Menge an Licht begrenzt und somit die Menge an Photonen, die zum Sensor gelangen können und dort zum Abbildungsprozess beitragen. Die Anzahl an Photonen, die in einem definierten Zeitraum die Photodioden erreicht, bestimmt die benötigte Belichtungszeit, die nötig ist, um ein äquivalentes Ausgangssignal zu erzeugen. Je kleiner die Blende dabei gewählt wird, desto mehr begrenzen Beugungseffekte ein scharfes Bild. Wird die Blendenöffnung zu groß gewählt, so gewinnen Abbildungsfehler, wie sphärische und chromatische Aberrationen an Bedeutung und beeinflussen die Aufnahme. Die Belichtungszeit beeinflusst in der Luftbildphotogrammetrie wiederum eine scharfe Abbildung in Form der Bewegungsunschärfe als Resultat der örtlichen Veränderung des Kamerasytems während der Belichtung. Bei Koptersystemen werden fast ausschließlich Stabilisierungen genutzt (Gimbal). Diese kompensieren einen Teil der Unschärfe, die durch plötzliche Rotationen (z. B. durch Windböen) entstehen. Der Unschärfeanteil durch die Bewegung des Fluggeräts während der Belichtung kann kompensiert (forward motion compensation) werden und einige großformatige Luftbildsysteme bieten solche technischen Lösungen an. Im UAV-Bereich wird auf solche (z. T. mechanischen) Lösungen oftmals verzichtet, da diese das Gesamtgewicht steigern und somit die Flugzeit verringern. Aus diesem Grund ist, die Belichtungszeit vor jedem Flug individuell den Umgebungsbedingungen sowie der geplanten Fluggeschwindigkeit anzupassen.

Ein weiterer, störender Aspekt ist die Abnahme der Lichtstärke zu den Bildrändern. Dieser Effekt wird häufig als Vignettierung beschrieben und wird durch das Linsensystem und die integrierte Blende verursacht. Die Vignettierung ist messbar und korrigierbar durch die Bestimmung der Photo-Response-Non-Uniformity (PRNU) (Kraft et al. 2016). Nachdem die Lichtstrahlen das Linsensystem passiert haben, treffen sie auf den Sensor, also die Baugruppe, die das digital interpretierbare Signal erzeugt, abhängig von den detektierten Photonen während des Belichtungszeitfensters. Die Qualität dieses Signals wird durch verschiedene elektronische Bauteile beeinflusst (Ausleseelektronik des Sensors, Analog-Digital-Wandler). Ein Maß für diese Qualität ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Das SNR ist ebenfalls charakterisiert durch a) das elektronische Grundrauschen, das unweigerlich entsteht sobald ein Halbleiter an eine Versorgungsspannung angeschlossen ist, und b) die photo-effektive Fläche jedes einzelnen Sensorelements (Pixel). Je größer die effektive Fläche desto mehr Photonen tragen bei angenommenen gleichen Belichtungszeitfenstern zum Signal bei und erhöhen es somit. Das elektronische Grundrauschen kann gemessen und anschließend berücksichtigt werden, indem man die Dark-Signal-Non-Uniformity (DSNU) bestimmt (Kraft et al. 2016).

#### **4.1 Verfahren zur Bestimmung der effektiven optischen Auflösung**

Schärfe als ein Bildmerkmal ist charakterisiert durch die Modulationstransferfunktion *MTF*, welche die Ortsfrequenz-Antwort eines abbildenden Systems auf eine gegebene Belichtung ist. „Hohe Ortsfrequenzen spiegeln den feinen Bilddetailgrad wieder. Je größer die Antwort, desto feiner ist das Detail und desto schärfer ist das Bild“ (Mix 2005). Das effektive, optische Auflösungsvermögen kann auf verschiedene Weise bestimmt werden. Ein klassischer Ansatz ist die Verwendung von Balkendiagrammen (z. B. USAF-Testtafel mit Gruppen von Balken). Dort erhält man die (zumeist subjektiv bestimmte) Auflösung als den Balkenabstand in derjenigen Gruppe, die als gerade noch unterscheidbar wahrnehmbar ist. Das ist dem Rayleigh-Kriterium sehr ähnlich (Born und Wolf 1999), denn es definiert den Abstand zwischen zwei Punktlichtquellen, sodass diese von einem abbildenden System aufgelöst werden.

Um dem subjektiven Einfluss bei der Messung mit Balkendiagrammen entgegenzuwirken, nutzen einige Methoden Techniken aus der Signalverarbeitung bei der Bestimmung des Auflösungsvermögens. Die Beiträge von Reulke et al. (2004, 2006) gehören zu diesen Methoden. Dort werden die *MTF* und anschließend die Punktspreizfunktion *PSF* für ein bestimmtes Testmuster (z. B. Siemensstern) berechnet. Mit Vorkenntnissen über die (wohldefinierte) Siemensstern-Testtafel wird zunächst die Kontrasttransferfunktion *CTF* als

Gaußfunktion approximiert, wobei sich der Kontrast  $C$  zur zugehörigen Frequenz  $f$  aus dem Quotient der Intensitätsunterschiede  $I$  ergibt:

$$C(f) = \frac{I_{\max}(f) - I_{\min}(f)}{I_{\max}(f) + I_{\min}(f)}. \quad (1)$$

Die  $MTF$  wird ausgehend von der  $CTF$  mithilfe der Coltman-Formel (Coltman 1954) abgeleitet:

$$MTF(f) = \frac{\pi}{4} \left[ CTF(f) + \left( \frac{CTF(3f)}{3} \right) - \left( \frac{CTF(5f)}{5} \right) + \left( \frac{CTF(7f)}{7} \right) + \dots \right]. \quad (2)$$

Die  $PSF$  erhält man anschließend als die inverse Fouriertransformierte der  $MTF$ .

Es existieren mehrere Kriterien um aus diesen Funktionen Maße für das Auflösungsvermögen von Kameras abzuleiten. Der Parameter  $\sigma$  (Standardabweichung) der gaußförmigen  $PSF$  ist ein Kriterium. Es bezieht sich direkt auf den Bildraum und kann als objektives Maß angenommen werden, um die Abbildungsleistung verschiedener Kameras zu vergleichen. Ein weiteres Kriterium ist die zugehörige Frequenz, bei der die  $MTF$  einen gewissen (minimalen) Wert annimmt (z. B. 10 %,  $MTF10$ ). Das Reziproke dieser Frequenz ist die Näherung für die maximale Anzahl an Linien pro Pixel (mit der Nyquistfrequenz bei 1). Die Breite der  $PSF$  auf halber Höhe ihres Maximums ist ein weiteres Kriterium und wird häufig als FWHM (full width half maximum) abgekürzt.

## 4.2 Benchmark Layout

Ziel der Benchmark Prozedur ist es die räumliche Auflösung für verschiedene Sensor-Linsen-Kombinationen vergleichend zu bestimmen. Um sicherzustellen, dass die Messung wiederholbar ist und gleichzeitig kein Streulicht die Analyse verfälscht, wurde ein ausreichend langer Kellergang gefunden und professionelles Fotografen-Equipment zur Beleuchtung genutzt (Abb. 3 oben). Für jede Kamera wurde die zugehörige Distanz zur Siemenssterntafel derart festgelegt, dass die nominelle Auflösung für alle Systeme gleich ist (entsprechend dem Verhältnis von Brennweite und Pixelgröße). In diesem Test wurde die nominelle Auflösung auf 5 mm festgelegt, um die eingangs erwähnten Anforderungen an Genauigkeit hinsichtlich Inspektions- und Überwachungsaufgaben zu adressieren. Üblicherweise verändert sich das Auflösungsvermögen, wenn es über das gesamte Bildfeld betrachtet wird. Um diesen Effekt zu analysieren wurden mit jeder Kamera mehrere Aufnahmen gemacht, wobei die Zieltafel an verschiede-

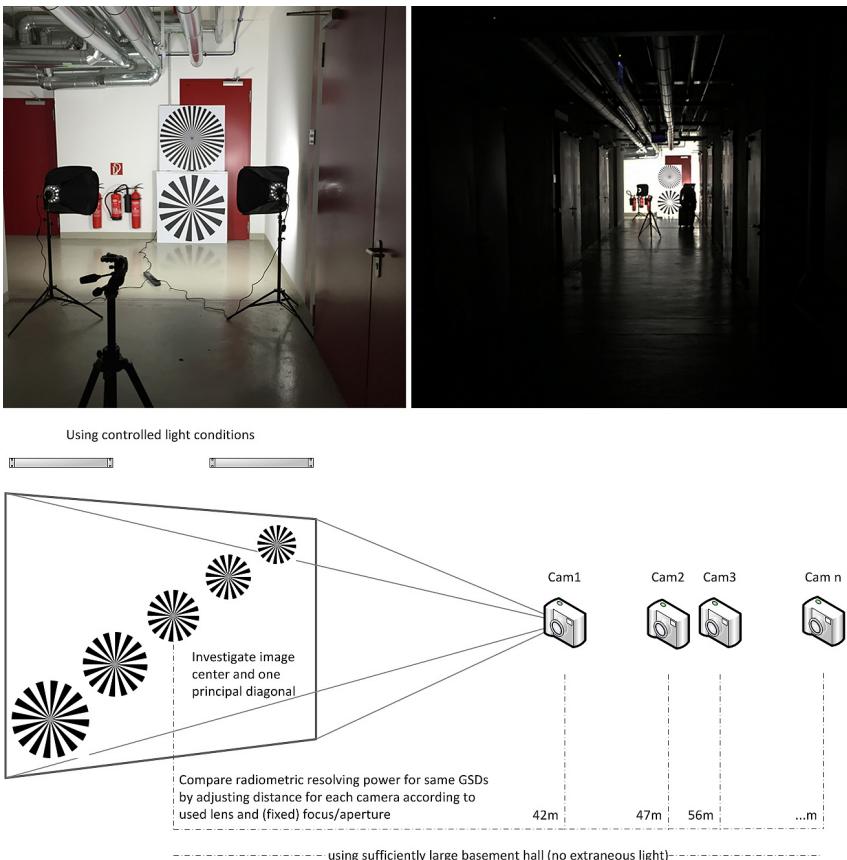


Abb. 3: Design und Layout der Benchmark-Prozedur

nen Stellen im Bildraum abgebildet wird, z. B. Bildzentrum, Bildhalbfeld und Bildecke (Abb. 3 unten).

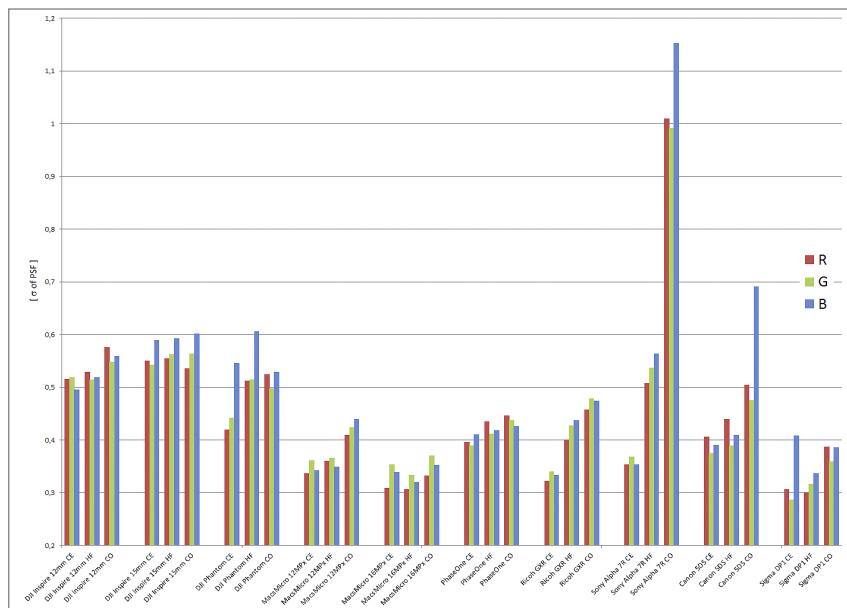
Die Auswirkung von verschiedenen Demosaikierungsmethoden, also die Konvertierung von Rohbildern in Farbbilder aus Bayer-Pattern wurde durch (Kraft et al. 2016) beschrieben. Die Untersuchung in diesem Beitrag wurde so angelegt, dass alle Aufnahmen mit dem DCB-Verfahren konvertiert wurden. Dabei wurde sowohl auf die open-source Implementierung von LibRAW, als auch die ursprüngliche Implementierung der MACS Micro Varianten genutzt. Für jedes konvertierte Bild wurde die *PSF* mit der zugehörigen Standardabweichung  $\sigma$  berechnet (Kap. 4.1). Um das Auflösungsvermögen so unverfälscht wie möglich entlang der Bilddiagonalen darzustellen, wurden sowohl die Vignettierung als auch das Dunkelstromrauschen nicht korrigiert und soll somit die authentische

Systemantwort vom Objektraum zum Sensor abbilden. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt.

### 4.3 Ergebnisse der Auflösungsuntersuchung

Wie erwartet, verringert sich das effektive, optische Auflösungsvermögen einer bestimmten Sensor-Objektiv-Kombination vom Bildzentrum über die Bildhalbfelder hin zu den Bildecken. Diese Abnahme der Auflösung wird durch Effekte der radialsymmetrischen Verzeichnung und durch Vignettierungseffekte hervorgerufen. Deutlich zu sehen ist dieser Trend bei Sonys Alpha 7R mit dem Voigtländer Skopar 35/2.5-Objektiv (Abb. 4). Während die Auflösung im Bildzentrum nahe an den Resultaten der am besten auflösenden Systeme liegt, nimmt sie zu den Bildecken außergewöhnlich stark ab.

Die Abbildungsleistung der DJI-Systeme verhält sich relativ homogen und die Veränderung über das gesamte Bildfeld ist gering. Die MACS-Micro-Prototypsysteme (besonders die 16 MP-Version) zeigen im Vergleich die besten Werte. Möglicherweise deutet das einen Zusammenhang zwischen Pixelgröße (photo-effektiver Fläche) und tatsächlichem Auflösungsvermögen an, denn für die 16 MP-Variante beträgt diese 7,4 µm. Die Resultate der Sigma DP1 stützen



**Abb. 4:** Benchmark-Ergebnisse des optischen Auflösungsvermögens (CE-Sensorzentrum; HE-Sensorhalbfeld; CO-Sensorecke)

diese Annahme, da sie ebenfalls über 7,8 µm große Sensorpixel verfügt. Überdies hinaus liefert der Foveon-Chip die besten Resultate. Der Hauptgrund dafür ist das nicht nötige De-Mosaikieren der Bayer-Matrix (Hubel et al. 2004).

Die Ricoh GXR zeigt eine gleichmäßige Abbildungsleistung und ist nah an der MACS Micro 12MP und Phase One's IXU 1000. Besonders im Bildzentrum ist die Auflösungsvergleichsweise sehr gut.

Die IXU 1000 von Phase One mit Mittelformat Sensor und 100 Megapixel weist lediglich geringe Abweichungen für das Auflösungsvermögen über das gesamte Bildfeld auf, auch wenn sie sich leicht hinter der MACS Micro 12MP bezüglich effektiver Auflösung platziert.

Die Canon 5DS R als Vertreterin der DSLR-Kamerafamilie verhält sich im Bildzentrum ähnlich der IXU 1000. Zu den Bildecken hin nimmt die Auflösung allerdings wahrnehmbar stärker ab.

Bei einigen Systemen ist zu beobachten, dass der blaue Farbkanal signifikant schlechter auflöst als der grüne oder der rote Kanal. Das Bayer-Muster besitzt doppelt so viele grüne Pixel im Vergleich zu roten und blauen Pixel. Daher sind für den grünen Kanal leicht besser bestimmte Werte zu erwarten (in Relation zu Rot und Blau). Dieser Sachverhalt ist noch nicht abschließend geklärt und wird in zukünftigen Arbeiten untersucht, gerade unter der Annahme, dass chromatische und sphärische Aberrationen und die Farbtemperatur der verwendeten Lichtquelle einen Einfluss haben können.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurden verschiedene Qualitätsmerkmale für UAV-basierte Kamerasysteme vorgestellt und diskutiert. Folgende Aspekte sind dabei von Bedeutung:

- Neben den technischen Spezifikationen der Kamera, wie Brennweite, Pixel- und Sensorgröße, Blende und Öffnungswinkel ist es ebenfalls von Relevanz, welches Gesamtgewicht das System besitzt, wie genau ein Triggerereignis einer äußeren Orientierung zuzuordnen ist (z. B. im Hinblick auf eine direkte Georeferenzierung der Bilder) und wie gut die Schnittstellenerreichbarkeit ist. Die Gesamtsystemkosten sind dabei nicht zu vernachlässigen.
- Weitere hier vorgestellte Qualitätsmerkmale sind die Langzeitstabilität der inneren Orientierung und das effektive, optische Auflösungsvermögen abbildender Systeme.
- Die hier untersuchten Systeme unterscheiden sich teilweise deutlich hinsichtlich Langzeitstabilität der geometrischen Kalibrierung.
- 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.
- Es existieren manuelle und automatische Verfahren zur Bestimmung der Auflösung. Eine automatische Variante wurde hier algorithmisch vorgestellt.

Die Gesamtheit der hier zusammengetragenen Qualitätsmerkmale und deren Prozeduren eignen sich, um eine Gegenüberstellung von avisierten abbildenden Systemen zu realisieren. Prinzipiell lassen sich heutzutage Unzulänglichkeiten der Kamerageometrie teilweise durch Software lösen (z. B. Selbstkalibrierung mit Pix4Dmapper oder Agisoft PhotoScan). Neben einer geeigneten Aufnahmegeometrie (Bündelblock) sind zusätzlich für instabile Kamerasysteme Passpunkte notwendig, um jeweils die Maßhaltigkeit der erzeugten Modelle zu gewährleisten. Für stabile innere Orientierungen können hingegen Passpunkte für die Modellbildung vernachlässigt werden. Das effektive Auflösungsvermögen eines Kamerasystems ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben der De-Mosaikierungsmethode (Cramer et al. 2017a) ist auch die Sensor-Objektiv-Kombination entscheidend. Die effektive Auflösung weicht dabei in den meisten Fällen von der berechneten, nominellen Auflösung (zumeist identisch zur Herstellerangabe) ab. Neben kinematischen Einflüssen während der Befliegung (z. B. Bewegungsunschärfe) ist diese Abweichung auch unter statischen Laborbedingungen feststellbar. Es empfiehlt sich daher die tatsächlich erreichte Auflösung im Feld (z. B. durch Nutzung eines Siemenssterns oder USAF-Testtafel) mitzubestimmen.

## Literatur

- Born, M.; Wolf, E. (1999): Principles of Optics. Cambridge University Press.
- Coltman, J. W. (1954): The Specification of Imaging Properties by Response to a Sine Wave Input. *J. Opt. Soc. Am.* 44, S. 468–471.
- Cramer, M.; Przybilla, H.-J.; Meißner, H.; Stebner, K. (2017a): Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 67–84.
- Cramer, M.; Przybilla, H.-J.; Zurhorst, A. (2017b): UAV Cameras: Overview and geometric calibration benchmark. In: Stachniss, C.; Förstner, W.; Schneider, J. (eds.): International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42(2/W6), S. 85–92.
- Hubel, P. M.; Liu, J.; Guttosch, R. J. (2004): Spatial frequency response of color image sensors: Bayer color filters and foveon x3. *Proc. SPIE*, Vol. 5301, S. 402–407.

- Kraft, T.; Geßner, M.; Meißner, H.; Cramer, M.; Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Evaluation of a metric camera system tailored for high precision UAV applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41(B1), S. 901–907.
- Mix, P.E. (2005): *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*. John Wiley & Sons.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 51–66.
- Reulke, R.; Becker, S.; Haala, N.; Tempelmann, U. (2006): Determination and improvement of spatial resolution of the CCD line-scanner system ADS40. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(2), S. 81–90.
- Reulke, R.; Tempelmann, U.; Stallmann, D.; Cramer, M.; Haala, N. (2004): Improvement of spatial resolution with staggered arrays as used in the airborne optical sensor ADS40. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B1), S. 114–119.

## Kontakt

Henry Meißner | Karsten Stebner  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für optische Sensorsysteme  
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin  
[henry.meissner@dlr.de](mailto:henry.meissner@dlr.de) | [karsten.stebner@dlr.de](mailto:karsten.stebner@dlr.de)

Heinz-Jürgen Przybilla  
Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie  
Lennershofstraße 140, 44801 Bochum  
[heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de](mailto:heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de)

Michael Cramer  
Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie  
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart  
[michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de](mailto:michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de)



# Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund

Heinz-Jürgen Przybilla | Manfred Bäumker | Johannes Vieten

## 1 Einleitung

In der manntragenden Luftbild-Photogrammetrie ist die Einrichtung und Nutzung von Testfeldern seit vielen Jahrzehnten ein probates Mittel für Untersuchungen zur Qualität photogrammetrischer Aufnahmesysteme. Exemplarisch

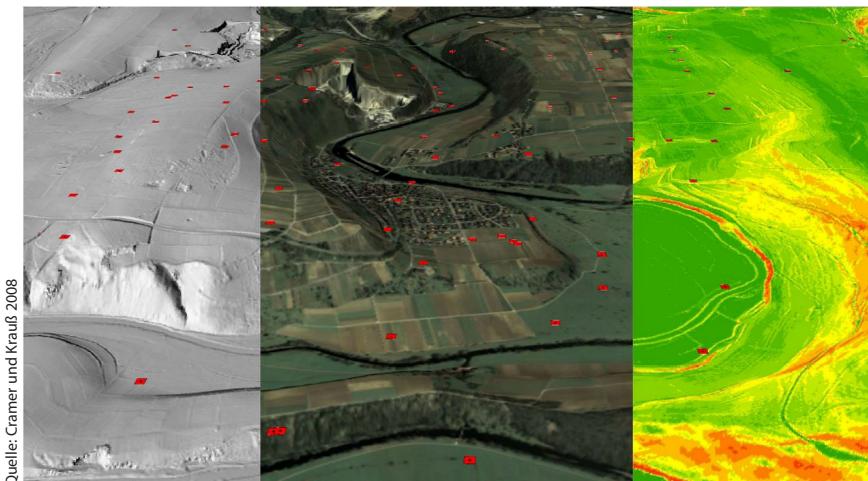


Abb. 1: Testfeld Vaihingen/Enz des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart

ist hier das Testfeld Vaihingen/Enz zu nennen (Cramer und Krauß 2008), das 1995 vom Institut für Photogrammetrie (ifp) der Universität Stuttgart eingerichtet wurde. Es hat eine Ausdehnung von etwa  $7,5 \times 4,7 \text{ km}^2$  und verfügt über etwa 200 signalisierte und koordinierte Objektpunkte und einen transportablen Siemensstern zur Analyse der geometrischen Genauigkeit bzw. des geometrischen Auflösungsvermögens von Sensoren (Abb. 1). Erste Untersuchungen eines Fixed-Wing UAV in Verbindung mit einer Consumer Kamera wurden auf dem Areal von Cramer und Haala (2012) ausgeführt.

Die Auslegung eines derartigen Testfelds für die Prüfung von UAV-Systemen ist nur eingeschränkt gegeben, da sowohl die Größe des Testfeldes als auch die

Anforderungen an die Qualität der Passpunkte an die spezifischen Gegebenheiten von UAV-Flügen angepasst werden müssen.

Das UAV-Testfeld auf dem Areal des Industriemuseums Zeche Zollern in Dortmund (LWL 2017) wurde 2014 durch die Hochschule Bochum (HSBO) eingerichtet und bisher bei verschiedenen Kampagnen genutzt (Nex et al. 2015, Przybilla et al. 2015, Gerke und Przybilla 2016, Cramer et al. 2017, Przybilla et al. 2017). Ein Testfeld mit ähnlicher Ausrichtung wurde von Greiwe et al. (2017) auf einem Haldengelände implementiert.

## 2 Das UAV-Testfeld Zeche Zollern

### 2.1 Informationen zum Objekt

Die Zeche Zollern wurde 1898 bis 1904 am westlichen Stadtrand von Dortmund ( $51^{\circ} 31' 4''$  N,  $7^{\circ} 20' 5''$  O), im Stadtteil Bövinghausen, im Jugendstil errichtet. Nach ihrer Stilllegung (Ende der 1960er Jahre) integrierte der Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) die Zeche 1981 in das dezentrale Westfälische Industriemuseum (Wikipedia 2017). Die Zeche ist heute nicht nur Museum, mit festen und wechselnden Ausstellungen, sondern auch Ort für Naherholung sowie kulturelle und wissenschaftliche Veranstaltungen.

Die Fläche des von der HSBO eingerichteten UAV-Testfeldes umfasst nahezu das komplette Areal der Zeche. Seine Ausdehnung beträgt  $320\text{ m} \times 220\text{ m}$  (ca. 7 ha). Die höchste vertikale Ausdehnung ist über die ca. 40 m hohen Fördergerüste gegeben (Abb. 4). Es besteht aus 45 rasterförmig angeordneten signalierten Bodenpunkten (Abb. 2) sowie einer frei positionierbaren Anordnung von Siemenssternen und Farbtafeln, die für erweiterte geometrische und radiometrische Tests genutzt werden (Abb. 3).



Abb. 2: Signalisierter Bodenpunkt (GCP)



Abb. 3: Anordnung von Siemenssternen und Farbtafeln

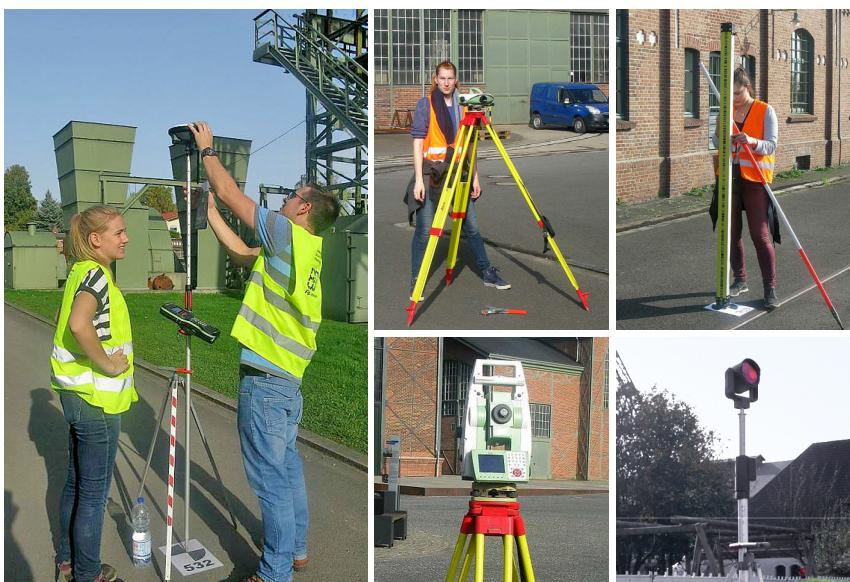


**Abb. 4:** Zeche Zollern – Blick auf das Gesamtensemble mit dem Maschinenhaus im Vordergrund (oben). 3D-Modell mit signalisierten Bodenpasspunkten (GCP), UAV-Befliegung vom 16.10.2017 (unten)

## 2.2 Geodätische Messungen im Testfeld

Am 16.10.2017 wurden auf dem Gelände der Zeche Zollern Befliegungen mit verschiedenen UAV und Kamerasystemen durchgeführt (Tab. 1). Für die Georeferenzierung der Bilddaten wurden insgesamt 45 Bodenpunkte mit Zieltafeln versehen. Ein Großteil der Bodenpunkte war dort bereits in den Vorjahren angelegt und vermessen worden. Die Genauigkeit der Koordinaten dieser Passpunkte aus den Ausgleichungen der damaligen Netzmessungen lag bei einigen Punkten nicht bei der angestrebten Genauigkeit von wenigen Millimetern. Außerdem waren einige Punkte durch zwischenzeitliche Baumaßnahmen zerstört worden und auch die Verteilung der Passpunkte war nicht optimal. Aus diesen Gründen wurde beschlossen die zerstörten Punkte neu anzulegen und zusätzliche Passpunkte anzulegen sowie sämtliche Punkte neu zu vermessen.

Die Netzmessungen erfolgten am Tag der Befliegung, wobei drei Tachymeter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Institut für Optische Sensorsysteme (DLR OS), und der HSBO, ein Präzisionsnivellier und ein RTK-GNSS-System der HSBO eingesetzt wurden (Abb. 5). Zur Bestimmung der Koordinaten der Passpunkte im System ETRS89 wurden zunächst pro Punkt zwei GNSS-RTK-Messungen von jeweils 30 Sekunden Dauer (30 Epochen) und zu



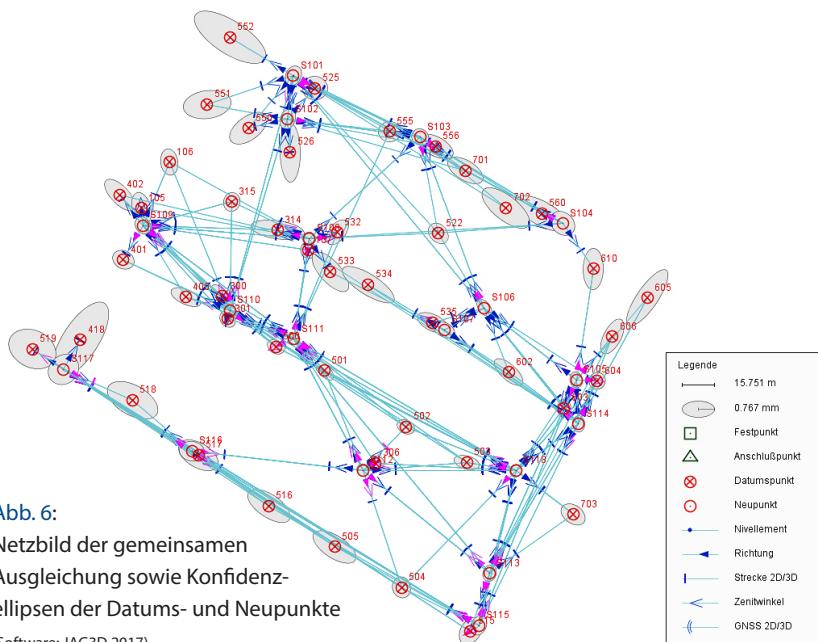
**Abb. 5:** GNSS-RTK-System LEICA GS16 (links), Präzisionsnivellier LEICA DNA03 und kodierte 2 m-Invarbandlatten (oben Mitte und oben rechts), LEICA TS15 mit Miniprima GMP111-0 und LEICA-Rundprisma (unten Mitte und unten rechts)

**Tab. 1:** Technische Daten der eingesetzten Kamerasysteme

Provider	DLR OS/ German-drones	PhaseOne/ Copter-systems	Hochschule Bochum		
Kamera	MACS SaR	PhaseOne IXU1000	DJI Zenmuse X5S_DLR	DJI Zenmuse X5S	DJI Phantom4 Pro
Objektiv	Schneider Kreuznach Xenon Emerald 50/2.2	Rodenstock 50/5.6	Schneider Kreuznach Apo Xenoplan 24/2.0	DJI MFT ASPH 15/1.7	Integrated lens 8.8/2.8
Verschluss (Shutter)	Global	Zentral (mechanisch)	Rolling	Rolling	Zentral (mechanisch)
Pixelauflösung [MPx]	16	100	20,8	20,8	20
Sensorformat [mm]	36,0 × 23,9	53,4 × 40,0	17,3 × 13,0	17,3 × 13,0	13,2 × 8,8
Pixelanzahl	4.864 × 3.232	11.608 × 8.708	5.280 × 3.956	5.280 × 3.956	5.472 × 3.648
Pixelgröße [µm]	7,4	4,6	3,28	3,28	2,4
Brennweite [mm]	50	50	24	15	8,8
Öffnungswinkel (FOV) (Diagonal)	46,7°	67,4°	50,1°	73,6°	83,8°

unterschiedlichen Zeiten unter Nutzung des SAPOS-HEPS-Dienstes durchgeführt. Die UTM-Koordinaten und ellipsoidischen Höhen dieser Messungen dienten als Datumspunkte für die nachfolgende 3D-Netzausgleichung. Die ellipsoidischen Höhen der GNSS-Messungen wurden zusätzlich mit den Quasigeoidhöhen des GCG2016 in Normalhöhen des DHHN2016 transformiert und dienten bei der Ausgleichung der Nivellementsmeßungen als Anschlusshöhen. Die Standardabweichungen der ausgeglichenen Normalhöhen im System DHHN2016 (NHN) aus der Ausgleichung liegen im Bereich von 1 mm bis 3 mm und deren relative Genauigkeit (Höhendifferenzen) ist besser als 1 mm.

Für die Netzmessungen wurden insgesamt 18 temporäre Tachymeter-Standpunkte mit Zwangszentrierung festgelegt. Von diesen Punkten, die auch gegenseitig beobachtet wurden, erfolgten die Messungen zu den einzelnen Passpunkten, wobei möglichst alle sichtbaren Punkte von jedem Standpunkt aus angezielt



**Abb. 6:**  
Netzbild der gemeinsamen  
Ausgleichung sowie Konfidenz-  
ellipsen der Datums- und Neupunkte  
(Software: JAG3D 2017)

werden sollten. Nach Beseitigung von einigen groben Fehlern in den Messungen wurde die 3D-Ausgleichung in mehreren Stufen durchgeführt. Die Ausgleichungen erfolgten in einem lokalen nordorientierten tangentialen Koordinatensystem mit dem Nullpunkt in der Mitte des Messgebietes. Zunächst wurden die Messungen der HSBO und der DLR unabhängig voneinander ausgeglichen und die Koordinaten dieser Ausgleichungen mittels einer 2D-Helmerttransformation verglichen. Dabei ergab sich eine Standardabweichung einer Koordinate für die 15 gemeinsamen Tachymeterstandpunkte, die in Zwangszentrierung gemessen werden konnten, von 1,2 mm und für die 27 gemeinsamen Datumspunkte (= Passpunkte) eine Standardabweichung von 2,5 mm.

Anschließend wurden die Messungen der DLR und der HSBO einer gemeinsamen 3D-Netzausgleichung zugeführt, wobei nicht sämtliche Messungen der DLR zu den Passpunkten in die Ausgleichung einfließen konnten, da die Prismenhöhen unterschiedlich waren. Das Ergebnis dieser Ausgleichung liefert eine Standardabweichung von 1 mm für die Tachymeterstandpunkte (Neupunkte) und von 1 mm bis 4 mm für die Passpunkte (Datumspunkte). Die größten Standardabweichungen sind den Punkten zuzuordnen, die nur einfach polar angehängt werden konnten. Die Rücktransformation der ausgeglichenen Koordinaten vom lokalen Koordinatensystem in das ETRS89-Koordinatensystem mit den UTM-Koordinaten und ellipsoidischen Koordinaten erfolgte ohne Genauig-

keitsverlust, sodass die Standardabweichungen der lokalen 3D-Koordinaten auf die transformierten 3D-Koordinaten (UTM und Höhe) übertragen werden können (Abb. 6).

Auch der Vergleich der Höhen aus der 3D-Netzausgleichung mit denen der Nivellementsausgleichung zeigt eine Übereinstimmung von besser als 6 mm. Die Differenzen sind zum Teil darauf zurückzuführen, dass die Nivellierlatten und die Prismenstäbe wegen der verwendeten Vermarkungen unterschiedlich aufgesetzt wurden. Die Standardabweichungen der aus der Nivellementsausgleichung berechneten Normalhöhen der Passpunkte liegen absolut bei 5 mm und relativ bei 1 mm. Bei der Verwendung der Normalhöhen zur direkten Georeferenzierung sollte beachtet werden, dass für eine genaue Auswertung der Bilddaten – abhängig vom Auswertesystem – ggf. die ellipsoidischen Höhen besser geeignet sind, da die Quasigeoidhöhen des Befliegungsgebietes im Bereich von 45.637 m (nördlicher Punkt 552) bis 45.650 m (südlicher Punkt 515) variieren.

Eine Übersicht aller durchgeführten Messungen und Berechnungsergebnisse zeigt Abb. 7.

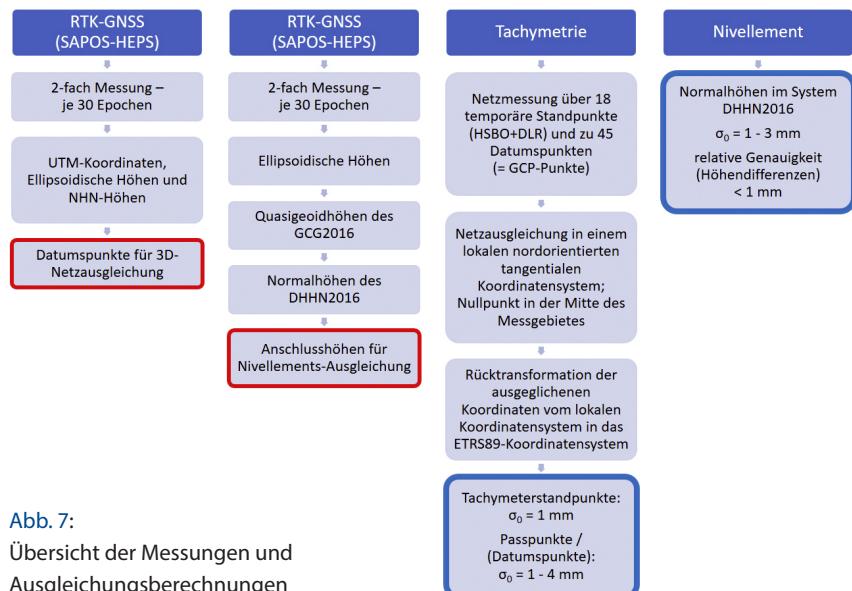


Abb. 7:

Übersicht der Messungen und  
Ausgleichungsberechnungen

### 3 UAV-Systemtests

#### 3.1 Eingesetzte Systeme

Aufbauend auf den Erfahrungen zurückliegender Untersuchungen zu UAV-Systemtests (Przybilla et al. 2015, Gerke und Przybilla 2016, Kraft et al. 2016, Cramer et al. 2017) bestand das Ziel der Herbstkampagne 2017 darin neben marktgängigen Systemen mit neuer Sensorik (DJI Zenmuse X4S und X5S) das „High-End“-System des Kameraherstellers PhaseOne (IXU 1000) auf einer Trägerplattform von Coptersystems (2017), sowie eine Eigenentwicklung der DLR OS (MACS SaR, Trägerplattform Germardrones (2017), zu untersuchen. Ein weiteres Augenmerk lag auf dem Umbau einer DJI Zenmuse X5S. Durch Austausch des serienmäßigen Objektives, Fixierung des Fokus auf  $\infty$  und Adaption mittels einer geänderten Befestigung am Kameragehäuse soll das System möglichst „metrische“ Eigenschaften aufweisen. Einen Überblick der eingesetzten Systeme und ihrer technischen Eigenschaften zeigen die Abb. 8 und Abb. 9 sowie Tab. 1.

Bei dem Songbird System der Firma Germardrones handelt es sich um ein hybrides UAV, das über Senkrechtstart Eigenschaften verfügt. Hohe Fluggeschwindigkeiten sowie eine hohe Akkukapazität erlauben die Befliegung großer



Abb. 8: Oben: Germardrones Songbird (links) und Coptersystems Multicopter (rechts). Unten: MACS SaR (links) und PhaseOne IXU1000 (rechts)

Flächen von mehreren Quadratkilometern. Das implementierte MACS SaR Kamerasmodul basiert auf einer Industriekamera mit CCD-Sensor im Vollformat, ergänzt um eine leistungsfähige Optik (Schneider Kreuznach). Das System ist um Navigationskomponenten (RTK-GNSS, IMU) ergänzt und kann als kompakte Einheit in die Ladebucht des Songbird eingesetzt werden.

Die Mittelformatkamera IXU1000 von PhaseOne ist mit 100 MPixeln das mit Abstand hochauflösendste System, welches derzeit im UAV-Bereich nutzbar ist. Das UAV von Coptersystems ist speziell als Trägerplattform für diese Kamera konzipiert worden. Optional kann das UAV mit RTK-GNSS ausgestattet werden.

Die Firma DJI ist Marktführer im Bereich (semi-)professioneller Multicopter und bietet ein entsprechendes Spektrum an Systemen an, die auch in geo-



**Abb. 9:** Oben: DJI Inspire 2 (links) und DJI Phantom4 Pro (rechts). Mitte: Zenmuse X4S für Inspire 2 (links) und Phantom4 Pro (rechts). Unten: Zenmuse X5S (links) und die von DLR OS umgebaute Kamera (rechts)

datisch-photogrammetrischen Anwendungen eingesetzt werden. Die Baureihen Inspire 2 sowie Phantom4 Pro gehören zur neuen Multicopter-Generation des Herstellers und sind mit proprietären Kameras ausgestattet.

Die im Phantom4 Pro integrierte Kamera ist baugleich mit der Zenmuse X4S, verfügt jedoch über ein geändertes Gehäuse. Konzeptionell entspricht sie am Ehesten einer photogrammetrischen (metrischen) Kamera. Sie verfügt über einen mechanischen Zentralverschluss und eine Optik mit Festbrennweite, die allerdings elektronisch auf die geeignete Entfernung (in der Regel  $\infty$ ) fokussiert werden muss. Im Vergleich zum Vorgängermodell ist das Sensorformat signifikant vergrößert worden (1 Zoll Sensor), bei gleichzeitig moderater Anpassung der Bildauflösung (20 MPix). Durch die Vergrößerung des Pixelformats sind weitere Verbesserungen des Signal-Rausch-Verhältnisses, und damit der geometrischen und radiometrischen Qualität des Sensors, zu erwarten.

Die im Inspire 2 verbaute Zenmuse X5S ist im Vergleich zum Vorgänger (Zenmuse X5) mit leicht erhöhter Auflösung (20,8 MPix) ausgestattet worden, bei ansonsten gleichbleibendem Sensorformat. Das Konzept der Wechseloptiken verbessert einerseits die Flexibilität in der Nutzung, widerspricht aber andererseits dem Wunsch nach erhöhter Stabilität (Metrik) der Gesamteinheit. Der von DLR OS durchgeführte Umbau einer Zenmuse X5S mit fest adaptierter und auf  $\infty$  fokussierter Optik ist ein erster Versuch die Kamera in ein metrisches System zu überführen.

### 3.2 Aufnahmekonzept

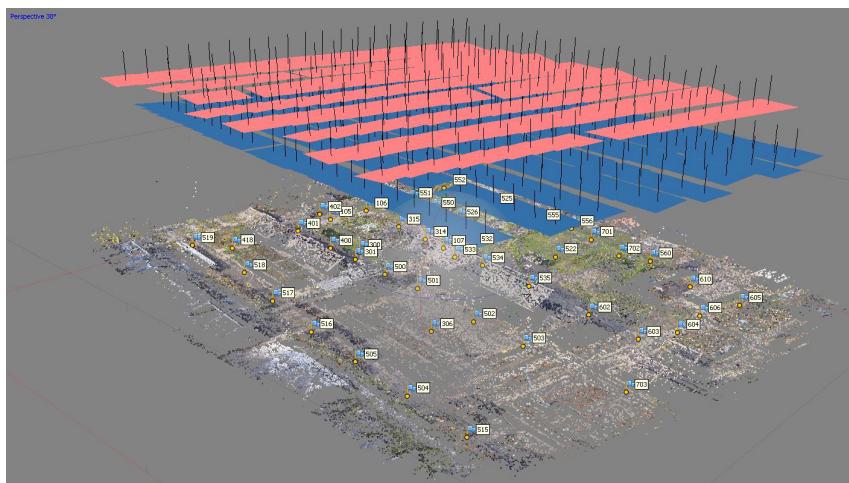
Um eine Vergleichbarkeit der Kamerasysteme im Testszenario zu gewährleisten, wurde vorab für alle Systeme eine einheitliche Bodenauflösung (GSD) von 1,36 cm festgelegt (Fluganordnung: Regular/R). Daraus resultierend ergaben sich unterschiedliche Flughöhen für die Plattformen ([Tab. 2](#)). Weiterhin wurden Flüge in einer Kreuzanordnung (Cross/C) geplant, wobei die Flughöhe jeweils um 20 % von den Normalanordnungen abweicht ([Abb. 10](#)).

Die Bildspeicherung erfolgte bei allen Systemen im RAW-Format, so dass für die nachfolgenden Auswertungen unterschiedliche Bildformate erzeugt werden konnten. Neben dem verlustfreien TIF-Format wurde das für viele Anwendungen als „Standardformat“ eingesetzte JPG-Format (Kompressionsrate 80 %) mit dem Bildbearbeitungswerkzeug „CaptureOne“ (PhaseOne 2017) generiert.

Die kontrollierte Erzeugung von Bilddaten über einen einheitlichen Workflow bietet im Hinblick auf die durchzuführenden Untersuchungen beste Voraussetzungen für die angestrebte Vergleichbarkeit, hat jedoch gleichzeitig einen negativen Effekt beim UAV-Flug und der dort vorgenommenen Datenspeicherung. Hiervon betroffen sind vorrangig die DJI-Systeme, die beim Speichern der RAW-Daten auf dem SD-Datenträger einen um den Faktor 3 höheren Zeit-

**Tab. 2:** Systeme, Fluganordnung und -höhe

Kamera	MACS SaR	PhaseOne IXU1000	DJI Zenmuse X5S_DLR	DJI Zenmuse X5S	DJI Phantom4 Pro
Regular (R)	92 m	120 m	96 m	60 m	50 m
Cross (C)	110 m	148 m	115 m	72 m	60 m

**Abb. 10:** Fluganordnung Regular (R) und Cross (C) (Block Zenmuse X5S DLR)

bedarf benötigen. Während die Datenspeicherung eines Fotos im JPG-Format weniger als 1 Sekunde benötigt, verlängert sich diese Zeit für die RAW-Daten Speicherung auf ca. 3 Sekunden. Damit einher geht eine deutlich zu reduzierende Fluggeschwindigkeit der Systeme. Diese werden typischerweise mit 10 m/sec geflogen; bei Speicherung von RAW-Daten muss die Geschwindigkeit auf ca. 3,3 m/sec verringert werden, mit der Folge, dass für die Betriebsdauer einer Akkuladung auch nur ein Drittel der Fotos erzeugt werden kann.

Grundsätzlich würde die Verfügbarkeit schnellerer Speichermedien diesen Mangel beseitigen können, allerdings hat DJI die Speicherung von Fotos auf den im Zubehör angebotenen SSD-Karten nicht vorgesehen. Diese können, nach Erwerb einer zusätzlichen Lizenz, ausschließlich für die Speicherung von Videodaten genutzt werden, was seitens des Herstellers nicht eindeutig vermittelt wird.

### 3.3 Erste Ergebnisse der Systeme Zenmuse X5S/X5S DLR

Im Fokus der Untersuchungen stehen Parameter, die Einfluss auf die geometrische Qualität der Bildverbände ausüben können (Abb. 11). Ziel ist es daher den Einfluss der Parameter auf die Geometrie der Bildverbände zu evaluieren.

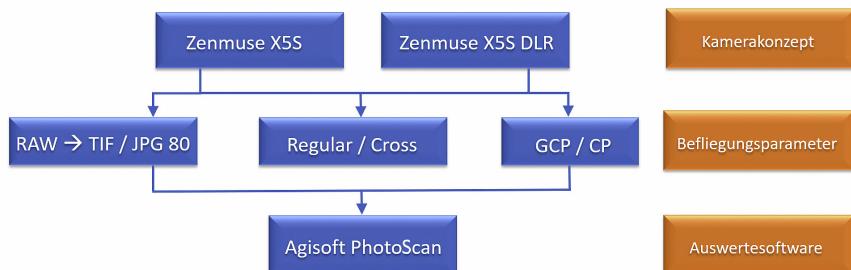


Abb. 11: Einflussgrößen auf den Bildflug

Der Vergleich der zwei untersuchten Kameras zeigt, bezogen auf die Parameter der Inneren Orientierung (Kamerakonstante und Hauptpunktlage), ein stabileres Verhalten des modifizierten Systems (Abb. 12). Innerhalb der durchgeführten Berechnungen weist die X5S deutliche Schwankungen, bezogen auf den Referenzdatensatz (RC unified), auf. Das Ein- und Ausschalten zwischen den Teilflügen (R sowie C) führt offensichtlich zu einer Änderung in der elektronischen Fokussierung (RC separate 60 m bzw. 72 m), die bei der modifizierten Kamera signifikant kleiner ausfallen. Die dargestellten Effekte ermöglichen bisher allerdings keine Aussagen über die Langzeitstabilität des modifizierten Systems. Diese Prüfung ist Ziel weiterer Untersuchungen.

In den Abb. 13 bis 16 sind die Restabweichungen an Pass- und Kontrollpunkten (RMSE-Werte) als Ergebnisse der Bündelausgleichungen mit der Auswertesoftware Agisoft PhotoScan dargestellt. Die Berechnungsvarianten gliedern sich bezüglich der Parameter:

- Bilddatenformat (TIF/JPG 80 %),
- Fluganordnung (Regular/Cross),
- Blocklagerung (Passpunktanzahl und -anordnung).

Der Vergleich der RMSE-Werte bezogen auf die zwei verwendeten Bilddatenformate (TIF bzw. JPG 80 %) zeigt sowohl an den Pass- als auch an den Kontrollpunkten ein annähernd gleiches Genauigkeitsverhalten. Offensichtlich ist die gewählte Stufe der JPG-Kompression noch ohne Einfluss auf die Bildqualität, d. h. Datenverluste im Bildmaterial liegen nicht vor.

Beim Parameter „Fluganordnung“ wurde die Konfiguration „Regular/Cross (RC)“ mit einem Parametersatz für die Innere Orientierung (unified) verglichen mit einer zweiten Variante mit separierter Innerer Orientierung (separate) für die jeweiligen Teilstücke. Eine dritte Variante bezieht sich ausschließlich auf den „regulären“ Flug (R only), verzichtet also auf die Kreuzanordnung.

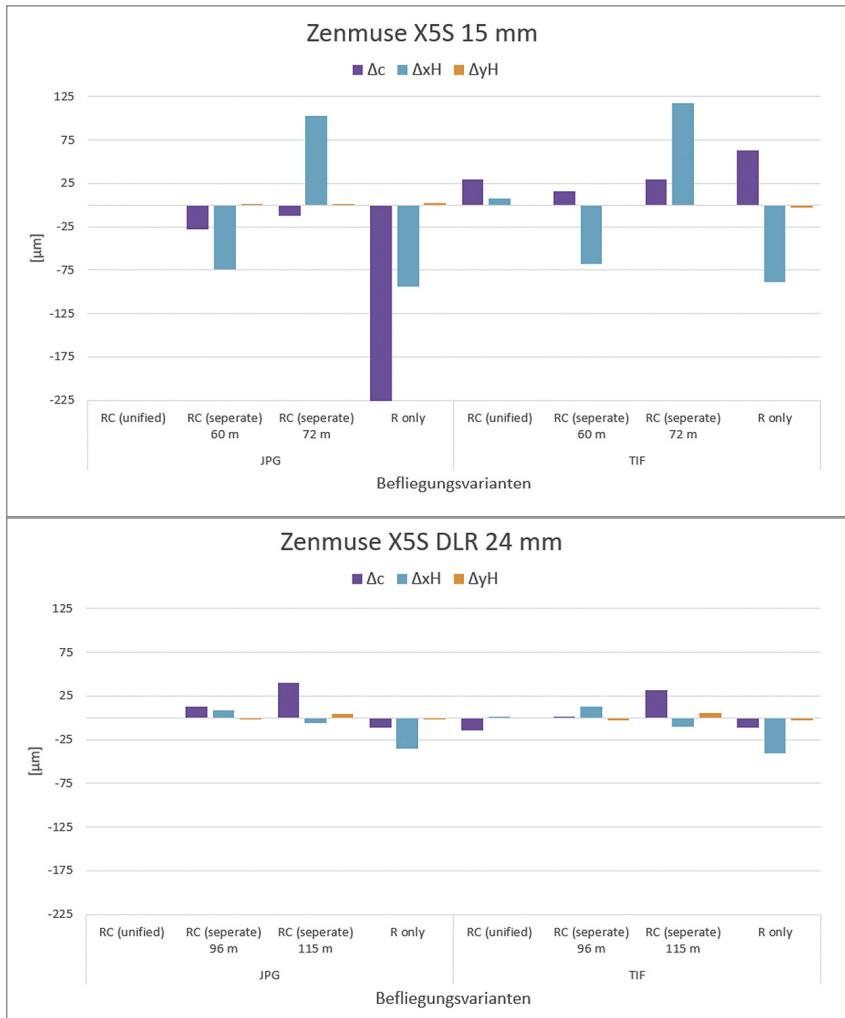
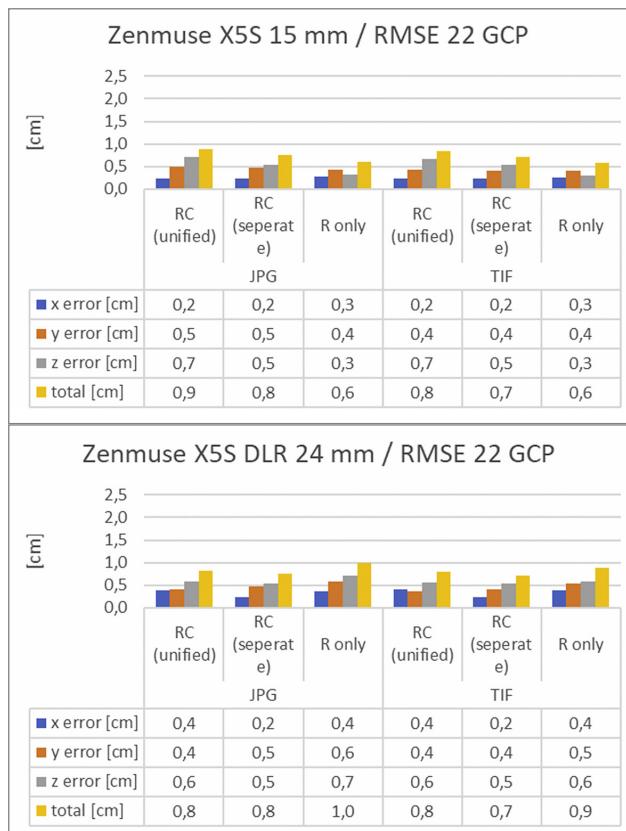


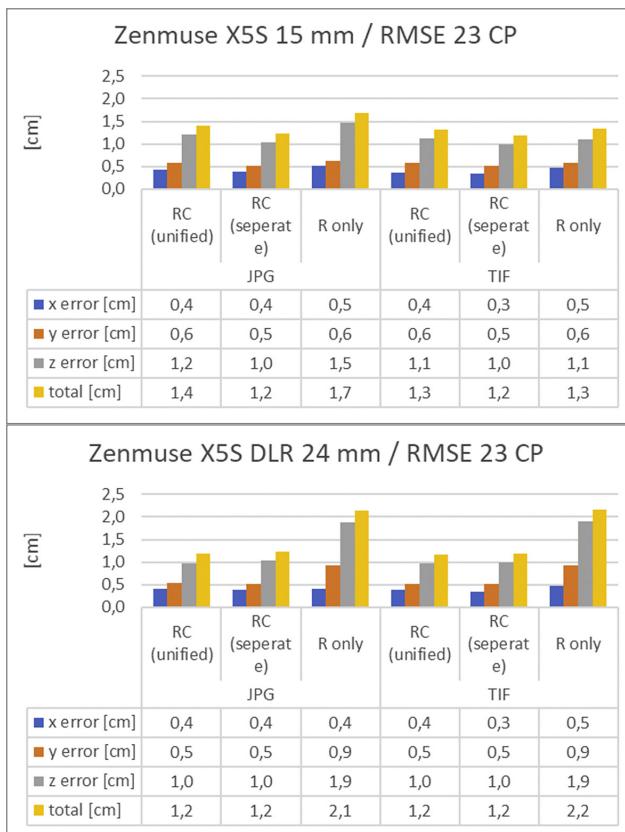
Abb. 12: Variationen der Inneren Orientierung, Parameter Kamerakonstante ( $\Delta c$ ) und Hauptpunktlage ( $\Delta x_H$ ,  $\Delta y_H$ ). Oben: Zenmuse X5S. Unten: X5S DLR



**Abb. 13:**  
RMSE – Rest-  
abweichungen an  
den Passpunkten  
(22 GCP/23 CP)

Die in den [Abb. 13 und 14](#) dargestellten Ergebnisse basieren auf einer Lage-  
rung des Blocks mit 22 Passpunkten. Diese sind im Wesentlichen rasterförmig  
über das Areal verteilt. Dazwischen befinden sich 23 unabhängige Kontroll-  
punkte, die es erlauben eventuell vorhandene Blockverbiegungen zu erkennen.  
Die Kreuzbefliegung zeigt, wie zu erwarten, ein höheres Genauigkeitspotenzial  
gegenüber der einfachen Variante (R). Die Ergebnisse der Varianten „RC unified“ bzw. „RC separate“ sind ähnlich, es ist jedoch erkennbar, dass die Variante  
„RC separate“ für die Zenmuse X5S zu Verbesserungen führt. Dies ist ein deut-  
liches Indiz für die im Vergleich zur X5S DLR weniger stabile Innere Orientie-  
rung, so dass es hier sinnvoll ist, Teilflüge mit separaten Inneren Orientierungs-  
parametern in der Bündelausgleichung einzuführen.

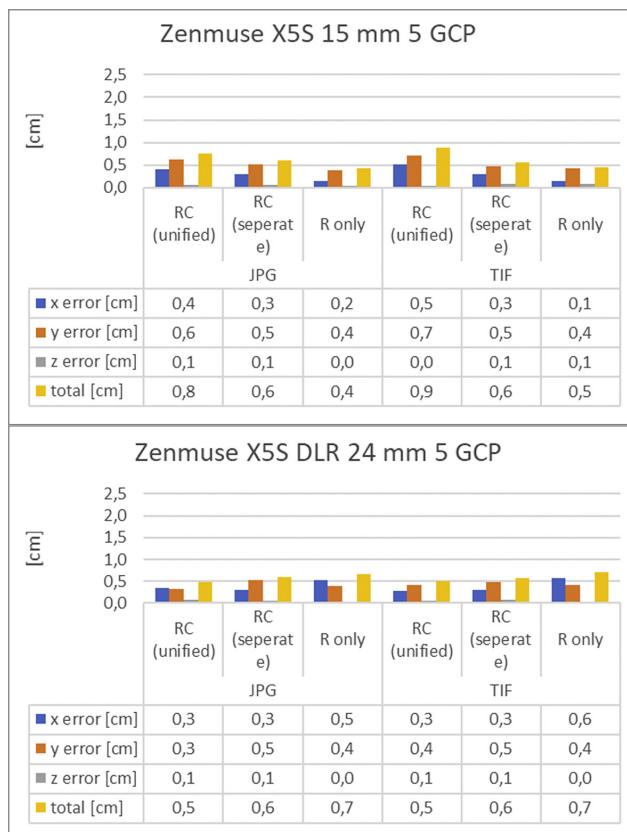
Die positive Wirkung der sehr dichten Anordnung von Passpunkten ist ins-  
besondere im „Regular“-Block erkennbar. Trotz einer deutlich geringeren Bild-



**Abb. 14:**  
RMSE – Rest-  
abweichungen an  
den Kontrollpunk-  
ten (22 GCP/23 CP)

anzahl und schlechterer Aufnahmekonfiguration ergeben sich nur geringfügig höhere RMSE-Werte.

Der Einfluss der Passpunkte auf die Bildverbände wird in den [Abb. 15 und 16](#) deutlich erkennbar. Die minimierte Anordnung mit Passpunkten in den Blockecken sowie einem zentralen Punkt in der Mitte ist für die Lagerung der Blöcke unzureichend. Der Effekt kann vorrangig an den RMSE-Werten der insgesamt 40 Kontrollpunkte erkannt werden ([Abb. 16](#)), die signifikant ansteigen. Die Vorteile beider Varianten der Kreuzbefliegung (RC) gegenüber der „Regular“-Anordnung sind ebenso erkennbar wie die Auswirkungen der stabileren Inneren Orientierung der X5S DLR: in Z-Richtung betragen die Restabweichungen nur etwa 50 % der entsprechenden Werte der X5S. Die signifikant größeren RMSE-Werte (in Z-Richtung) sind im Wesentlichen auf Probleme der numerischen Bestimmung des Parameters „Kamerakonstante“ zurückzuführen, für den der R-Block offensichtlich zu wenig Tiefeninformation bietet.

**Abb. 15:**

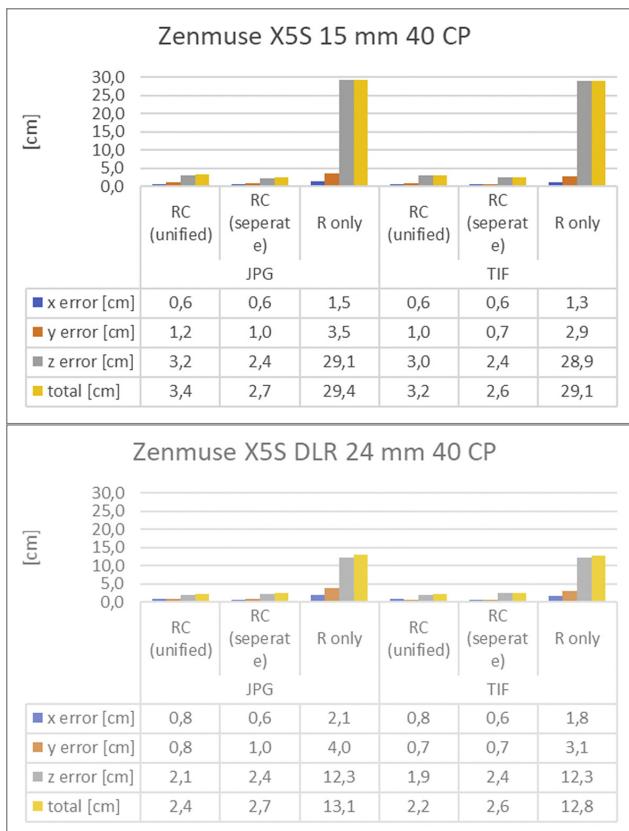
RMSE – Rest-abweichungen an den Passpunkten (5 GCP/40 CP)

## 4 Fazit und Ausblick

Das geodätisch-photogrammetrische Testfeld auf dem Areal des Industriedenk-mals Zeche Zollern, Dortmund, bietet ein Szenario zur Durchführung geo-metrischer und radiometrischer Tests von UAV. Die Basis hierzu bildet ein geo-dätisches Präzisionsnetz mit insgesamt 45 Bodenpunkten.

Im Rahmen einer gemeinsam mit dem DLR, Institut für Optische Systeme, und weiteren UAV- und Kameraanbietern durchgeführten Kampagne wurden verschiedene UAV/Sensorsysteme unter vergleichbaren Bedingungen getestet.

Am Beispiel einer DJI Zenmuse X5S sowie einer von DLR OS in ihrem me-chanischen Aufbau modifizierten und stabilisierten Kamera der gleichen Bau-reihe, wurden erste Ergebnisse zu den Einflussfaktoren Bilddatenformat, Flug-anordnung und Blocklagerung auf die Geometrie der Bildverbände vorgestellt.



**Abb. 16:**  
RMSE – Rest-  
abweichungen an  
den Kontrollpunk-  
ten (5 GCP/40 CP).  
(Hinweis: im Ver-  
gleich zu den  
Abb. 13–15 geän-  
derte Skalierung für  
die RMSE-Werte!)

Das vorhandene Bildmaterial wird zeitnah durch die Partner ausgewertet und soll einen umfassenden Einblick in die Leistungsfähigkeit der getesteten UAV-Systeme ermöglichen. Darüber hinaus sind weitere Flugkampagnen mit vorhandenen sowie neu im Markt platzierten Systemen geplant.

## Dank

Die Autoren danken allen Teilnehmern der Zollern Herbstkampagne für ihre tatkräftige Unterstützung. Neben den Partnern von DLR OS, Germandrones, PhaseOne und Coptersystems gilt ein besonderer Dank den Studierenden der Wahlpflichtveranstaltung „Ingenieurvermessung“ 2017 des Studiengangs Vermessung an der HSBO für ihre motivierte Mitwirkung bei der Netzmessung!

## Literatur

- Coptersystems (2017). <http://coptersystems.com/CMS>, letzter Zugriff 27.12.2017.
- Cramer, M.; Haala, N. (2012): Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 21, S. 428–440.
- Cramer, M.; Krauß, H. (2008): Testfeld Vaihingen/Enz. [www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/PFG-2-08-Anzeige.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/PFG-2-08-Anzeige.pdf), letzter Zugriff 27.12.2017.
- Cramer, M.; Leinss, B. (2016): Welche ist am besten? – Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasytstem in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 97–118.
- Cramer, M.; Przybilla, H.-J.; Meißner, H.; Stebner, K. (2017a): Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasytsteme. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 67–84.
- Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, (1), S. 17–30.
- GermanDrones (2017): <http://germandrones.com/de>, letzter Zugriff 27.12.2017.
- Grewe, A.; Peters, J.; Spreckels, V.; Schlienkamp, A.; Lösler, M.; Eschelbach, C. (2017): Geeignete Kameras zur Geländeaufnahme durch UAS. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Wichmann – VDE Verlag, S. 235–246.
- JAG3D (2017): Freie Netzausgleichungssoftware Java Graticule 3D. <http://derletztekick.com/software/netzausgleichung>, letzter Zugriff 27.12.2017.
- 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. EuroCOW 2016, the European Calibration and Orientation Workshop, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40-3(W4), S. 71–75.
- LWL (2017): Homepage des Industriemuseums Zeche Zollern. [www.lwl.org/industriemuseum/standorte/zeche-zollern](http://www.lwl.org/industriemuseum/standorte/zeche-zollern), letzter Zugriff 27.12.2017.
- Nex, F.; Gerke, M.; Remondino, F.; Przybilla H.-J.; Bäumker, M.; Zurhorst, A. (2015). ISPRS Benchmark for Multi-Platform Photogrammetry. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3(W4), S. 135–142.
- PhaseOne (2017): [www.phaseone.com/de-DE/Products/Software/Capture-One-Pro/Highlights.aspx](http://www.phaseone.com/de-DE/Products/Software/Capture-One-Pro/Highlights.aspx), letzter Zugriff 27.12.2017.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 51–66.
- Przybilla, H.-J.; Kraft, T.; Geßner, M.; Zurhorst, A. (2017): Untersuchungen und erste Ergebnisse zur geometrischen Qualität marktgängiger Kameras für den UAV-Einsatz. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische

3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Wichmann – VDE Verlag, S. 235–246.

Przybilla, H.-J.; Reuber, C.; Bäumker, M.; Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 24, S. 45–54.

Wikipedia (2017): Industriemuseum Zeche Zollern, Dortmund-Bövinghausen. [https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche\\_Zollern](https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche_Zollern), letzter Zugriff 27.12.2017.

## Kontakt

Heinz-Jürgen Przybilla | Manfred Bäumker | Johannes Vieten

Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie

Lennershofstraße 140, 44801 Bochum

[heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de](mailto:heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de)

[manfred.baeumker@hs-bochum.de](mailto:manfred.baeumker@hs-bochum.de)

[johannes.vieten@hs-bochum.de](mailto:johannes.vieten@hs-bochum.de)



# Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge

Maren Lindstaedt | Thomas P. Kersten

## 1 Einführung

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), Unmanned Aerial Systems (UAS) oder Remotely-Piloted Aerial Systems (RPAS) haben sich als unbemannte Flugsysteme mit Kameras und anderen Sensoren ausgestattet wegen des flexiblen Einsatzes seit einigen Jahren für viele unterschiedliche Anwendungen in der Vermessung etabliert. Durch diese unbemannten Systeme ist die Lücke zwischen Luftaufnahmen mit Flugzeug oder Helikopter und Aufnahmen vom Boden gerade für Areale kleinerer bis mittlerer Größe (einige 10 ha) geschlossen worden. Je nach Zuladungsgewicht können die Flächen- bzw. Starr- oder Rotorflügler als Aufnahmesensoren leichte Laserscanner, kostengünstige Kompaktkameras, Systemkameras, digitale Spiegelreflexkameras oder hochwertige Mittelformatkameras transportieren. Eine Marktübersicht über Kameras für UAVs gibt Przybilla (2017). Für die Bestimmung der Bildorientierungen und der Kamerakalibrierung durch digitale Aerotriangulation sind bei höheren Genauigkeitsanforderungen 3D-Passpunkte erforderlich, wenn die Orientierungsparameter der Bilder durch entsprechende hochwertige Sensorik nicht direkt während des Bildfluges bestimmt werden können, was bei low-cost bzw. Konsumer-UAVs meistens der Fall ist.

Erste Bildflüge mit digitalen Still Video Kameras wurden bereits Mitte der 1990er Jahre durchgeführt. Über den Einsatz einer digitalen hochauflösenden Still Video Kamera Kodak DCS200 bei einem Bildflug in einem Kleinflugzeug berichten Fraser und Shortis (1995). Ein Luftbildstreifen von sechs Bildern (Bildmaßstab 1:40.000, Überdeckung 60 %) wurde mit einem 28 mm Objektiv aus einer Höhe von 1.150 m über einer Kleinstadt im Bundesstaat Victoria (Australien) aufgenommen. Die Signalisierung der Passpunkte war 1 m × 1 m groß, was im Bild einer Größe von 3 × 3 Pixeln entsprach. In der Aerotriangulation wurde eine praktische Genauigkeit aus Vergleich mit GPS bestimmten Kontrollpunkten von 1,7 m in der Lage und in der Höhe erreicht.

Im Rahmen einer Pilotstudie des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich wurde eine Kodak DCS200 bei einem Bildflug in einem Helikopter über der Gemeinde Urmein (Kanton Graubünden, Schweiz) für photogrammetrische Punktbestimmung durch digitale Aerotriangulation

eingesetzt (Kersten 1996). Für den Luftbildverband von 50 Bildern (Bildmaßstab 1:20.000, Längs- und Querüberdeckung von 60 %) wurde eine praktische Genauigkeit von  $s_{xy} = 2 \text{ cm}$  und  $s_z = 4 \text{ cm}$  für die signalisierten GPS-Kontrollpunkte bestimmt.

Ende der 1990er Jahre wurden digitale Aerotriangulationen trotz manueller Passpunktmeßungen im Bild durch die automatische Punktübertragung sehr effizient. Kersten (1999) stellte eine angepasste und erweiterte Methode einer digitalen Aerotriangulation mit dem Helava Automated Triangulation System (HATS) am Beispiel einer Luftbildverbandes über die gesamte Schweiz vor, in der der Datenfluss und die Qualitätskontrolle durch zusätzliche Softwareentwicklungen weitestgehend automatisiert wurden. Von Oktober 1995 bis Juli 1998 wurde der Block Schweiz mit mehr als 6.000 gescannten Bildern einer kalibrierten analogen Luftbildkamera, bei denen der Bildmaßstab zwischen 1:22.000 und 1:54.000 variierte, in 43 Subblöcken bei Swissphoto Vermessung AG trianguliert. Es zeigte sich bei der digitalen Aerotriangulation über die ganze Schweiz deutlich, dass die Produktionsrate (zwischen 9 und 38 Minuten je Bild) sehr vom Geländetyp und der Blockkonfiguration abhing.

Das geometrische Potenzial digitaler groß- und mittelformatiger Luftbildkameras, auch unter Berücksichtigung der direkten Sensororientierung durch GNSS und inertialer Messeinheit, wurde im Rahmen eines Tests der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) untersucht (Jacobsen et al. 2010). Die Ergebnisse wurden von einer Gruppe wissenschaftlicher Mitarbeiter verschiedener Universitäten mit unterschiedlichen Datenerfassungsprogrammen, Bündelblockausgleichungsprogrammen, Konfigurationen der Ausgleichungen (z. B. mit/ohne Verwendung von Projektionszentrumskoordinaten und Richtungsinformation aus GNSS/inertialen Systemen) und unterschiedlicher Passpunktkonfiguration erzeugt. Diese Ergebnisse geben einen Überblick über die Variation der Lösungen und Genauigkeiten, wie sie auch in operationeller Anwendung gegeben ist. Für UAV-basierte Bildflüge veröffentlichten Przybilla et al. (2015) und Gerke und Przybilla (2016) Untersuchungsergebnisse, in denen der Einfluss verschiedener Bildflugparameter (Aufnahmekonfiguration, Einsatz von Realtime-kinematischem (RTK) GNSS und Passpunktkonfigurationen) verglichen wird (siehe auch Kap. 2).

In diesem Beitrag werden Aerotriangulationen mit Bilddaten von drei verschiedenen Luftbildverbänden in Äthiopien und auf der Osterinsel ([Abb. 4](#)), die mit low-cost UAVs in den Jahren 2015 bis 2017 beflogen wurden, unter dem Aspekt verschiedener Passpunktkonfigurationen und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse vorgestellt. Zusätzlich wird der Einfluss des Rolling-Shutter-Effektes der eingesetzten Kompakt- bzw. Systemkamera auf die Ergebnisse der Aerotriangulation aufgezeigt.

## 2 Passpunkte

In der Photogrammetrie werden Passpunkte für die Bestimmung der Orientierungsparameter eines Messbildes verwendet. Es handelt sich dabei um Punkte im Gelände, deren 3D-Koordinaten in einem entsprechenden Objektkoordinatensystem (z. B. Landeskoordinatensystem) bekannt sind und die in einem

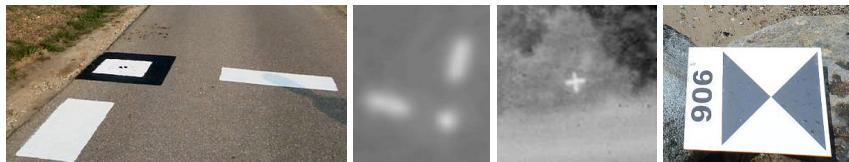
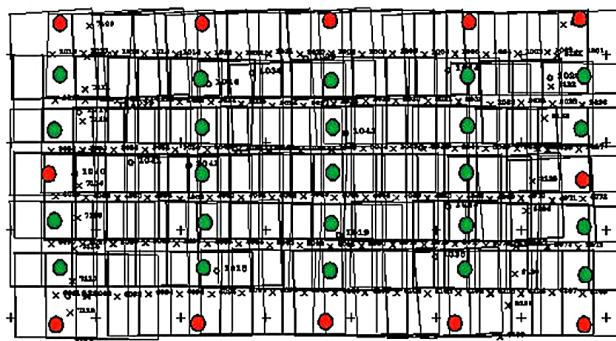


Abb. 1: Signalisierte Passpunkte im Gelände (links und rechts) und im Luftbild (Mitte)

Aufnahmen eindeutig zu identifizieren und zu messen sind. Dabei unterscheidet man in Vollpasspunkte, bei denen die Raumkoordinaten X, Y und Z bekannt sind, Lagepasspunkte, bei denen die Lagekoordinaten X und Y bekannt sind und Höhenpasspunkte, bei denen nur die Höhenkoordinate Z bekannt ist. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen für die photogrammetrische Bestimmung von 3D-Objektpunkten und/oder der Bildorientierungsparameter müssen die 3D-Passpunkte vor dem Bildflug im Gelände signalisiert werden. Die Signalisierung der Passpunkte kann durch Aufmalen von entsprechender Farbe oder durch Auslegen von markierten Zielzeichen erfolgen (Abb. 1). Es können auch eindeutig identifizierbare Punkte im Gelände nach dem Bildflug durch geodätische Messverfahren (Tachymetrie oder GNSS) als Passpunkte bestimmt werden, wenn keine sehr hohe Genauigkeit bei der Aerotriangulation gefordert wird.

Da die Signalisierung und Bestimmung der Passpunkte zeitaufwändig und damit kostenintensiv ist, muss man sich bei der Projektplanung überlegen, welche Sensorik beim Bildflug eingesetzt wird bzw. eingesetzt werden kann und wie viele Passpunkte für den aufzunehmenden Bildverband erforderlich sind. Abb. 2 zeigt beispielhaft einen Luftbildverband von 108 Bildern (6 Flugstreifen mit je 18 Bildern), bei dem insgesamt 12 Vollpasspunkte (rot) und 23 Höhenpasspunkte (grün) zur Stützung des Bildverbandes verwendet wurden. Daraus wird empfohlen, dass ein Passpunktabstand von 6 bis 8 Bildbasen (Abstand zwischen zwei Projektionszentren) in Streifenrichtung für digitale Kameras realisiert werden sollte, wenn die Sensororientierung nicht direkt mit guter Genauigkeit durch GNSS und inertialer Messeinheit gemessen werden kann.

Es stellt sich dennoch die Frage, ob eine Aerotriangulation ohne Passpunkte möglich ist? Jacobsen (1997) veröffentlichte die Ergebnisse einer Blocktriangulation ohne Passpunkte, bei der eine Genauigkeit von 20 cm für die 3D-Punktbestimmung mit einem GPS-unterstützten Luftbildverband (6 Flugstreifen mit

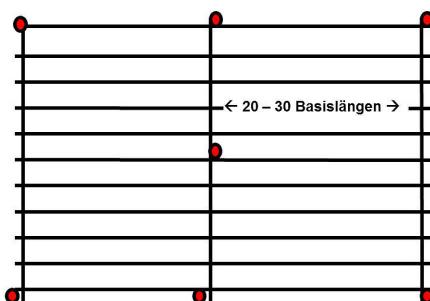
**Abb. 2:**

Beispiel eines Luftbildverbandes mit entsprechender Passpunktkonfiguration: 108 Bilder – 12 Vollpasspunkte (rot) + 23 Höhenpasspunkte (grün)

einem mittleren Bildmaßstab von 1:2.100) erreicht wurde. Eine Kontrolle der Ergebnisse ist dadurch jedoch nicht gewährleistet.

Przybilla et al. (2015) und Gerke und Przybilla (2016) zeigen den Einfluss verschiedener Befliegungsparameter auf die Qualität von zwei UAV-Bildflügen, die mit einem Starrflügler (Flächenflieger) MAVinci SIRIUS PRO ausgeführt wurden. Dabei führte die Erweiterung des Bildflugs durch zusätzliche Aufnahmen einer Kreuzbefliegung (Querstreifen) trotz gleichzeitiger signifikanter Reduktion der Passpunkte zu Genauigkeitssteigerungen. Die mittels RTK-GNSS direkt gemessenen Positionsparameter der Äußeren Orientierungen führten zu einer weiteren Qualitätsverbesserung im Luftbildverband. Ähnlich positive Auswirkungen sind bei der Simultankalibrierung der Kamera erkennbar.

Aus Gründen der Zuverlässigkeit sollte bei einem GNSS-gestützten UAV-Bildflug nicht komplett auf Pass- bzw. Kontrollpunkte verzichtet werden. Nur anhand dieser Punkte können während der Auswertung kritische Qualitätskontrollen durchgeführt werden. Daher empfiehlt sich für einen GNSS-gestützten UAV-Bildflug eine Aufnahme- und Passpunktkonfiguration wie in Abb. 3 dargestellt.

**Abb. 3:**

Empfohlene Passpunktkonfiguration für GNSS-gestützten Bildflug mit zusätzlichen Querstreifen und sieben Vollpasspunkten (rot)

### 3 Die eingesetzten UAV-Systeme

Für die Bildflüge der Testbildverbände in Äthiopien wurde das low-cost UAV DJI Phantom 3 Advanced mit einer festinstallierten Kamera eingesetzt, das seit April 2015 im Markt verfügbar ist und eine Weiterentwicklung der Vorgängermodelle DJI Phantom 2 und Phantom 2 VISION+ darstellt. Die wichtigen technischen Daten der DJI Phantom 3 Advanced und der dazugehörigen Kamera sind in [Tab. 1](#) und [Tab. 2](#) zusammengefasst.

Bei der Speicherung der Fotos im Bildformat JPEG wird bei der DJI Phantom 3 automatisch eine werkseitig vorkonfigurierte Korrektur der radial-symmetrischen Verzeichnung angebracht, die jedoch nicht die realen systematischen Abbildungsfehler beschreibt (Przybilla et al. 2017). Eine Speicherung der Fotos im Format DNG (RAW) ist während des Flugbetriebs nur mit Einschränkungen in der Anzahl Fotos möglich, da eine Datenspeicherung ca. 7 s je Foto braucht und damit die Fluggeschwindigkeit enorm reduziert wird. Zudem ist in

**Tab. 1:** Technische Daten der DJI Phantom 3 Advanced

Gewicht (mit Akku & Propellern)	1.280 g	
Diagonale Größe (ohne Propeller)	350 mm	
Max. Geschwindigkeit (Steig/Sink)	5 m/s / 3 m/s	
Max. Geschwindigkeit (kein Wind)	16 m/s	
Max. Höhe über NN (6000 m)	120 m über Startpunkt	
Betriebstemperatur	0 bis 40 °C	
Positionsbestimmung	GPS/GLONASS	
Max. Flugzeit	ca. 23 Minuten	

**Tab. 2:** Technische Daten der Kamera

Sensor Sony Exmor	1/2.3" CMOS, eff. Pixel: 12,4 MP	
Sensorformat, Pixel	6,16 mm × 4,62 mm, 1,54 µm	
Objektiv/Brennweite	FOV 94°, 4 mm, f/2.8 Fokus auf ∞	
ISO-Empfindlichkeit	100–1.600	
Elektr. Verschluss	8 s bis 1/8.000 s	
Max. Bildgröße	4.000 × 3.000 Pixel	
Betriebstemperatur	0 bis 40 °C	
Bildformat	JPEG, DNG (RAW)	

der verwendeten Pix4D Capture App nur die Möglichkeit zur JPEG-Aufnahme gegeben.

Das Aufnahmegerät der Quebrada Vaipu auf der Osterinsel (Chile) wurde mit einer digitalen Systemkamera Sony Alpha Nex-5R ( $c = 16$  mm), die an einem MikroKopter ARF OktoXL von der Firma HiSystems GmbH, Moormerland befestigt war, geflogen. Die technischen Daten der CMOS-Systemkamera sind in Przybilla (2017: 58) zusammengefasst. Der für diese Untersuchungen verwendete Bildverband Vaipu wurde bereits in Kersten und Lindstaedt (2016) vorgestellt.

Viele Spiegelreflexkameras, Kompakt- und Systemkameras sowie proprietäre Kameras mit CMOS-Sensoren, die auf UAV-Systemen eingesetzt werden, verwenden einen Rolling Shutter (rollenden Verschluss), um eine bessere Qualität der Fotos zu erhalten und um die Bewegungsunschärfe (motion blur) zu reduzieren. Bei einem Sensor mit Rolling Shutter werden die Pixel zeilen- oder spaltenweise nacheinander belichtet, wobei eine Bildperiode (1/Bildfrequenz) benötigt wird, bis alle Pixel auf dem Sensor aktiv bzw. lichtempfindlich sind. Dieser Effekt wird als Bildverzerrung sichtbar, wenn ein Objekt oder die Kamera sich während der Aufnahme bewegt (Luhmann 2018: 221). Da sich das UAV während der Aufnahme bewegt, entstehen durch die zeilenhafte Bildauslesung vertikale Verschiebungen im Bild, die einige Pixel betragen können. Jede ausgelernte Bildzeile besitzt somit eine eigene äußere Orientierung. Die Bildausleesezeit bei der Phantom 3 beträgt 33 Millisekunden (Pix4D 2017a). Bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 8 m/s in einer Flughöhe von 50 m über Grund erhält man eine Verschiebung von 14 Pixeln durch den Rolling-Shutter-Effekt. Während der Bildausleesezeit hat sich die Phantom 3 bei der Geschwindigkeit um 26,4 cm weiter bewegt. Der Effekt kann mathematisch modelliert und durch zusätzliche Parameter in der Bündelausgleichung kompensiert werden. Der Einfluss von CMOS-Kameras mit Rolling-Shutter-Verschluss wurde für photogrammetrische Einzel- und Mehrbilddauswertungen im Nahbereich (Rofaltski und Luhmann 2017) und für die 3D-Punktbestimmung mit Bilddaten von UAV-Systemen (Vautherin et al. 2016) untersucht und dokumentiert. Eine Korrektur des Rolling-Shutter-Effekts wurde bereits in photogrammetrische Software wie Pix4Dmapper 2.1 und Agisoft PhotoScan 1.3 implementiert, um dadurch den Einsatz von low-cost und light-weight UAVs für professionelle 3D-Mapping-Anwendungen zu verbessern. Anmerkungen und Empfehlungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAV-Photogrammetrie geben Cramer und Leinss (2016).

## 4 Photogrammetrische Software Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan ist eine preiswerte 3D-Rekonstruktionssoftware von der Firma Agisoft LLC ([www.agisoft.ru](http://www.agisoft.ru)) in St. Petersburg, Russland, die genaue texturierte 3D-Modelle unter Verwendung digitaler Fotos von Szenen automatisch erstellt. Das Programm liefert robuste Bildorientierungen mit und ohne kodierte Zielmarken und ohne spezielle Bildaufnahmeverbedingungen. PhotoScan (aktuelle Version 1.4) kann für 179 US-Dollar als preiswerte Standardausgabe oder als professionelle Version für 3.499 US-Dollar gekauft werden. Die meisten der folgenden Ergebnisse in diesem Beitrag sind mit der professionellen Version 1.3.5 erstellt worden. Dieses Programm ist unter Windows-Betriebssystemen ausführbar, d.h. alle mit dieser Software erstellten Daten bleiben auf dem lokalen PC des Anwenders. Die Vorteile von PhotoScan können wie folgt zusammengefasst werden: (a) sehr einfacher Workflow mit Option zur Automation durch Batch-Prozessierung, (b) schnelle Berechnungen mit CPU und GPU, (c) genaue interaktive Bildpunktmeßungen von Maßstäben und Passpunkten (nur in Professional Version), (d) Bildorientierung und Kamerakalibrierung durch Bündelblockausgleichung inklusive optionaler Korrektur um den Rolling-Shutter-Effekt, (e) Modellierung der inneren Orientierung der Kamera(s) durch verschiedene Parameter (Bildhauptpunkt, Kamerakonstante, sieben radial-symmetrische und tangentiale Verzeichnungsparameter, Affinität und Scherung zwischen x- und y-Achse) sowie (f) verschiedene Exportmöglichkeiten der Ergebnisse. Als Nachteile ergeben sich vor allem begrenzte Eingriffsmöglichkeiten durch den Nutzer. Die Ausgaben und Dokumentationen der Ergebnisse sind beschränkt und nur begrenzt aussagekräftig.

## 5 Testblöcke Äthiopien und Osterinsel

Für die Untersuchungen über den Einfluss von Passpunktconfigurationen und vom Rolling-Shutter-Effekt auf die Ergebnisse der Aerotriangulationen wurden zwei Testblöcke aus Äthiopien verwendet, die mit dem low-cost UAV DJI Phantom 3 Advanced geflogen wurden. Die Befliegungen erfolgten für das Deutsche Archäologische Institut (Außenstelle Sana'a der Orient-Abteilung), um die archäologischen Untersuchungsgebiete großräumig zu dokumentieren. Ein dritter Testblock wurde auf der Osterinsel (Chile) vom archäologischen Untersuchungsgebiet in der Quebrada Vaipu mit dem MikroKopter ARF OktoXL ebenso für das Deutsche Archäologische Institut (Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen in Bonn) aufgenommen. Die Lage der drei Luftbildverbände ist in Abb. 4 dargestellt und deren technischen Daten sind in Tab. 3 zusammengefasst.

**Tab. 3:** Technische Daten der Luftbildverbände

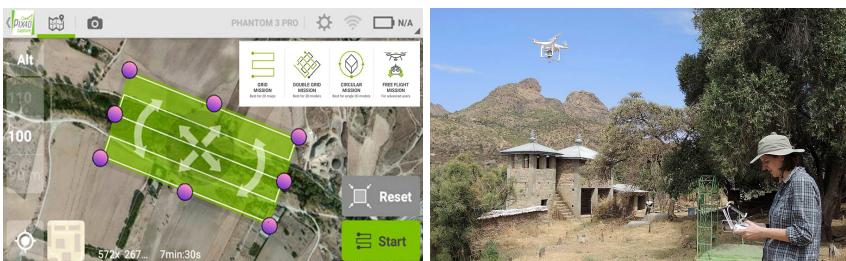
Gebiet	Flug-datum	FD [min]	# SB	# S	# F	ØFH [m]	ØV [m/s]	# PP
Wuqro	24.02.17	28	3	21	502	30	3,9	34
Melazo	31.10.17	43	3	36	824	35	4,5–6	62
Vaipu	20.03.15	40	1	5	431	31	2,9	15

FD: Flugdauer, SB: Subblöcke, S: Streifen, F: Fotos, FH: Flughöhe, V: Fluggeschwindigkeit, PP: Passpunkte

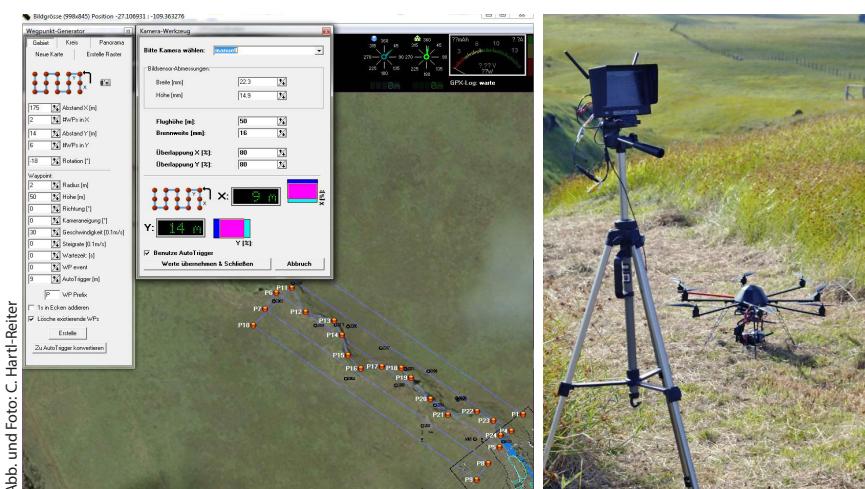
**Abb. 4:** Geografische Lage der Testblöcke in Nordäthiopien (li.) und auf der Osterinsel (re.)

Die Aufnahmen der UAV-Bildflüge mit der DJI Phantom 3 wurden alle mit der App Pix4Dcapture (Android-Version) auf einem Tablet gesteuert (**Abb. 5**). In dieser App können Einstellungen gemacht werden hinsichtlich der Fluggeschwindigkeit, der Überlappung und der Blickrichtung der Kamera. Die meisten Einstellungen bezüglich der Kamera werden in der App allerdings automatisch gesetzt und können nicht weiter ausgewählt werden. Die Fokussierung wird bei fast allen UAV-Kameras auf unendlich gesetzt, die Blende und Belichtungszeit sowie der Weißabgleich werden aus der DJI Go App (nur auf Android-Systemen) übernommen (Pix4D 2017b). Diese Einstellung zum Weißabgleich hat allerdings nicht immer konstant funktioniert und zu Farbabweichungen der Bilder untereinander innerhalb eines Bildfluges geführt (siehe **Abb. 7** und **Abb. 10**). Das gewünschte Flugareal kann über ein Rechteck bzw. ein Polygon auf der Karte bzw. im Satellitenbild definiert werden (**Abb. 5** links), inzwischen lässt sich auch ein in Google Earth Pro erstelltes kml/kmz-file importieren.

Für den Bildflug mit dem MikroKopter ARF OktoXL wurde die Bildflugplanungssoftware von HiSystems GmbH verwendet (**Abb. 6**). Die Start- und Endpunkte sowie Richtung der Flugstreifen wurden über Wegpunkte festgelegt. Der Flug wurde auf einem Monitor im Feld beobachtet und überprüft.



**Abb. 5:** Bildflugplanungssoftware von Pix4D für die Phantom 3 Advanced (links) und UAV-System in Äthiopien im Einsatz (rechts)



**Abb. 6:** Bildflugplanungssoftware (links) und MikroKopter ARF OktoXL auf der Osterinsel im Einsatz

## 6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Aerotriangulationen von den drei Testblöcken Wuqro und Melazo (beide Äthiopien) sowie Vaipu (Osterinsel, Chile) zusammengefasst. Da die beiden eingesetzten UAV-Systeme keine RTK-GNSS-Lösung aufweisen, wurden alle Luftbildverbände über signalisierte Passpunkte orientiert und georeferenziert. Für alle Blöcke wurden jeweils Aerotriangulationen mit allen Passpunkten und mit einer ausgewählten minimalen Passpunktkonfiguration in Agisoft PhotoScan gerechnet. Bei der jeweils minimalen Passpunktversion sind die nicht genutzten Passpunkte als Kontrollpunkte zur Bestimmung der empirischen Genauigkeit verwendet worden. Zusätzlich

wurde für jede Aerotriangulation jeweils eine Version ohne und mit Korrektur (Kompensation) des Rolling-Shutter-Effektes gerechnet, so dass für jeden Testblock vier verschiedene Versionen der Ergebnisse vorlagen. In den folgenden Abbildungen sind die Punktfehler (3D-Raumvektoren) als Ergebnis der Wurzel aus der Summe der Quadrate für die Abweichungen für jeden Pass- bzw. Kontrollpunkt in X, Y und Z dargestellt. In Tab. 4, 5 und 6 sind neben den Passpunktresiduen die Abweichungen der Kontrollpunkte zu den Referenzwerten aus den Tachymettermessungen als empirische Genauigkeit zusammengefasst.

## 6.1 Testblock Wuqro

Der Bildflug für den Testblock Wuqro, ca. 35 km nordöstlich von der Stadt Mek'ele im Norden von Äthiopien gelegen, wurde am 24.2.2017 in 28 Minuten in einer durchschnittlichen Höhe von ca. 30 m mit der Phantom 3 Advanced durchgeführt. Der Testblock besteht aus drei Subblöcken, 21 Flugstreifen und insgesamt 502 Luftbildern, in denen 34 Passpunkte signalisiert und im Objektraum gut verteilt waren (Abb. 7). Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit betrug 3,9 m/s. Die Passpunkte wurden mit einer Totalstation durch polares Anhängen von bekannten Standpunkten mit einer Genauigkeit von 2 cm bestimmt.

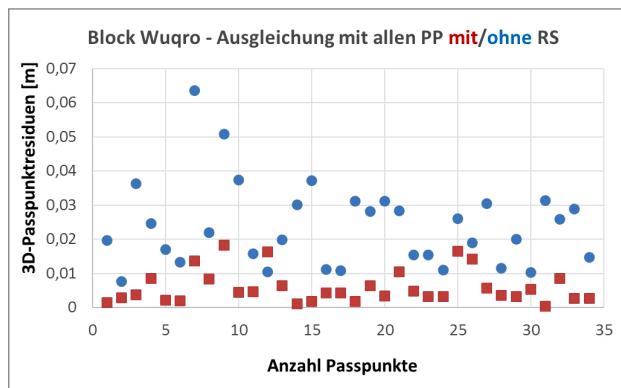


**Abb. 7:** Passpunktverteilung im Testblock Wuqro – alle Passpunkte (blaue Fähnchen) und gewählte minimale Passpunktkonfiguration (rote Kreise)

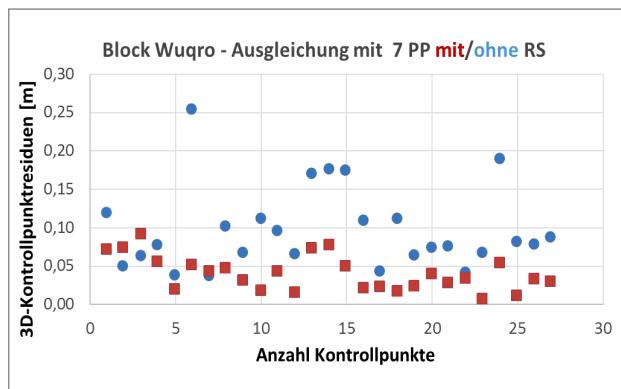
**Tab. 4:** Ergebnisse der Ausgleichungen des Testblocks Wuqro

V	# PP/KP	$\bar{\theta}$ 3D PF [cm]	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\mu_X$ [cm]	$\mu_Y$	$\mu_Z$	$\mu_{max}$
1	34/0	2,37	1,25	1,20	0,94	–	–	–	–
2 RS	34/0	0,59	0,46	0,24	0,09	–	–	–	–
3	7/27	9,62	4,36	2,56	1,56	5,94	4,70	3,35	22,29
4 RS	7/27	3,92	0,68	0,48	1,16	1,68	0,80	3,13	8,23

V: Version, RS: Korrektur Rolling-Shutter-Effekt, PP: Passpunkte, KP: Kontrollpunkte, PF: Punktfehler,  $\Delta XYZ$ : PP-Residuen,  $\mu XYZ$ : empirische Genauigkeit der Kontrollpunkte



**Abb. 8:** Punktfehler der Passpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Wuqro mit allen Passpunkten in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt



**Abb. 9:** Punktfehler der Kontrollpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Wuqro mit sieben Passpunkten (minimale Konfiguration) in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

Der gemittelte Punktfehler der Passpunkte beträgt nach der Bündelausgleichung mit allen Passpunkten 2,4 cm, der durch die Korrektur des Rolling-Shutter-Effektes noch auf 0,6 cm gesteigert wurde (Tab. 4), was einer Verbesserung um den Faktor 4 entspricht. Die Abb. 8 zeigt eine signifikante systematische Reduktion der Passpunktresiduen (Raumvektoren) auf genauer als 2 cm durch die Kompensation um den Rolling-Shutter-Effekt. Die Ausgleichung der minimalen Passpunktkonfiguration mit der Lagerung des Luftbildverbandes auf insgesamt sieben Passpunkte (rote Kreise in Abb. 7) liefert ein schlechteres Ergebnis, da die empirische Genauigkeit für die 27 Kontrollpunkte auf 5 bis 6 cm für die Lage und 3 cm für die Höhe bestimmt wurde. Die Rolling-Shutter-Korrektur bringt bei der minimalen Passpunktversion eine signifikante Verbesserung der empirischen Genauigkeit in der Lage, während sie in der Höhe gleich bleibt. Die Abb. 9 zeigt auch eine systematische Verbesserung der Genauigkeit, jedoch ist das Niveau etwas schlechter als bei der Ausgleichung mit allen Passpunkten. Für eine Aerotriangulation mit einem UAV-gestütztem Luftbildverband ist das erreichte Ergebnis sehr gut.

## 6.2 Testblock Melazo

Der Testblock Melazo liegt 10 km südwestlich von der Stadt Aksum (Abb. 4 links). Der Luftaufnahmen wurden am 31.10.2017 in drei Subblöcken mit insgesamt 36 Streifen in 43 Minuten ebenso mit der Phantom 3 Advanced gemacht.

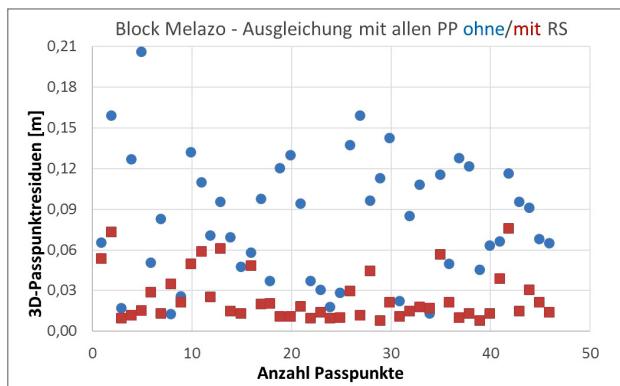


**Abb. 10:**  
Passpunktverteilung im  
Testblock Melazo – alle Pass-  
punkte (blaue Fähnchen) und gewählte  
minimale Passpunktkonfiguration (rote Kreise)

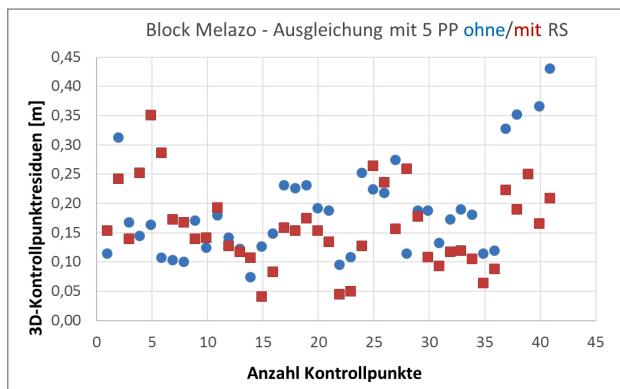
**Tab. 5:** Ergebnisse der Ausgleichungen des Testblocks Melazo (Äthiopien)

V	# PP/KP	$\bar{\theta}$ 3D PF [cm]	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\mu_X$ [cm]	$\mu_Y$	$\mu_Z$	$\mu_{max}$
1	46/0	8,24	5,25	4,34	3,15	–	–	–	–
2 RS	46/0	2,43	0,86	0,96	1,72	–	–	–	–
3	5/41	19,04	9,53	5,75	9,16	8,67	5,63	13,66	41,40
4 RS	5/41	15,80	0,76	0,88	0,23	6,90	5,20	10,97	25,22

V: Version, RS: Korrektur Rolling-Shutter-Effekt, PP: Passpunkte, KP: Kontrollpunkte, PF: Punktfehler,  $\Delta XYZ$ : PP-Residuen,  $\mu XYZ$ : empirische Genauigkeit der Kontrollpunkte



**Abb. 11:** Punktfehler der Passpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Melazo mit allen Passpunkten in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt



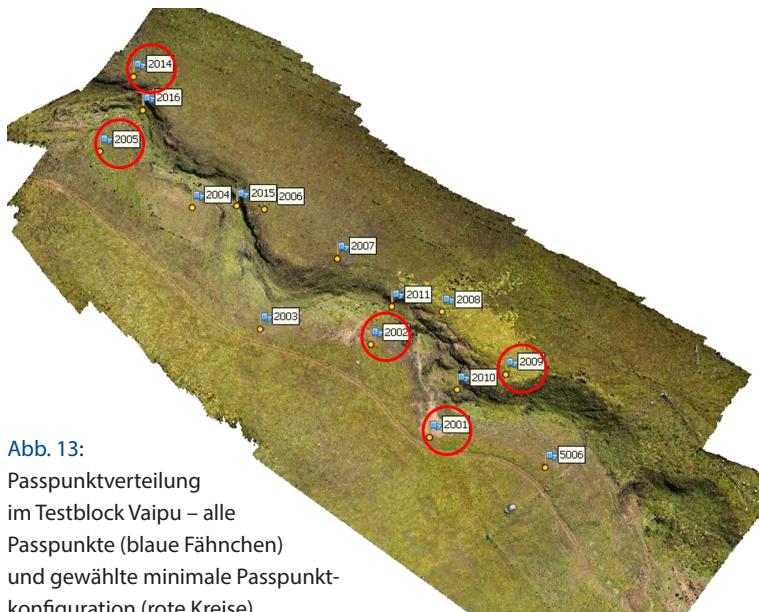
**Abb. 12:** Punktfehler der Kontrollpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Melazo mit fünf Passpunkten (minimale Konfiguration) in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

Die durchschnittliche Flughöhe für die 824 Fotos betrug 35 m, wobei die Fluggeschwindigkeit zwischen 4,5 und 6 m/s variierte ([Tab. 3](#)). Der Bildverband umfasst 62 gut verteilte signalisierte Passpunkte ([Abb. 10](#)), die wie beim Block Wuqro durch eine Totalstation mit einer Genauigkeit von 2 cm bestimmt wurden.

Die Ergebnisse der Aerotriangulationen bestätigen die Resultate mit dem Testblock Wuqro. Die Ausgleichung mit allen Passpunkten liefert grundsätzlich ein besseres Ergebnis als mit der minimalen Passpunktkonfiguration. Die Kompensation um den Rolling-Shutter-Effekt führt in der Bündelausgleichung sowohl für die volle als auch für die minimale Passpunktversion zu höheren Genauigkeiten. Allerdings fallen die Verbesserungen der Genauigkeiten nicht so hoch aus wie beim Block Wuqro. In den [Abb. 11](#) und [Abb. 12](#) können die Verbesserungen für jeden Pass- bzw. Kontrollpunkt direkt verglichen werden. Durch die Rolling-Shutter-Korrektur schwanken die 3D-Abweichungen der Passpunkte zwischen 1 und 7 cm, während die Verteilung der Punktfehler ohne Korrektur wesentlich inhomogener ist und zwischen 1 und 21 cm schwankt ([Abb. 11](#)). Bei der Ausgleichung mit minimaler Passpunktkonfiguration fallen die Verbesserungen bei weitem nicht so signifikant aus (um den Faktor 1,2 besser) wie bei dem Ergebnis mit allen Passpunkten (Steigerung um den Faktor 4). Allerdings sind bei den Kontrollpunkten die maximalen Abweichungen von 41 cm und 25 cm (jeweils der Z-Wert) recht hoch im Vergleich zu den Referenzwerten aus Tachymettermessungen, was sich ggf. auf Fehler bei der Bestimmung einzelner Passpunkte durch die Tachymeter zurückführen lässt.

### 6.3 Testblock Vaipu

Der Testblock Vaipu befindet sich in der Mitte der Osterinsel auf ca. 290 m Höhe unterhalb des Vulkans Ma'unga Terevaka (511 m) in der Quebrada Vaipu ([Abb. 4](#)) und ist eine schmale Schlucht eines meistens trockenen Flusslaufes ([Abb. 13](#)). Der Bildflug wurde am 20.3.2015 in 40 Minuten in einer durchschnittlichen Höhe von 31 m über Grund mit einem Mikrokopter durchgeführt. Der Flusslauf wurde mit fünf parallel angeordneten Fluglinien (Senkrechtaufnahmen) und mit zwei Fluglinien als Schrägaufnahmen jeweils parallel zu den Hängen des Flussbettes beflogen. Insgesamt wurden 431 Luftbilder erfasst, in denen 15 Passpunkte signalisiert und im Objektraum gut verteilt sind ([Abb. 13](#)). Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit betrug hier nur 2,9 m/s, so dass die Auswirkung des Rolling Shutters auf die Bildaufnahme mit der Sony NEX 5R eher gering eingeschätzt wird. Die Passpunkte wurden für den Testblock Vaipu mit einer Leica-Totalstation innerhalb eines geodätischen 3D-Netzes mit einer Genauigkeit von 2 cm bestimmt.

**Abb. 13:**

Passpunktverteilung  
im Testblock Vaipu – alle  
Passpunkte (blaue Fähnchen)  
und gewählte minimale Passpunkt-  
konfiguration (rote Kreise)

Die Ergebnisse der Aerotriangulationen mit dem Block Vaipu bestätigen die Resultate der beide Testblöcke Wuqro und Melazo, denn die Ausgleichung mit der vollen Passpunktversion erreicht wiederum ein besseres Ergebnis als mit der minimalen Passpunktkonfiguration (rote Kreise in Abb. 13). Die Kompensation um den Rolling-Shutter-Effekt führt in der Bündelausgleichung auch hier sowohl für die volle (Faktor 1,4) als auch für die minimale Passpunktversion (Faktor 2,1) zu höheren Genauigkeiten. Allerdings ist die Genauigkeitssteigerung deutlich geringer als bei den anderen beiden Blöcken, was eventuell auf den anderen CMOS-Sensor und auf die geringere Fluggeschwindigkeit zurückgeführt werden kann. In den Abb. 14 und Abb. 15 können die Verbesserungen für jeden Pass- bzw. Kontrollpunkt direkt verglichen werden. Die durchschnittliche empirische Genauigkeit konnte anhand der Kontrollpunkte in der Lage gar nicht (ca. 3 cm) und in der Höhe von 6 cm auf 4 cm gesteigert werden.

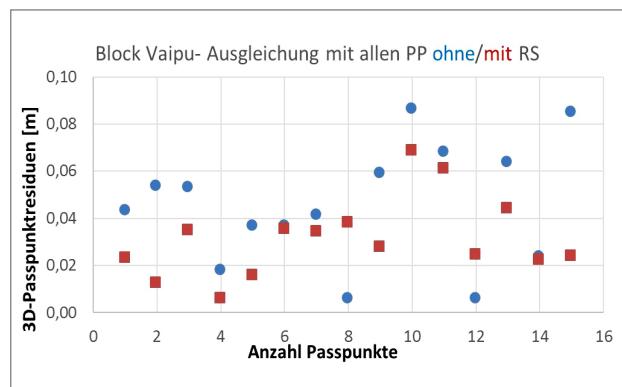
#### 6.4 Auswirkungen auf Berechnungen von Oberflächenmodellen

Um die Auswirkungen der Passpunktkonfigurationen auf die Berechnung von digitalen Oberflächenmodellen zu zeigen, wurden für die Blöcke Wuqro und Melazo jeweils das Oberflächenmodell mit allen Passpunkten und mit der jeweils minimalen Passpunktkonfiguration in Agisoft PhotoScan berechnet. Der

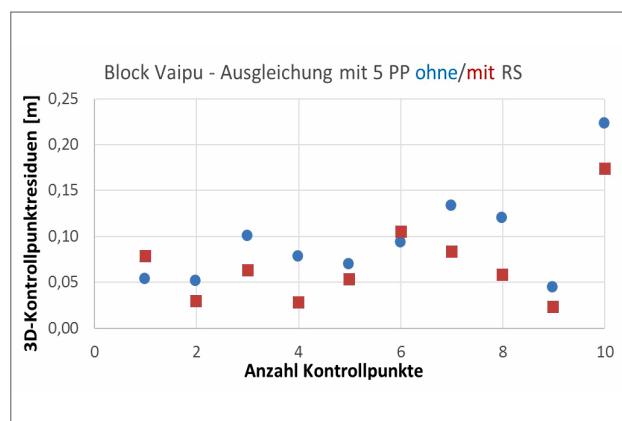
**Tab. 6:** Ergebnisse der Ausgleichungen des Testblocks Vaipu (Osterinsel)

V	# PP/KP	$\text{Ø}3\text{D PF}$ [cm]	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\mu X$ [cm]	$\mu Y$	$\mu Z$	$\mu_{\text{max}}$
1	15/0	4,53	2,12	2,09	2,73	–	–	–	–
2 RS	15/0	3,14	1,31	1,54	1,89	–	–	–	–
3	5/10	8,28	1,18	2,57	4,39	3,06	2,50	6,11	21,39
4 RS	5/10	3,92	0,59	2,02	1,63	2,48	3,05	4,18	12,89

V: Version, RS: Korrektur Rolling-Shutter-Effekt, PP: Passpunkte, KP: Kontrollpunkte, PF: Punktfehler,  $\Delta XYZ$ : PP-Residuen,  $\mu XYZ$ : empirische Genauigkeit der Kontrollpunkte



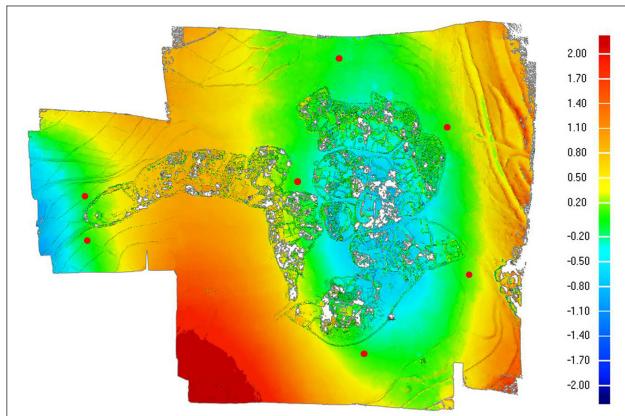
**Abb. 14:**  
Punktfehler der Passpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Vaipu (Osterinsel) mit allen Passpunkten in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt



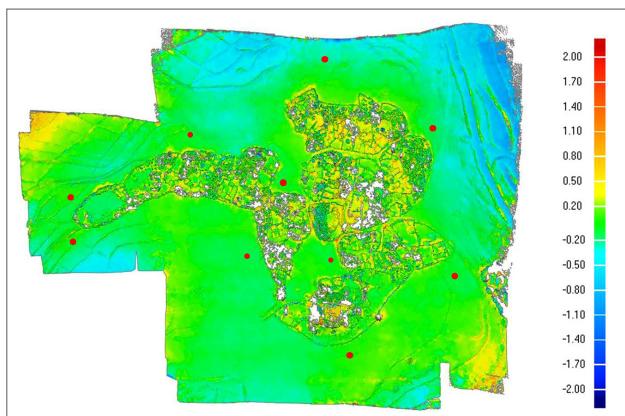
**Abb. 15:**  
3D-Punktfehler der Kontrollpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Vaipu (Osterinsel) mit fünf Passpunkten (minimale Konfiguration) in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

3D-Vergleich, der mit der Software Geomagic berechnet wurde, zeigt die Abweichungen zwischen beiden Versionen farbkodiert ([Abb. 16](#)). Die grünen Bereiche stellen Abweichungen von -20 cm bis +20 cm zwischen beiden Oberflächenmodellen dar, d.h.in diesen Bereichen zeigt sich der positive Einfluss der verwendeten Passpunkte auf das Ergebnis. Blaue Bereiche stellen eine Wölbung nach unten und orange bis rote Bereiche eine Wölbung nach oben dar, hier sind die Distanzen zwischen zwei Passpunkten zu groß. Ergänzt man den Block um drei weitere Passpunkte ([Abb. 17](#)), so können die Deformationen – innerhalb eines gewissen Genauigkeitsniveaus – beseitigt werden.

In [Abb. 18](#) (links) ist ein 3D-Vergleich zwischen den beiden Oberflächenmodellen, die mit der Version aus allen Passpunkten und ganz ohne Passpunkte berechnet wurden. Die farbkodierten Abweichungen zeigen eindeutig eine starke West-Ost-Kippung des Modells ohne Passpunkte gegenüber dem Modell mit



**Abb. 16:**  
3D-Vergleich der  
Oberflächenmo-  
delle im Testblock  
Wuqro – Version  
mit allen Pass-  
punkten vs. minimale  
Passpunktkonfigu-  
ration (7 PP)



**Abb. 17:**  
3D-Vergleich der  
Oberflächenmo-  
delle im Testblock  
Wuqro – Version  
mit allen Pass-  
punkten vs. 10 Pass-  
punkte

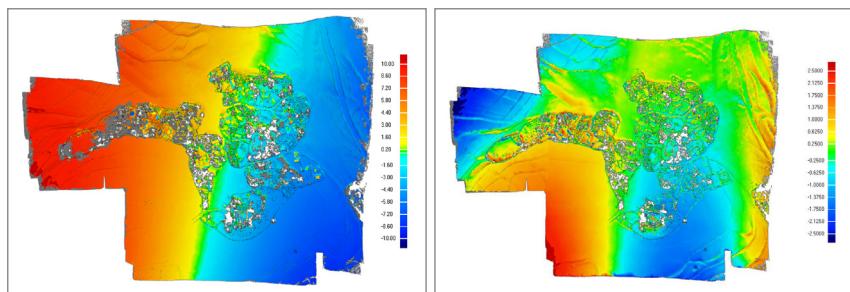


Abb. 18: 3D-Vergleich der Oberflächenmodelle im Testblock Wuqro – Version mit allen Passpunkten vs. ohne Passpunkte (links) und als Best-Fit-Anpassung zur Elimination der Verkippung

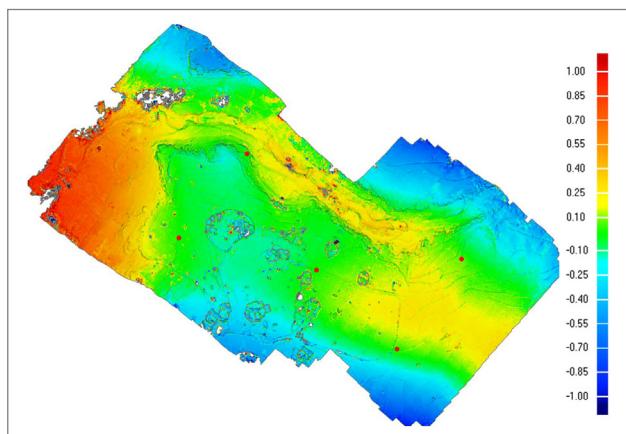


Abb. 19:  
3D-Vergleich der  
Oberflächenmo-  
delle im Testblock  
Melazo – Version  
mit allen Passpunk-  
ten vs. minimale  
Konfiguration  
(5 PP – rote Punkte)

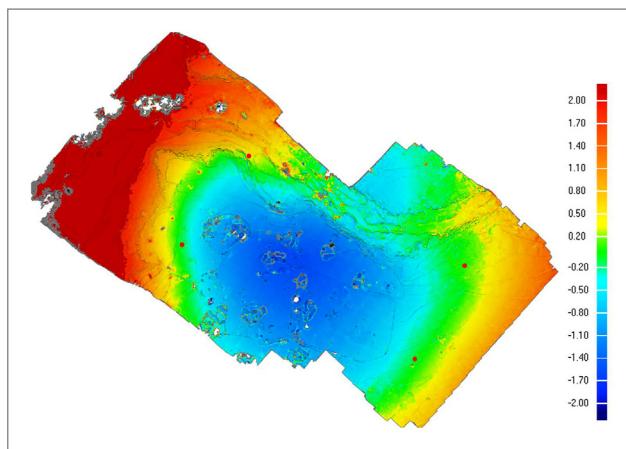


Abb. 20:  
3D-Vergleich der  
Oberflächenmod-  
le im Testblock Me-  
lazo – Version mit  
allen Passpunkten  
vs. vier Passpunkte  
(rote Punkte) nach  
Entfernung des  
Passpunktes in  
der Blockmitte –  
Ergebnis negative  
Wölbung des Ober-  
flächenmodells

allen Passpunkten von hoch (links) nach tief (rechts) auf. Aber selbst wenn man diese absolute Verkippung ignoriert und nur einen 3D-Vergleich der Geometrie an sich durchführt ([Abb. 18](#) rechts), so ist eine große Deformation innerhalb des Blockes von mehreren Metern zu erkennen.

Im Vergleich zu dem Ergebnis vom Testblock Wuqro zeigt der 3D-Vergleich zwischen den beiden Oberflächenmodellen vom Block Melazo, die mit der Version aus allen Passpunkten und mit der minimalen Passpunktanzahl berechnet wurden, ein etwas besseres Resultat ([Abb. 19](#)). Hier werden die Abweichungen außerhalb des Passpunktrahmens (Umhüllende der vier ausgewählten äußeren Passpunkte in der minimalen Konfiguration, siehe [Abb. 10](#)) erwartungsgemäß deutlich größer, innerhalb des Passpunktrahmens sind die Abweichungen größtenteils nicht höher als  $\pm 20$  cm. Entfernt man jedoch den einen Passpunkt in der Mitte des Gebietes, so ist auch hier deutlich eine Durchbiegung (blaue Fläche in der Mitte des Modells) von mehr als einem Meter zu erkennen ([Abb. 20](#)).

## 7 Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen zu den Auswirkungen von verschiedenen Passpunktkonfigurationen bei UAV-gestützten Bildflügen zeigen deutlich, wie wichtig Passpunkte und deren optimale Verteilung im Objektraum für eine genaue Bildorientierung und 3D-Punktbestimmung durch Bündelblockausgleichung sind, wenn keine präzisen direkt gemessenen Bildorientierungen (direkte Georeferenzierung) durch RTK-GNSS (mit Zwei-Frequenz-Empfängern) verfügbar sind. Genauigkeiten von besser als 3 cm in Lage und Höhe der Pass- oder Kontrollpunkte sind heute bei Aerotriangulationen von Bildflügen, die mit low-cost UAV-Systemen aufgenommen wurden, möglich. Sind die Abstände zwischen den Passpunkten größer als zehn Bildbasen, so treten bei UAV-Bildflügen ohne RTK-GNSS deutliche Deformationen innerhalb des Blockes durch Wölbung im Oberflächenmodell auf. Je nach geforderter Genauigkeit sollten diese Aspekte bei der Passpunktverteilung bereits im Rahmen der Bildflugplanung berücksichtigt werden. Gruen und Runge (1988) zeigten in Untersuchungen mit zwei Luftbildverbänden, dass man die Anzahl der Passpunkte auf das absolute Minimum von einem reduzieren könnte, wenn man die Bildorientierungen mit genügender Genauigkeit messen kann. Przybilla et al. (2015) wiesen in empirischen Untersuchungen nach, dass die mittels RTK-GNSS gemessenen Bildorientierungsparameter eine Reduktion der Anzahl von Passpunkten auf vier Passpunkte erlauben, ohne eine signifikante Qualitätsverschlechterung im Block zu erhalten. Bildflüge mit Kreuzbefliegung (Querstreifen) und mit Aufnahmen aus verschiedenen Höhen und Perspektiven (schräg) unterstützen eine zuverlässige Simultankalibrierung der zumeist unkalibrierten

UAV-Kameras. Die aus dem bemannten Bildflug generierten Erfahrungen und die daraus abgeleitete Expertise der Luftbildphotogrammetrie aus Zeiten vor der direkten Georeferenzierung haben somit heute auch für Bildflüge mit low-cost UAVs noch Gültigkeit und sollten berücksichtigt werden.

In den vorgestellten Untersuchungen hat sich auch gezeigt, dass durch die Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes bei CMOS-Sensoren das Ergebnis der Aerotriangulation verbessert wird. Es wird vermutet, dass die Stärke der Kompensation auch abhängig von der Anzahl und Verteilung der Passpunkte und von der Geländetopographie ist. Diese Annahme muss jedoch noch durch zusätzliche empirische Untersuchungen verifiziert werden, um die Auswirkungen des Rolling-Shutter-Effektes besser verstehen und abschätzen zu können.

## Dank

Wir bedanken uns für die gute Zusammenarbeit und Projektunterstützung in Äthiopien bei Frau Dr. Iris Gerlach (Außenstelle Sana'a der Orient-Abteilung, Deutsches Archäologisches Institut) und auf der Osterinsel bei Dr. Burkhard Vogt (Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen, Deutsches Archäologisches Institut in Bonn). Dipl.-Ing. Christian Hartl-Reiter (Landesarchäologie Mecklenburg-Vorpommern) danken wir für die UAV-Aufnahmen auf der Osterinsel (Chile).

## Literatur

- Cramer, M.; Leinss, B. (2016): Welche ist am besten? – Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasytemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 97–118.
- Fraser, C. S.; Shortis, M. R. (1995): Metric exploitation of still video imagery. *The Photogrammetric Record*, 15(85), S. 107–122.
- Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, (1), S. 17–30.
- Gruen, A.; Runge, A. (1988): The accuracy potential of self-calibrating aerial triangulation without control. *The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 27, S. 245–253.
- Jacobsen, K. (1997): Operational block adjustment without control points. *ASPRS Annual Convention*, 2, S. 238–244.
- Jacobsen, K.; Cramer, M.; Ladstädter, R.; Ressl, C.; Spreckels, V. (2010): DGPF-project: evaluation of digital photogrammetric camera systems – geometric performance. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, (2), S. 83–97.
- Kersten, T. (1996): Aerotriangulation mit einer digitalen Stillvideo Kamera Kodak DCS200. *VPK – Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, Nr. 2, S. 70–74.

- Kersten, T. (1999): Digitale Aerotriangulation über die ganze Schweiz. VPK – Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 9, S. 473–478.
- Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2016): Auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 135–158.
- Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2017): Photogrammetrie auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 1/2017, 142. Jg., S. 3–13.
- Luhmann, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Beispiele. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann, VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach, 783 S.
- Passini, R.; Jacobsen, K. (2009): Accuracy and radiometric study on very high resolution digital camera images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(1-4-7/W5).
- Pix4D (2017a): Innovation – Improved Accuracy for Rolling Shutter Cameras in Pix4Dmapper. <https://pix4d.com/rolling-shutter-correction>, letzter Zugriff 30.12.2017.
- Pix4D (2017b): (Android and iOS) Camera settings in Pix4Dcapture. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203204339#gsc.tab=0>, letzter Zugriff 8.1.2018.
- Przybilla, H.-J.; (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 51–66.
- Przybilla, H.-J.; Kraft, T.; Gessner, M.; Zurhorst, A. (2017): Untersuchungen und erste Ergebnisse zur geometrischen Qualität marktgängiger Kameras für den UAV-Einsatz. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 235–245.
- Przybilla, H.-J.; Reuber, C.; Bäumker, M.; Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 24, S. 45–54.
- Rofalski, R.; Luhmann, T. (2017): Untersuchung und Modellierung des Rolling-Shutter-Effekts für photogrammetrische Einzel- und Mehrbildauswertungen. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 388–398.
- Vautherin, J.; Rutishauser, S.; Schneider-Zapp, K.; Choi, H.F.; Chovancova, V.; Glass, A.; Strecha, C. (2016): Photogrammetric Accuracy and Modeling of Rolling Shutter Cameras. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 3(3), S. 139–146.

## Kontakt

Maren Lindstaedt | Thomas P. Kersten

HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning  
Überseeallee 16, 20457 Hamburg

[maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de](mailto:maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de) | [thomas.kersten@hcu-hamburg.de](mailto:thomas.kersten@hcu-hamburg.de)



## **Session 3: Kataster, Küste & Katastrophe - Erfahrungen aus der Praxis**



# UAV für das Kataster – das EU-Projekt its4land

Markus Gerke | Claudia Stöcker | Sophie Crommelinck | Mila Koeva

## 1 Einleitung

In vielen Ländern fehlt es an einer funktionierenden, rechtssicheren Dokumentation des Eigentums an Grund und Boden. Existierende, oftmals bereits auf IT-Infrastruktur basierende Werkzeuge, erfüllen nicht die Erwartungen: die Registrierung ist nicht vollständig, Konflikte werden nicht gelöst, unter anderem mit der Folge, dass Investitionen – sowohl im Privatbereich, wie auch auf kommunaler oder nationaler Ebene – behindert werden. Diese Beobachtung kann in vielen Regionen gemacht werden, so auch im subsaharischen Afrika (Zevenbergen et al. 2013).

In dem von der EU im Rahmen des Horizon 2020-Programms geförderten Projektes „its4land“<sup>1</sup> wird ein ganzheitlicher Ansatz zur Implementierung eines neuen Systems zur Dokumentation und Registrierung von Landrechten in Ostafrika verfolgt (Bennett et al. 2017). Das Ziel ist es, im Wesentlichen Werkzeuge zu entwerfen, mit denen es möglich sein wird, schnell, kostengünstig, einfach und nachhaltig jegliche Art von Rechten an Grund zu registrieren. Unter Einbeziehung aller wesentlichen Interessengruppen werden innovative Verfahren, basierend auf neuester Technologie entwickelt, u.a.: Einsatz von Flugrobotern (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs), automatische Extraktion sichtbarer Landgrenzen, Kartierung mit Hilfe einfacher Skizzen (Sketchmaps), internetbasierte Datenverwaltung und nicht zuletzt die Einbindung in formale Registrierungsprozesse. Die Kombination aus „top-down“-Prozessen (aus Sicht der Verwaltung) und „bottom-up“ (ausgehend von einer Kommunikation mit den einzelnen lokalen Gemeinden) wird als Schlüssel zum Erfolg gesehen (Enemark et al. 2014). Die afrikanischen Partner in diesem Projekt kommen aus Äthiopien (Bahir Dar Universität), Ruanda (Institut d’Enseignement Supérieur de Ruhengeri-INES und ESRI) und Kenia (Technische Universität von Kenia). Auf Europäischer Seite sind die Universität Twente (NL), WWU Münster (D), KU Leuven (B) und die Firma Hansa Luftbild (D) involviert.

In diesem Beitrag soll über den aktuellen Zwischenstand des Projektes berichtet werden, wobei der Fokus auf den UAV-basierten Erfassungsmethoden liegt. Im nächsten Kapitel werden daher zunächst die rechtlichen Rahmenbedingungen bewertet, denn es zeigt sich, dass häufig weniger technische als vielmehr

1 <https://its4land.com>

administrative Hürden vor dem Einsatz eines UAV zu nehmen sind. Ein Ziel des Projektes ist die kostengünstige und schnelle Erfassung von hochauflösenden Luftbildern. Diesem Ziel steht ein aufwendiger Einsatz von Kontrollpunkten entgegen. Daher berichten wir im dritten Kapitel über unsere Erfahrungen mit der auf der PPK-Technologie (Post-Processing Kinematik) basierender Georeferenzierung von UAV-Bildverbänden. Im vierten Kapitel schließlich wird über unseren Ansatz zur automatisierte Ableitung von (sichtbaren) Grundstücksgrenzen berichtet.

## 2 Bestandsaufnahme: UAV-Regularien weltweit

Um UAVs zur Datenerfassung für die Katasterkartenerstellung anwenden zu können, müssen UAV-basierte Bildflüge seitens der nationalen Gesetzgebung entweder rechtlich erlaubt oder – bei fehlender Regulierung – geduldet werden. Hierbei handelt es sich um eine kritische und oftmals unterschätzte Voraussetzung, die im schlechtesten Fall die Datenerhebung mit UAVs verhindern kann. Dieser Fakt motivierte die wissenschaftliche Untersuchung des aktuellen Status von UAV-Regularien auf globaler Ebene (Stöcker et al. 2017a). Diese Forschungssynthese basiert auf einer umfangreichen Literaturrecherche, sowie einer vergleichenden Analyse von 19 repräsentativen UAV-Regularien. Im Wesentlichen zielen entsprechende Regularien auf das Management von Risiken und der Minimierung von wahrgenommenen Schäden ab. Hierbei konzentriert sich die Gesetzgebung auf die folgenden drei Hauptaspekte: (1) Nutzung des Luftraums durch UAVs; (2) Auferlegung von flugbetrieblichen Einschränkungen; (3) administrative Verfahren für Fluggenehmigungen, Pilotenlizenzen und der Schutz von Daten, sowie persönlichen Informationen. Nachdem im Jahr 2002 sowohl Großbritannien als auch Australien als Pioniere UAV-Regularien in Kraft gesetzt haben, folgten andere Ländern schrittweise. In diesem Zusammenhang ist in den letzten fünf Jahren ein deutlicher Anstieg der amtlich bekanntgegebenen Gesetze zu verzeichnen.

Detaillierte Informationen über den aktuellen Stand von UAV-Regularien sind unter anderem auf der Webseite „*Global Drone Regulations Database*“<sup>2</sup> ersichtlich. *Dronerules*<sup>3</sup> verweist auf eine weitere, gerade im Aufbau befindliche Informationsquelle mit einem Europäischen Fokus. Wie in Abb. 1 zu erkennen ist, waren im Oktober 2016 in 65 Ländern Gesetze für die Nutzung von UAVs vorhanden. Weitere 15 Länder befanden sich zu dem Zeitpunkt in der Gesetzesentwurfsphase.

2 [www.droneregulations.info](http://www.droneregulations.info)

3 <http://dronerules.eu/de>

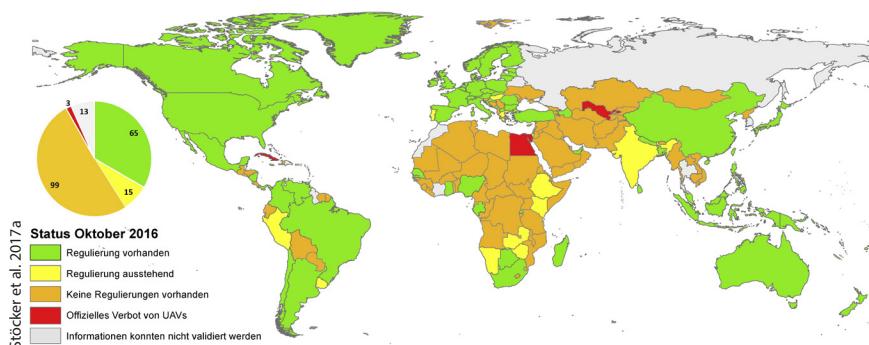


Abb. 1: Globale Übersicht über den Status von UAV-Regulierungen – Stand 10/2016

Obwohl alle UAV-Regularien ein gemeinsames Ziel – die Minimierung der Risiken für andere Luftraumnutzer, sowie Menschen und Eigentum vor Ort – verfolgen, besteht dennoch eine ausgeprägte Heterogenität zwischen den nationalen Regularien. Die größten Unterschiede treten im Zusammenhang von Qualifikationsnachweisen von UAV-Piloten und Bewerbungsverfahren für Fluggenehmigungen auf. Allerdings konnten auch Gemeinsamkeiten, wie einheitliche Flugbetriebseinschränkungen, obligatorische Plattformregistrierung und verpflichtender Versicherungsschutz als richtungsgebende Inhalte für ausgereifte (inter)ationale UAV-Regularien aufgezeigt werden.

Internationale Dialoge, sowie technische Weiterentwicklungen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit die Basis zukünftiger rechtlicher Rahmen für harmonisierte Regulierungsstandards schaffen. Neben der Präsenz von Gesetzen und Marktkräften wird es jedoch auch ein hohes Maß an Aufklärungs- und Bewusstseinsförderungsmaßnahmen in der Gesellschaft erfordern, um das große Potenzial von UAV-basierter Datenaufnahme erfolgreich zu nutzen.

### 3 Direkte Georeferenzierung: Erfahrungswerte mit PPK

Um UAVs auch für Datenerfassungsprojekte größerer Flächen effektiv nutzen zu können, ist es erforderlich, nach Alternativen zum zeitintensiven Einmessen von Bodenreferenzpunkten zu suchen. In den letzten Jahren hat sich die UAV-Technologie sowohl in Bezug auf Hardwarekomponenten als auch auf verfügbare Software stark verändert. Unter anderem ermöglichen hochwertige Kreiselsysteme (Inertial Measurement Units, IMU) und verbesserte GNSS-Technologie präzise Messungen der äußeren Orientierungsparameter. Diese hochgenaue Abschätzung kann entweder simultan (RTK – Real Time Kinematik) oder während der Datennachbereitung (PPK – Post-Processing Kinematik) erreicht wer-

**Tab. 1:** Charakteristika der unterschiedlichen Szenarien

Szenario	Input Daten ÄO	ÄO Parameter: Gewichtung während der Bildorientierung		GCPs	CPs
		X, Y, Z	$\Omega, \Phi, K$		
S 1	–	–	–	18	4
S 2	–	–	–	4	18
S 3	Rohdaten	hoch	gering	4	18
S 4	Rohdaten	hoch	hoch	4	18
S 5	PPK	hoch	gering	4	18
S 6	PPK	hoch	hoch	4	18
S 7	PPK	hoch	gering	0	22
S 8	PPK	hoch	hoch	0	22

den und erlaubt die direkte Georeferenzierung der aufgenommenen Bilddaten. Während der positive Einfluss der präzisen GNSS-Koordinaten der Kamerapositionen bereits umfangreich untersucht worden ist (Gerke und Przybilla 2016, Rehak und Skaloud 2016), wurde der Einfluss der Winkelbeobachtungen bisher nur wenig evaluiert.

Im Rahmen des Projektes its4land wurde daher ein Testflug über einem 1 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsgebiet im Kreis Coesfeld (Nordrhein-Westfalen) durchgeführt, für Details siehe Stöcker et al. (2017b). Als UAV diente der Starrflügler DT18 PPK (DelairTech), welcher mit dem qualitativ hochwertigen IMU/GNSS Gerät APX-15 (Trimble) ausgestattet ist. Mit einer Flugdauer von bis zu einer Stunde ist diese UAV ideal, um große Gebiete zu befliegen. Die Bilddaten wurden mit unterschiedlichen Parametereinstellungen und Referenzpunkt-Szenarien prozessiert. Die erreichte horizontale, sowie vertikale Genauigkeit galt als Evaluationskriterium.

Wie in Tab. 1 ersichtlich, umfasst die Studie verschiedene Berechnungsszenarien, in denen sowohl die Gewichtung der hinzugezogenen Parameter der äußeren Orientierung (ÄO) als auch die Anzahl an Passpunkten (GCPs) und Kontrollpunkten (CPs) variiert. Mit diesem Setup werden in der Ergebnisauswertung sowohl die indirekte Georeferenzierung (S1, S2) als auch kombinierte Lösungsansätze (S3, S4, S5, S6) und die direkte Georeferenzierung (S7, S8) berücksichtigt. Die Ergebnisse in Tab. 2 zeigen, dass unter Verwendung der mittels PPK errechneten äußeren Orientierungsparameter die Qualität der Bildorientierung deutlich verbessert werden kann. Beim Vergleich von S5 zu S6 bzw.

**Tab. 2:** Statistische Auswertung der Kontrollpunktresiduen der X, Y und Z Koordinaten.  
Das schlechteste (S2) und beste Ergebnis (S5) ist fett hervorgehoben.

	Mittelwert (m), Standardabweichung (s)	X	Y	Z
S 1	m [m]	0.084	0.269	1.512
	s [m]	0.187	0.429	3.040
S 2	m [m]	<b>-0.242</b>	<b>-0.055</b>	<b>-9.284</b>
	s [m]	<b>1.646</b>	<b>1.062</b>	<b>10.757</b>
S 3	m [m]	0.124	0.042	0.107
	s [m]	0.122	0.156	0.362
S 4	m [m]	-0.075	1.072	0.696
	s [m]	1.113	0.816	0.560
S 5	m [m]	<b>0.001</b>	<b>0.008</b>	<b>0.033</b>
	s [m]	<b>0.032</b>	<b>0.024</b>	<b>0.152</b>
S 6	m [m]	-0.757	0.571	0.492
	s [m]	1.159	0.948	0.549
S 7	m [m]	0.217	0.186	0.053
	s [m]	0.034	0.028	0.148
S 8	m [m]	0.156	0.502	0.727
	s [m]	1.225	0.955	0.244

S7 zu S8 ist erkennbar, dass die Winkelparameter zu ungenau sind, um während der Bildorientierung mit einem hohen Gewicht berücksichtigt zu werden.

Detaillierte Untersuchungen der äußeren Orientierungsparameter verweisen auf eine ungenaue Kalibrierung des Kamera-Antennen-Verschiebungsvektors, welche sich als systematischer Fehler auswirkt. Die Kontrollpunktresiduen von S5 zeigen, dass dieser Versatz durch die Einführung von nur vier GCPs größtenteils kompensiert wird: horizontale Genauigkeiten im Bereich der Bodenauflösung (ca. 3 cm) können erreicht werden. Durch die Minimierung der erforderlichen Passpunkte reduziert die Verwendung von PPK-Korrekturen den Zeitaufwand der Datenakquise im Vergleich zur klassischen Methode der indirekten Georeferenzierung erheblich. Großräumige UAV-Datenerfassungsprojekte werden somit ökonomisch attraktiver und praktisch leichter umsetzbar.

## 4 Automatisierte Ableitung von sichtbaren Landgrenzen

Hinsichtlich der Auswertung der von UAV erfassten Bilddaten für die Erfassung von Katastergrenzen finden sich bereits einige Arbeiten in der Literatur wie zum Beispiel Manyoky et al. (2011), Jazayeri et al. (2014) oder Mumbone et al. (2015).

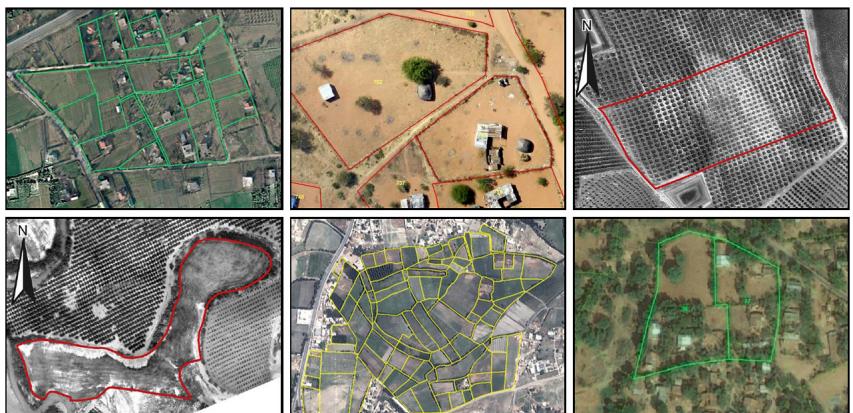


Abb. 2: In verschiedenen Studien von Luftbildern abgeleitete Katastergrenzen

Anhand der Luftbilder mit hoher Auflösung lassen sich visuell erkennbare Katastergrenzen digitalisieren. Die Annahme, dass ein Großteil an Landgrenzen visuell erkennbar ist, variiert jedoch stark je nach Gebiet (Zevenbergen und Bennett 2015). Katastergrenzen sind menschenerdachte Grenzen, die in vielen Gebieten entlang von Objekten, wie Straßen, Hecken, Baumreihen, Wegen, Feldern oder Flüssen verlaufen (Abb. 2).

Crommelinck et al. (2016) bieten einen Überblick über den bisherigen wissenschaftlich dokumentierten Einsatz von UAVs zur Erstellung von Katasterkarten. Viele der in unterschiedlichen Kontexten verwendeten Objekte zur Erkennung von Katastergrenzen wurden mittels Methoden der Bildanalyse bereits erfolgreich extrahiert. Dies geschah jedoch kaum für UAV-basierte Katasterkartenerstellung, sondern auf Basis anderer Luftbild-Daten oder für ein anderes Anwendungsgebiet. Crommelinck et al. (2016) stellen verschiedene Methoden vor, die in diesem Zusammenhang in 89 Studien eingesetzt wurden und leiten daraus eine generelle Abfolge von Methoden ab, mit deren Hilfe oben genannte Objekte automatisiert aus UAV-Daten extrahiert werden können (Abb. 3). Die automatisierte Erkennung von Katastergrenzen zielt darauf ab, die Kartenerstellung transparenter, kostengünstiger und effektiver im Hinblick auf Personal- und Kostenaufwand zu gestalten.

Im Anschluss an die zuvor beschriebene theoretische Herangehensweise an das Thema, wurden auf Basis der in Abb. 3 gezeigten Abfolge, entsprechende Ansätze für das Anwendungsbereich der automatisierten Ableitung von Katastergrenzen von UAV-Bildverbänden gesucht. Da UAVs eine neue Plattform der Datenaufnahme darstellen, ist für viele Methoden der herkömmlichen Bild-

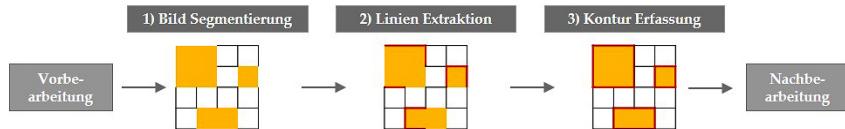


Abb. 3: Abfolge von Methoden der Bildanalyse, um Objekte zu extrahieren, die Katastergrenzen in Luftbildern markieren.

analyse deren Übertragbarkeit auf UAV-Daten nicht gewährleistet, beziehungsweise kaum untersucht.

Wie in Abb. 3 dargestellt, bedarf es einer Koppelung verschiedener Methoden, um komplexe Objekte aus Luftbildern zu extrahieren. Entsprechend wurden verschiedene Ansätze auf ihre Anwendbarkeit innerhalb eines der in Abb. 3 dargestellten Blocks hin getestet. Für Bild-Segmentierung zeigte die Methode „globalized probability of boundary (gPb)“ (Arbelaez et al. 2011) vielversprechende Ergebnisse. Die Methode kombiniert Kantendetektion mit einer hierarchischen Bildsegmentierung. Zunächst wird das Bild, wie für eine Kantendetektion üblich, auf Gradienten hinsichtlich Farbe, Helligkeit und Textur hin untersucht. Allerdings werden diese Gradienten im Gegensatz zu klassischen Ansätzen der Kantendetektion mit globalen, für das gesamte Bild errechneten Werten, verglichen. Durch maschinelles Lernen haben die Entwickler der Methode Grenzwerte festgelegt, ab denen ein lokaler Gradient im Vergleich zu den globalen Werten als bedeutend bewertet wird. Pixel mit entsprechend ähnlicher Bewertung werden auf Basis einer hierarchischen Herangehensweise zu Segmente zusammengefasst (Abb. 4).

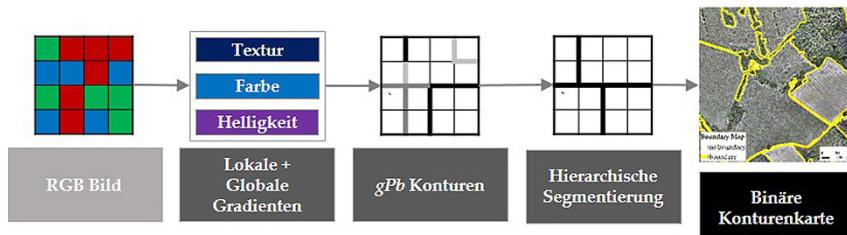
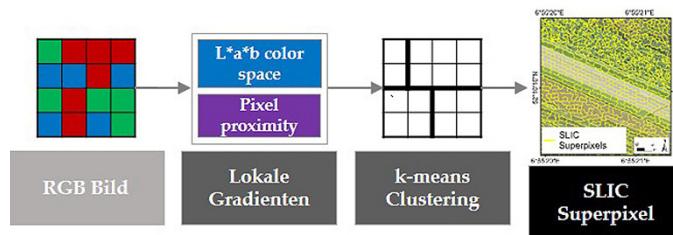


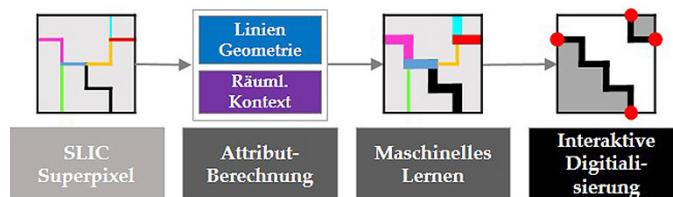
Abb. 4: Methode zur initialen Bild-Segmentierung (gPb). Die Übertragbarkeit für UAV-basierte Objekterkennung wurde in Crommelinck et al. (2017a) gezeigt.

Durch die Einbeziehung globaler Bildinformationen ist die Übertragbarkeit auf UAV-Daten, die üblicherweise eine hohe Auflösung und somit eine große Anzahl an Pixeln besitzen, eingeschränkt. Dies lässt sich durch eine Reduzierung der Auflösung umgehen, allerdings zu Lasten eines weniger genauen Ergebnisses. Diese Genauigkeit zu verbessern, ist das Ziel der darauffolgend angewandten Methode: „Simple linear iterative clustering (SLIC)“ (Ren und Malik, 2003). Diese Methode gruppiert Pixel ähnlicher Farbe zu homogenen Gruppen von sogenannten Superpixeln. Die Homogenität bezieht sich hierbei auf Form und Größe der resultierenden Superpixel (Abb. 5). Studien haben gezeigt, dass die Grenzen dieser Superpixel oftmals anhand der Grenzen der Objekte im Bild verlaufen (Neubert und Protzel 2012, García-Pedrero et al. 2017).

Entsprechend der in Abb. 3 dargestellten Abfolge fehlt nun ein Ansatz, der das Ergebnis der Bild-Segmentierung und der Linien-Extraktion miteinander verbindet und daraus geschlossene und topologisch korrekte Konturen generiert, die als Katastergrenzen verwendbar sind. Da Katastergrenzen wie eingangs



**Abb. 5:** Methode zur Linien-Extraktion (SLIC). Die Übertragbarkeit für UAV-basierte Objekterkennung wurde in Crommelinck et al. (2017b) gezeigt.



**Abb. 6:** Methode zur Kontur-Erfassung. Superpixel Kanten werden geteilt, sobald mehrere Kanten zusammenkommen (Linienfarbe).

Pro Kante werden Attribute berechnet, die durch maschinelles Lernen zu einem Wahrscheinlichkeitswert kumuliert werden (Liniendicke).

Durch den Benutzer gesetzte Knotenpunkte werden anhand des Pfades der höchsten Wahrscheinlichkeiten verbunden.

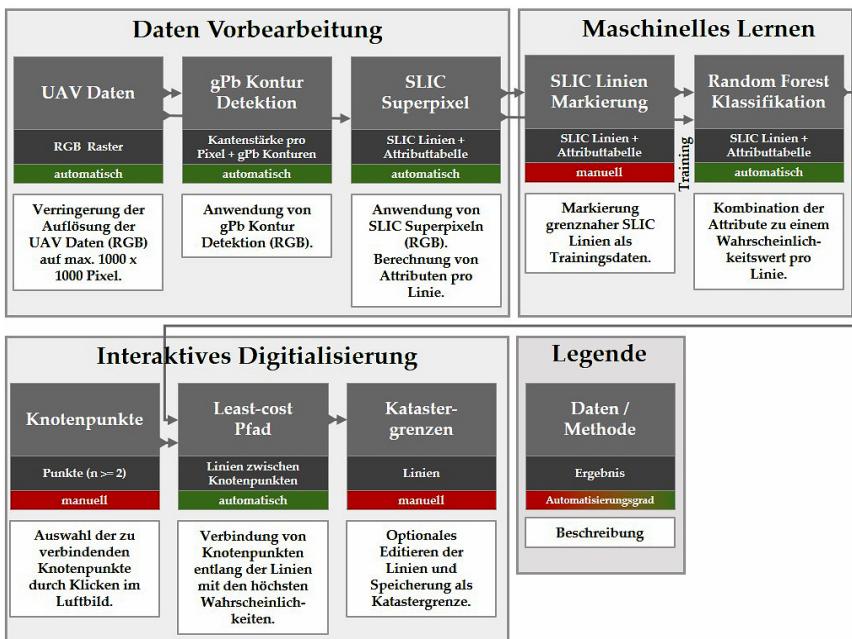


Abb. 7: Praktische Umsetzung der in Abb. 3 gezeigten theoretischen Abfolge von Methoden

erwähnt, kontext-spezifisch unterschiedlich aussehen, erscheint ein vollständig automatisiertes Verfahren zu deren Extraktion wenig sinnvoll. Die Kombination der zuvor automatisch extrahierten Objektkanten sollte daher auch Wissen über Charakteristika lokaler Katastergrenzen mit einbeziehen. Dies geschieht durch Ansätze des maschinellen Lernens (Abb. 6). Die Idee ist es, Informationen zur Lage, Form und Relation der zuvor extrahierten Linien, gemeinsam mit entsprechenden Bild- und Höhenwerten an eine Klassifikationsverfahren zu übergeben. Dieses lernt anhand von Trainingsdaten, welche Kombination an Informationen dazu führt, dass eine Linie mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Katastergrenze gehört. Diese Linien werden dann verwendet, um vom Nutzer gewählte Knotenpunkte im Bild zu verbinden. Der Algorithmus sucht dabei den Pfad entlang der Linien mit den höchsten Wahrscheinlichkeitswerten. Dieser so ermittelte Pfad wird dem Nutzer gezeigt mit der Option zur Annahme, Editierung oder Ablehnung, bevor er als Katastergrenze gespeichert wird. Der interaktive Teil ist als frei verfügbares QGIS<sup>4</sup>-Plugin implementiert. Abb. 7 zeigt die gesamte Abfolge der zuvor beschriebenen Methoden.

4 [www.qgis.org](http://www.qgis.org) und <http://plugins.qgis.org/plugins/BoundaryDelineation>

Nach erfolgreicher Entwicklung eines Prototyps soll dieser hinsichtlich seiner Anwendbarkeit speziell in den am Projekt its4land teilnehmenden Ländern getestet werden. Potenzial zur Anwendung ergibt sich für Gebiete, in denen ein Großteil der Katastergrenzen visuell erkennbar ist und in denen neue Konzepte zur Erstellung von Katasterkarten akzeptiert sind und gefordert werden.

## 5 Zusammenfassung

Dieser Artikel gibt einen Überblick über UAV-basierte Arbeiten innerhalb des Horizon 2020-Projektes its4land. Das Gesamtprojekt hat zum Ziel, einen umfassenden und effizienten, auf moderner Informationstechnologie basierenden Ansatz zur rechtssicheren Dokumentation von Rechten an Grund und Boden zu implementieren. Klassische Vermessungsmethoden erfüllen in sich rasch entwickelnden Ländern nicht den Anspruch an Effizienz. UAV-basierte photogrammetrische Methoden wurden als ein Mittel zur Erfassung von Parzellen identifiziert und die damit verbundenen Fragestellungen werden in Arbeitspaketen von its4land behandelt. Hinsichtlich der rechtlichen Rahmenbedingungen wurde eine sehr heterogene Gesetzeslage dokumentiert; diese erschwert u. U. den Einsatz erheblich. Aus technischer Sicht helfen moderne Verfahren zur genauen Sensororientierung die Anzahl der benötigten Bodenpaßpunkte zu minimieren. Schließlich zeigen unsere Arbeiten, dass eine zumindest teilautomatisierte Erfassung von sichtbaren Parzellengrenzen möglich ist.

## Dank

Die hier beschriebene Forschungsarbeit wird gefördert im Rahmen des Horizon 2020-Programms der Europäischen Union; Projektnummer 687828.

## Literatur

- Arbelaez, P.; Maire, M.; Fowlkes, C.; Malik, J. (2011): Contour detection and hierarchical image segmentation. In: Pattern Analysis and Machine Intelligence, 33, S. 898–916.
- Bennett, R.; Gerke, M.; Crompvoets, J.; Ho, S.; Schwering, A.; Chipofya, M.; Schultz, C.; Zein, T.; Biraro, M.; Alemie, B.; Wayumba, R.; Kundert, K.; Crommelinck, S.; Stöcker, C. (2017): Building Third Generation Land Tools: Its4land, Smart Sketchmaps, UAVs, Automatic Feature Extraction, and the GeoCloud. In: Proceedings of the Annual World Bank Conference on Land and Poverty, March 20-24, Washington D.C., United States.

- Crommelinck, S.; Bennett, R.; Gerke, M.; Koeva, M.; Yang, M. Y.; Vosselman, G. (2017b): SLIC Superpixels for Object Delineation from UAV Data. In: International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-2(W3), S. 9–16.
- Crommelinck, S.; Bennett, R.; Gerke, M.; Nex, F.; Yang, M.; Vosselman, G. (2016): Review of automatic feature extraction from high-resolution optical sensor data for UAV-based cadastral mapping. In: *Remote Sensing*, 8(8), 689.
- Crommelinck, S.; Bennett, R.; Gerke, M.; Yang, M.; Vosselman, G. (2017a): Contour detection for UAV-based cadastral mapping. In: *Remote Sensing*, 9(2), 171.
- Enemark, S.; Bell, K. C.; Lemmen, C.; McLaren, R. (2014): Fit-For-Purpose land administration. In: International Federation of Surveyors: Frederiksberg, Denmark.
- García-Pedrero, A.; Gonzalo-Martín, C.; Lillo-Saavedra, M. (2017): A machine learning approach for agricultural parcel delineation through agglomerative segmentation. In: *International Journal of Remote Sensing*, 38, S. 1809–1819.
- Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, (1), S. 17–30.
- Jazayeri, I.; Rajabifard, A.; Kalantari, M. (2014): A geometric and semantic evaluation of 3D data sourcing methods for land and property information. In: *Land Use Policy*, 36, S. 219–230.
- Manyoky, M.; Theiler, P.; Steudler, D.; Eisenbeiss, H. (2011): Unmanned aerial vehicle in cadastral applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38-1(C22), S. 1–6.
- Mumbone, M.; Bennett, R.; Gerke, M.; Volkmann, W. (2015): Innovations in boundary mapping: Namibia, customary lands and UAVs. In: World Bank Conference on Land and Poverty, Washington DC, USA, 23–27 March, S. 1–22.
- Neubert, P.; Protzel, P. (2012): Superpixel benchmark and comparison. In: Proc. of Forum Bildverarbeitung, Regensburg, Germany, 29–30 November, S. 1–12.
- Rehak, M.; Skaloud, J. (2016): Applicability of New Approaches of Sensor Orientation To Micro Aerial Vehicles. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 3(3), S. 441–447.
- Ren, X.; Malik, J. (2003): Learning a classification model for segmentation. In: IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'03), Washington, DC, USA, 13–16 October, S. 10–17.
- Stöcker, C.; Bennett, R.; Nex, F.; Gerke, M.; Zevenbergen, J. (2017a): Review of the Current State of UAV Regulations. In: *Remote Sensing*, 9(5), S. 459.
- Stöcker, C.; Nex, F.; Koeva, M.; Gerke, M. (2017b): Quality Assessment of Combined IMU/GNSS Data for Direct Georeferencing in the Context of UAV-based Mapping. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43-2(W6), S. 355–361.
- Zevenbergen, J.; Augustinus, C.; Antonio, D.; Bennett, R. (2013): Pro-poor land administration: Principles for recording the land rights of the underrepresented. In: *Land use policy*, 31, S. 595–604.
- Zevenbergen, J.; Bennett, R. (2015): The visible boundary: More than just a line between coordinates. In: GeoTech Rwanda, Kigali, Rwanda, 18–20 November, S. 1–4.

## Kontakt

Markus Gerke  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
Bienroder Weg 81, 38106 Braunschweig  
[m.gerke@tu-bs.de](mailto:m.gerke@tu-bs.de)

Claudia Stöcker | Sophie Crommelinck | Mila Koeva  
University of Twente  
Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)  
PO Box 217, 7500 AE Enschede, Niederlande  
[e.c.stocker@utwente.nl](mailto:e.c.stocker@utwente.nl) | [s.crommelinck@utwente.nl](mailto:s.crommelinck@utwente.nl) | [m.n.koeva@utwente.nl](mailto:m.n.koeva@utwente.nl)

# UAV für eine effiziente Vermessung im Insel- und Küstenschutz

Holger Dirks

## 1 Einführung

Die Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesbetriebes für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) setzt aktive und passive Fernerkundungsverfahren zur topografischen Vermessung des Küstenreliefs mit dem Ziel ein, dessen Veränderungen zu dokumentieren und damit Grundlagen für morphologische Analysen zu schaffen, sowie Eingangsdaten für mathematische Modellierungen von Tide- und Sturmflutwasserständen, Strömungen, Seegang, Morphodynamik und Gewässergüte zu liefern. Während das aktive Airborne Laserscanning (ALS) zur Vermessung großräumiger Küstenregionen eingesetzt wird, erfolgt die Vermessung kleinräumiger Gebiete wie dünenabbruchgefährdete Inselabschnitte oder unzugängliche Deichvorlandbereiche zunehmend mit dem in 2016 beschafften UAV. Entscheidend für den Einsatz eines UAV ist einerseits ein sicheres Betreiben des Flugsystems unter Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben, andererseits sollten die erzeugten Ergebnisdaten hinsichtlich ihrer Qualität und Genauigkeit eine Zustandsbewertung im Insel- und Küstenschutz ermöglichen.

## 2 Eingesetztes UAV – Trimble UX5 HP

Das vom NLWKN eingesetzte unbemannte Luftfahrzeug ist ein vollautomatisch gesteuertes, hochpräzises und ausfallsicheres Flugsystem zur Erfassung von Luftbildern kleinräumiger Gebiete. Ein Vorteil dieses Flugsystems ist der zusätzlich verbaute Hochleistungs-GNSS-Empfänger zur Aufzeichnung von PPK GNSS Daten (PPK = post processed kinematic = nachprozessierte kinematische Daten) zur Bestimmung von sehr genauen Bildpositionen in einem absoluten Koordinatensystem. Dadurch entfällt das zeitaufwendige Auslegen und Einmessen von Passpunkten im Befliegungsgebiet.

Der eingebaute 36 MPix-Vollformatkamerasensor zeichnet scharfe, hochauflösende Luftbilder mit einer Auflösung bis zu einem Zentimeter (Pixelgröße am Boden) auf. Auf einem robusten Tablet-PC erfolgen die Bildflugplanung,



**Abb. 1:**  
UX5 HP auf  
Startrampe

die Durchführung von Flugvorkontrollen und die Überwachung des Bildfluges selbst.

Der knapp drei Kilogramm schwere, ein Meter breite und 65 Zentimeter lange Starrflügler wird von einem elektrischen 1.400-Watt-Motor mit Druckpropeller angetrieben. Die Bildflüge erfolgen in einer Flughöhe über Grund von 75 bis 100 Meter mit einer Fluggeschwindigkeit von 85 Stundenkilometern. Die Flugdauer beträgt 35 Minuten pro Flugakku. Das Flugsystem kann bei Windgeschwindigkeiten bis zu 55 Stundenkilometern und leichtem Regen eingesetzt werden.

Das Luftfahrzeug wird über einen Katapult ([Abb. 1](#)) gestartet und landet nach dem Prinzip der Gleitlandung mit Schubumkehr-Technologie. Das zu erfassende Fluggebiet wird flugstreifenweise senkrecht zur Windrichtung abgeflogen. Dabei werden die Flugstreifen durch die Planungssoftware so angeordnet, dass die aufgenommenen Luftbilder eine Überlappung von 80 Prozent in Längs- und Querrichtung aufweisen.

Die aufgezeichneten Flugdaten und Luftbilder werden in einer photogrammetrischen Auswertesoftware zu maßstabsgerechten Orthophotos, 3D-Punktwolken, dreiecksvermaschten Höhenmodellen und Höhenlinienkarten des überflogenen Gebietes verarbeitet. Damit lassen sich Projektplanungen, Volumenberechnungen oder Dokumentationen über morphologische Veränderungen und Baufortschritte in Vermessungsqualität ausführen. Gegenüber den herkömmlichen terrestrischen Vermessungsverfahren können so sehr effizient flächenhafte, hochauflöste und bildgebende Geobasisdaten erzeugt werden, ohne dass Vermessungsgebiet betreten zu müssen.

### 3 Anwendungsbeispiel Insel Wangerooge

Der im Westen der Insel Wangerooge zwischen Westturm und Hafen gelegene Dünen- und Strandabschnitt Harlehorn liegt nach Sturmfluten weiterhin im Abbruch. Umfangreiche Vermessungen sind somit für die Zustandsbewertung und

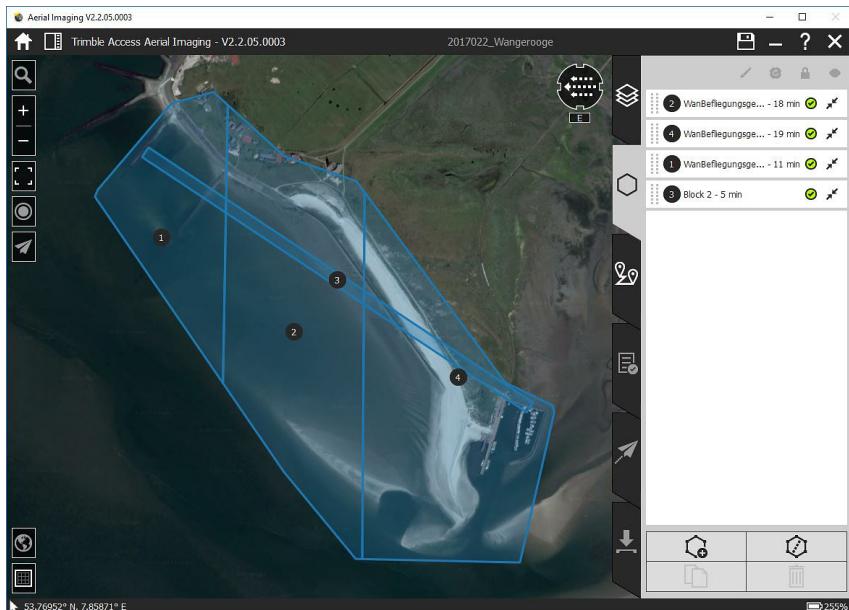


Abb. 2: Flugplanung Wangerooge West, Harlehörndünen

Entscheidung über weitere Dünenverstärkungen und Strandaufspülungen erforderlich. Neben den jährlichen ALS Befliegungen im Frühjahr wurde dieser abruchgefährdete Dünenabschnitt am 19.1.2017 und nach Abschluss der Strandaufspülung am 26.9.2017 mittels UAV jeweils zur Niedrigwasserzeit beflogen.

Die Abb. 2 zeigt die Flugplanung vom 26.9.2017. Das Befliegungsgebiet umfasst eine Gesamtfläche von 1,703 km<sup>2</sup>. Zum Zeitpunkt der Befliegungen herrschten östliche Winde mit einer Windstärke von 4 Bft. In Abhängigkeit der Windrichtung und der vorgegebenen Bodenauflösung (GSD) der Luftbilder mit 3 cm wurde das Gebiet in drei Blöcke (1, 2, 4) mit jeweils nordsüdlicher Flugrichtung unterteilt.

Die Flughöhe wurde für die gewählte Bodenauflösung und den eingesetzten Kamerasensor auf 94 m über Grund festgelegt. Der Block Nr. 3 wird zur Genauigkeitssteigerung des Bildverbandes in einer anderen Flughöhe (75 m über Grund) quer über die Flugblöcke 1, 2, 4 erfasst. Mit einer Bildüberlappung von

80 Prozent in Längs- und Querrichtung mussten insgesamt 49 Flugstreifen abgeflogen werden.

Für die Durchführung der Flugplanung wurden drei Flüge mit einer Flugzeit von insgesamt 80 min ( $2 \times 27$  min und 26 min) benötigt. Die aufgenommene Bildanzahl beträgt 1.849 Einzelluftbilder.

Die Datenverarbeitung erfolgt mit der Auswertesoftware Trimble Business Center. Zunächst werden die exakten Bildpositionen über eine Basislinien-

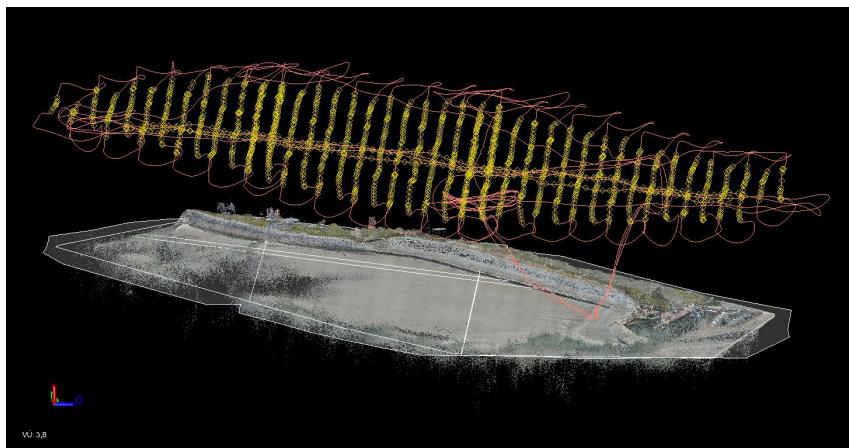


Abb. 3: Flugtrajektorie mit Luftbildpositionen

verarbeitung der vom Flugsystem und von der lokalen Referenzstation aufgezeichneten GNSS Rohdaten berechnet (Abb. 3).

Es folgt die Ausgleichung des gesamten Bildfluges. Von den 1.849 Einzelbildern wurden 343 Luftbilder aus der Ausgleichung eliminiert, begründet mit dem ablaufenden Wasser bzw. Restwasser des Tidewechselbereiches und der angrenzenden Gewässerrinne der Doven Harle. Über 78.614 berechnete Verknüpfungspunkte wird der geometrische Zusammenhang zwischen den Bildebenen und dem Gelände hergestellt.

Im Anschluss an die Bildflugausgleichung werden die Ergebnisprodukte berechnet:

- Orthophotos mit einer Bodenauflösung (GSD) von 3 cm,
- 3D-Punktwolke mit 181 Mio. Messpunkten,
- Höhenmodelle in verschiedenen Auflösungen.

Die Abb. 4 zeigt das berechnete Orthophoto bestehend aus sechs Teil-Orthophotos mit einer Speichergröße von jeweils 2,35 GB. Datenlücken im Orthophoto entstehen in wasserbedeckten Bereichen.



**Abb. 4:**  
Orthophoto des  
Befliegungs-  
gebietes

Für die Weiterverarbeitung und Bewertung der Ergebnisdaten ist der Nachweis über die erreichte Genauigkeit der 3D-Produkte zwingend erforderlich. So werden bei jeder UAV Befliegung GNSS basierte Referenzmessungen zeitgleich zur Befliegung durchgeführt, anhand derer die erreichten Genauigkeiten über Soll/Ist Vergleiche nachgewiesen wird. Zudem erfolgt der Qualitätsnachweis über einen Vergleich der UAV Daten mit den erhobenen ALS Daten.

Für das aufgezeigte Anwendungsbeispiel ergeben sich die nachstehend aufgeführten Genauigkeiten beim Vergleich des UAV Höhenmodells zu den terrestrisch vermessenen Referenzdaten und den erhobenen ALS Daten.

a) Punktuer Vergleich von Strand- und Dünenbereichen (UAV Höhenmodell minus terrestrisch gemessenen Referenzdatensatz):

- Anzahl der Messpunkte: 46
- Höhendifferenz Minimum [m]: -0,091
- Höhendifferenz Maximum [m]: 0,102
- Höhendifferenz Mittelwert [m]: 0,016
- Höhendifferenz Stdabw. [m]: 0,036

b) Punktuer Vergleich anhand befestigter Flächen (Straßen und Wege) zwischen dem UAV-Höhenmodell und dem Höhenmodell aus der Laserscanbefliegung:

- Anzahl der Messpunkte: 55
- Höhendifferenz Minimum [m]: -0,192
- Höhendifferenz Maximum [m]: 0,081
- Höhendifferenz Mittelwert [m]: -0,004
- Höhendifferenz Stdabw. [m]: 0,044

## 4 Fazit

Seit Inbetriebnahme des UAV im Jahre 2016 wurden über 100 Flüge sicher, zuverlässig und erfolgreich durchgeführt. Der Trimble UX5 HP hat sich bei den in der Küstenregion oftmals vorherrschenden Wind- und Wetterbedingungen besonders bewährt.

Die nachgewiesenen Genauigkeiten der erzeugten Ergebnisprodukte zeigen, dass das Messverfahren auch im Vergleich mit dem Laserscanverfahren für die Zustandsbewertungen im Insel- und Küstenschutz verwertbare Ergebnisse liefert. Hervorzuheben sind dabei die bildgebenden und hochaufgelösten 3D-Produkte, die sich in der Weiterverarbeitung als sehr nützlich erweisen.

Für die Beschaffung eines solchen Flugsystems sind neben den hohen Investitionskosten auch die Folgekosten für den Betrieb (Austausch der Flugakkus und des Flugkörpers mit Steuerungsservos und Antriebssystem) und für die Wartung (Garantie und Softwarepflege) zu berücksichtigen. Zudem ist eine leistungsstarke IT-Infrastruktur zur Verarbeitung und Sicherung der erhobenen Massendaten vorzuhalten.

### Kontakt

Holger Dirks

NLWKN-Forschungsstelle Küste

Jahnstraße 1, 26506 Norden

[holger.dirks@nlwkn-nor.niedersachsen.de](mailto:holger.dirks@nlwkn-nor.niedersachsen.de)

# Echtzeit-Lagekarten für die Katastrophenhilfe

Thomas Kraft | Steven Bayer | Daniel Hein | Karsten Stebner |  
Daniela Lesmeister | Ralf Berger

## 1 Zusammenfassung

Bei der Rettung von Menschenleben nach verheerenden Naturkatastrophen sind die ersten 72 Stunden entscheidend. Für die am Ort eintreffenden Rettungskräfte sind genaue Informationen über die aktuelle Lage entscheidend, um eine schnelle und effiziente Rettungskette zu ermöglichen. Dazu entwickelte das Institut für Optische Sensorsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Kooperation mit der gemeinnützigen Hilfsorganisation *International Search and Rescue Germany (I-S-A-R Germany)* ein neuartiges Luftbildkamerasytem und Auswerteverfahren, mit welchem in kurzer Zeit aktuelle Lagebildkarten von betroffenen Gebieten erstellt werden können. Das Kamerasytem ist für den Betrieb auf schnell fliegenden unbemannten Fluggeräten (engl. *Unmanned Aerial Vehicle*, kurz *UAV*) optimiert. Die Luftbilder können direkt nach der Landung als Überlagerung in einer digitalen Karte abgebildet werden. Damit können die Einsatzkräfte das Ausmaß der Zerstörung direkt aus der Luft bewerten, vor Ort ohne komplizierte Infrastruktur, bei Tag und zukünftig auch in der Nacht. Der erste Prototyp basiert auf dem vom DLR entwickelten *Modular Aerial Camera System (MACS)* und das Konzept wurde erstmalig im Mai 2017 unter realen Einsatzbedingungen erprobt.

## 2 Einleitung

An der internationalen Hilfe nach verheerenden Naturkatastrophen sind viele Organisationen und Akteure beteiligt. Die Koordination der internationalen Hilfe obliegt den Vereinten Nationen (engl. *United Nations*, kurz *UN*) in enger Abstimmung mit dem betroffenen Land. Sobald ein offizielles Hilfsersuchen vorliegt, übernimmt das Amt für humanitäre Angelegenheiten (engl. *Office for the Coordination of Humanitarian Affairs*, kurz *OCHA*) die Koordination der internationalen Hilfsmaßnahmen (OCHA 2017).

Dazu werden innerhalb weniger Stunden spezielle Katastrophenerkundungs- und Koordinierungsteams (engl. *United Nations Disaster Assessment and Coordination Teams*, kurz *UNDAC Teams*) in die Krisenregion entsandt, um vor Ort die Lage zu erkunden und um die internationalen Hilfsmaßnahmen zu koordinie-

ren. Zu diesem Zweck werden Koordinierungsstellen eingerichtet (engl. *On-Site Operations Coordination Centre*, kurz OSOCC), welche in ständigem Kontakt mit der Regierung des betroffenen Landes und den lokalen Behörden stehen. Mit dem von der UN bereitgestellten Katastropheninformationssystem GDACS (engl. *Global Disaster Alert and Coordination System*) werden kontinuierlich alle verfügbaren Informationen zur Katastrophe, zum Wetter und zur aktuellen Lage gesammelt, dokumentiert und weltweit verfügbar gemacht (GDACS 2017). Die Koordination und Dokumentation der internationalen Hilfsmaßnahmen erfolgt über das *Virtual OSOCC*, welches ein Teil von GDACS ist.

Die gemeinnützige Hilfsorganisation I-S-A-R Germany arbeitet seit 2007 unter dem Dach der Vereinten Nationen (ISAR 2016) und wurde als weltweit erstes *Medium Team* von der UN-Organisation INSARAG (engl. *International Search and Rescue Advisory Group*) geprüft und zertifiziert. Dies bedeutet, dass internationale Standards bei der Suche und Rettung von vermissten und verschütteten Menschen eingehalten werden und dass sich das Team über mehrere Tage autark in Katastrophengebieten bewegen kann. 2012 und 2017 konnte die Zertifizierung erfolgreich wiederholt werden (ISAR 2017). Damit ist I-S-A-R Germany berechtigt, weltweit nach verheerenden Naturkatastrophen die Lage zu erkunden, die Koordinierung der Hilfsmaßnahmen zu unterstützen, nach verschütteten Personen zu suchen und medizinische Soforthilfe zu leisten.

Für die ersten in der Krisenregion eintreffenden Rettungskräfte sind genaue Informationen über die aktuelle Lage entscheidend, um eine schnelle und effiziente Rettungskette zu ermöglichen. In den ersten Tagen nach dem Auftreten der Naturkatastrophe erfolgt die Koordinierung und Orientierung im Katastrophengebiet weitestgehend anhand von verfügbaren digitalen oder analogen Karten die mit öffentlichen, behördlichen und meteorologischen Informationen kombiniert werden (ZKI 2015, MapAction 2017, HOT 2017). Diese Karten werden von gemeinnützigen oder kommerziellen Anbietern zur Verfügung gestellt (GDACS, OpenStreetMap, DLR, MapAction, Google Maps, Garmin, ESRI, Lonely Planet, etc.) und werden im Verlauf der Erkundung mit weiteren Beobachtungen der Ersthelfer ergänzt (UNDAC 2013). Neben der klassischen Erkundung mit Fahrzeugen, Helikoptern oder zu Fuß kommen in den letzten Jahren vermehrt unbemannte Fluggeräte zum Einsatz (FSD 2016, DuPlessis 2016, Alschner et al. 2016). Damit können Zufahrtswege, betroffene Gebiete und Gebäudekomplexe schnell aus der Luft bewertet werden (Duarte et al. 2017). Seit 2013 verwendet auch I-S-A-R Germany regelmäßig ein unbemanntes Fluggerät (*AscTec Falcon 8*) in internationalen Hilfseinsätzen.

Jedoch fehlt bisher ein Ansatz der es ermöglicht aktuelle Lagekarten von betroffenen Gebieten in sehr kurzer Zeit vor Ort selbst erstellen zu können (FSD 2016). Zu diesem Zweck entwickelte das Institut für Optische Sensorsysteme des DLR, in Kooperation mit I-S-A-R Germany, ein neuartiges Luftbildkamerasystem

und Auswerteverfahren (Hein et al. 2017). Die Luftbilder können in Echtzeit zu einem hochauflösendem und hoch lagegenauen Bildmosaik zusammen gesetzt werden in einer digitalen Karte abgebildet werden. Mit diesem aktuellen Lagebild sind die Einsatzkräfte in der Lage das Ausmaß der Zerstörung aus der Luft zu bewerten. Das Verfahren wurde zusammen mit I-S-A-R Germany erstmalig im Mai 2017 unter den Augen der Vereinten Nationen erprobt. Die Entwicklung wurde durch die Sicherheitsforschung des DLR finanziert.

### 3 Luftbildkamerasystem und unbemanntes Fluggerät

Der aktuelle Prototyp des Kamerasystems besteht aus einer Industriekamera (16 Megapixel, 7,4 µm Pixelgröße, Bayer Pattern) mit Industrieobjektiv (Schneider Kreuznach Xenon Emerald 50/2.2), einem GNSS-Zweifrequenz-Empfänger (Novatel OEM6 Receiver), einer inertialen Messeinheit (Sensonor STIM300) und einem Embedded CPU Stack (Intel Atom Dual Core, 4 GB RAM, WLAN, zwei CFast-Speicherkarten, Fedora OS).

Der Betrieb aller Komponenten erfolgt durch den Embedded CPU Stack. Jedes Luftbild wird über die hochpräzise GNSS-Zeit, zum Zeitpunkt der Aufnahme, eine Position und Lage in Bezug zur Erdoberfläche zugeordnet (äußere Orientierung). Alle Komponenten werden kontinuierlich gegen die GNSS-Zeit synchronisiert und die Aufnahmen können mit Bildraten von bis zu 3 Hz im RAW-Format auf einer wechselbaren CFast-Karte gespeichert werden. Das Kamerasystem kann über WLAN mit einem handelsüblichen Notebook konfiguriert werden.

Durch die Verwendung von Industriekamera, Industrieobjektiv und gefertigtem Objektivadapter mit Industriegewinden, können Kamera und Objektiv, sowie Fokus und Blende mechanisch fixiert werden, wodurch eine stabile innere Orientierung des Kamerasystems erreicht wird (Kraft et al. 2016). Blende und Fokus wurden so gewählt, dass eine scharfe Abbildung ab einer Entfernung von 45 m gegeben ist. Der diagonale Öffnungswinkel der Kamera beträgt 47°. Bei einer Entfernung von 100 m ergibt sich eine nominelle Auflösung von 1,5 cm pro Pixel und eine Schwadbreite (quer zur Flugrichtung) von 72 m.

Das Kamerasystem (Abb. 1) wurde in ein schnell fliegendes unbemanntes Flächenflugzeug integriert (Songbird von GermanDrones GmbH, Abb. 2), welches vertikal Starten und Landen kann. Dieses spezielle Fluggerät ermöglicht Reichweiten von bis zu 30 Kilometer und erreicht Fluggeschwindigkeiten von bis zu 120 Kilometer pro Stunde. Fluggerät und Kamerasystem können bis zu 60 Minuten in der Luft betrieben werden. Der Flug kann manuell oder anhand von vorgegebenen Flugpfaden durchgeführt werden. Die Spannweite des Fluggerätes beträgt 3,10 m bei einem Abfluggewicht von ca. 10 kg (inkl. Kamerasystem).

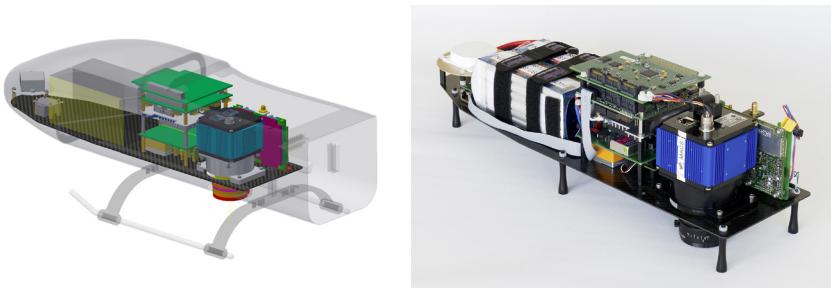


Abb. 1: CAD-Modell (links) und Aufbau (rechts) des Luftbildkamerasystems

Die geometrische Kalibrierung des Kamerasystems erfolgte wie in Kraft et al. (2016) beschrieben. Damit sind die Parameter der inneren Orientierung wie Bildhauptpunkt ( $x_H, y_H$ ), Kammerkonstante ( $c_k$ ), radial-symmetrische Verzeichnung ( $k_1, k_2$ ) und tangentiale Verzeichnung ( $p_1, p_2$ ) bestimmt. Die Bestimmung der äußeren Orientierung erfolgt durch den GNSS-Empfänger und die IMU. Dazu wurden anhand des CAD-Modells folgende *Lever-Arms* bestimmt:

- die Verschiebung zwischen dem Phasenzentrum der GNSS-Antenne und dem Koordinatenzentrum der IMU,
- die Verschiebung zwischen dem Projektionszentrum der Kamera und dem Koordinatenzentrum der IMU.

Der GNSS-Empfänger wurde so konfiguriert, dass während des Fluges zu jeder Bildaufnahme die Position und Lage für das Projektionszentrum der Kamera berechnet wird. Diese Information wird zusammen mit dem zugehörigen Bild gespeichert.

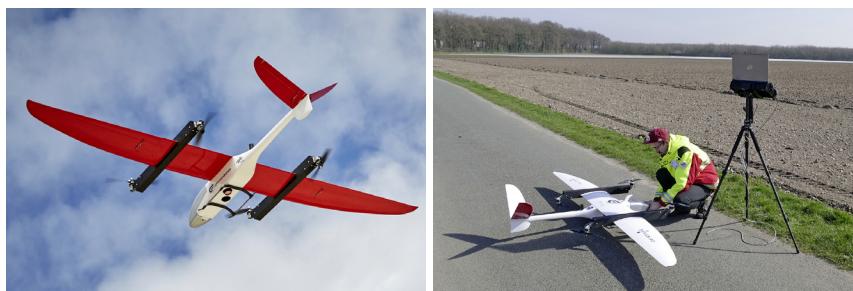


Abb. 2: Unbemanntes Fluggerät mit integriertem Luftbildkamerasystem

## 4 Auswerteverfahren

Das entwickelte Auswerteverfahren erlaubt die Darstellung der einzelnen Luftbilder als Überlagerung in einer digitalen Karte sowie die Darstellung aller Luftbildaufnahmen als Mosaik.

### 4.1 Schnittpunktberechnung

Folgende Informationen sind für das Verfahren erforderlich:

- Ein grobes Höhenmodell des beflogenen Gebietes, das für jede Koordinate einen approximierten Höhenwert definiert.
- Die Parameter der inneren Orientierung der Kamera (mindestens Bildhauptpunkt, Kammerkonstante und Sensorgröße).
- Die Luftbilder mit Position und Lage jedes Projektionszentrums zum Zeitpunkt der Aufnahme.
- Die relative Lage zwischen Kamerasystem und Koordinatenzentrum der IMU (*Boresight-Misalignment*).
- Optional: Die radiometrische Kalibration der Kamera (*PRNU* und *DSNU*) zur Optimierung der Bildqualität

Das Grundprinzip basiert auf der schnellen Berechnung der Schnittpunkte zwischen den Sensorstrahlen und dem Höhenmodell. Die Sensorstrahlen entsprechen dabei den Eckstrahlen des entsprechend der inneren Orientierung zur Kamera zugehörigen Lochbildkameramodells. Die Sichtstrahlen für jeden einzelnen Bildpunkt werden durch die relative Lage zwischen IMU und Kamera sowie den Parametern der inneren und äußeren Orientierung definiert (Abb. 3a). Die Berechnung der Schnittpunkte zwischen diesen Sichtstrahlen und dem Höhenmodell kann dabei sowohl im (geografischen) Kugelkoordinatensystem als auch einem lokalen kartesischen Koordinatensystem erfolgen. Letzteres ist zum Beispiel durch die der Aufnahmeposition zugehörige UTM-Zone gegeben.

Im allgemeinen Fall ist für ein gegebenes Höhenmodell keine Ableitung bekannt. Daher können analytische oder numerische Verfahren, wie zum Beispiel die Newton-Methode nicht für die Bestimmung des Schnittpunktes zwischen einem Strahl im Raum und dem Höhenmodell angewendet werden. Um beliebige Höhenmodelle zuzulassen, verwendet das hier beschriebene Verfahren daher einen iterativen Ansatz zur Bestimmung des Schnittpunktes.

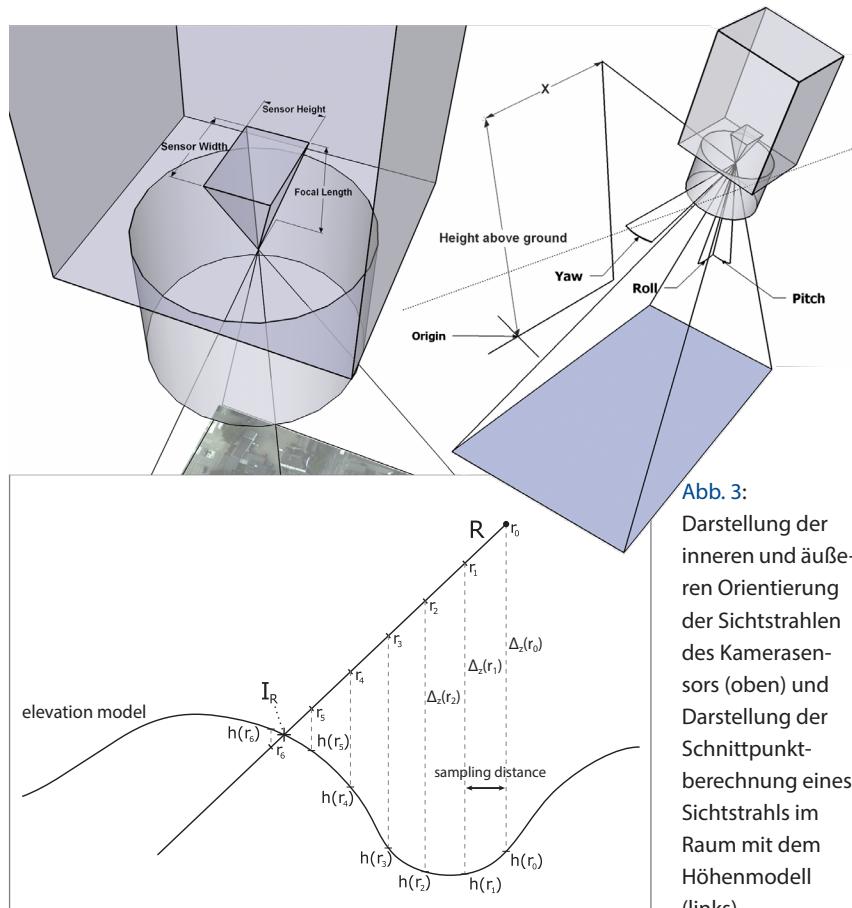
Gegeben sei ein Strahl  $R$ , beginnend im Punkt  $S$  (die Position der Kamera zum Auslösezeitpunkt) mit einem bestimmten Raumwinkel, der durch den Sichtwinkel des betrachteten Pixels definiert ist. Auf dem Strahl  $R$  werden  $n$  äquidistante Abtastpunkte  $\{r_0, r_1, \dots r_{n-1}\}$  definiert. Der Abstand zwischen den Abtastpunkten

sollte sich dabei in der Größenordnung der räumlichen Auflösung des Höhenmodells bewegen (Abb. 3b).

Beginnend im Abtastpunkt  $r_i = r_0$  führe für jeden Abtastpunkt aus:

- Bestimme die Höhe  $h(r_i)$  des Höhenmodells am Punkt  $r_i$ .
- Bestimme die Differenz zwischen der Höhe von  $r_i$  (Höhe des Aufnahmepunktes) und der Höhe des Höhenmodells bei  $r_i$ .
- Stoppe, sobald die Höhendifferenz kleiner als Null wird.

Der dreidimensionale Schnittpunkt ist dann durch die gewichtete lineare Interpolation der letzten beiden Abtastpunkte gegeben. Durch das beschriebene



Verfahren können alle vier Eckstrahlen eines Luftbildes mit dem Höhenmodell verschnitten werden. Im Ergebnis erhält man vier dreidimensionale Schnittpunkte auf dem Höhenmodell, die näherungsweise das durch das Luftbild erfasste Bodensegment definieren. Dieses georeferenzierte Polygon wird im nächsten Schritt für die projektive Abbildung des Luftbildes auf eine Karte verwendet.

## 4.2 Projektive Abbildung

Um die aufgenommenen Luftbilder auf eine Karte (bzw. in ein georeferenziertes Koordinatensystem) zu zeichnen, wird eine projektive Abbildung für jedes einzelne Luftbild berechnet ([Abb. 4](#)). Diese Abbildung besteht aus einer homogenen  $3 \times 3$ -Matrix, die für jeden Bildpunkt im Bildkoordinatensystem eine



**Abb. 4:** Luftbildaufnahme (links) und perspektivische Abbildung (rechts) des Luftbildes auf ein geografisches Koordinatensystem (Karte)

Koordinate im georeferenzierten Koordinatensystem (der Karte) definiert. Die Berechnung dieser Matrix beruht auf der Lösung des linearen Gleichungssystems, das durch die Relation zwischen den vier Eckpunkten des Bildes und deren zugehörigen Weltkoordinaten gegeben ist (Heckbert 1989). Diese Matrix definiert, wo die Bildpunkte des Luftbildes in die Karte zu zeichnen sind (Hartley und Andrew 2004). Ein Beispiel für solch eine projektive Abbildung ist in [Abb. 4](#) zu sehen.

Durch die projektive Abbildung mehrerer Luftbilder auf Basis ihrer jeweiligen Abbildungsmatrizen entsteht so ein lückenloses georeferenziertes Mosaik des aufgenommenen Gebietes. Moderne Computersysteme unterstützen hardwarebeschleunigtes projektives Rendern von einzelnen Rasterbildern. Dies erlaubt eine schnelle und flüssige Visualisierung von tausenden Luftbildern eines beflogenen Gebietes. Ein Beispiel ist in [Abb. 8](#) zu sehen.

Die Qualität der so entstandenen Luftbildkarte kann darüber hinaus durch die Anwendung von sowohl geometrischer als auch radiometrischer Korrektur

der Luftbilder weiter verbessert werden. Eine geometrische Korrektur verbessert hierbei die Lagegenauigkeit der einzelnen Bildpixel auf der Luftbildkarte. Eine radiometrische Korrektur kann radiometrische Effekte, wie zum Beispiel Vignettierung (Randabschattung) reduzieren und damit eine homogener Ausleuchtung der Luftbildkarte begünstigen.

### 4.3 Genauigkeit

Trotz der stark vereinfachten Projektion der Luftbilder, die nur auf der Interpolation zwischen den vier Eckpunkten der jeweiligen georeferenzierten Polygone basiert, bieten die resultierenden Gesamtmosaike als Luftbildkarte in schwach strukturiertem Gelände eine hohe Lagegenauigkeit.

Die verbleibenden Projektionsfehler und die Gesamtqualität der Luftbildkarte werden vor allem durch die folgenden vier Punkte bestimmt:

- Genauigkeit und Auflösung des Höhenmodells.
- Projektive Abbildungsfehler und Abschattung durch erhöhte Objekte. Dies betrifft vor allem Objekte wie Gebäude, Türme und Bäume, da diese nicht durch das Höhenmodell modelliert sind.
- Genauigkeit von GNSS-Empfänger und IMU. Vor allem die Fehler in der Lagebestimmung haben einen großen Einfluss auf die Lagegenauigkeit der projizierten Einzelbilder.
- Projektionsfehler innerhalb eines projizierten Einzelbildes, welche durch die lineare Interpolation innerhalb des Bildes entstehen.

Alle diese Punkte haben Einfluss auf die Lagegenauigkeit der projizierten Bilder und können Abschattungen oder visuelle Brüche zwischen benachbarten Luftbildern in der Luftbildkarte verursachen. Die Lagegenauigkeit dieses Verfahrens wurde in Brauchle et al. (2018) evaluiert. Hier wurden typische horizontale Lagefehler von weniger als zwei Meter mit einem Luftbildflugzeug bei einer Flughöhe von 2.600 Fuß (ca. 780 m über Grund) ermittelt.

## 5 Internationale Rettungsübung

Das beschriebene Luftbildkamerasystem MACS-SaR und Auswerteverfahren konnte zusammen mit I-S-A-R Germany erstmalig im Mai 2017 unter realen Einsatzbedingungen erprobt werden. Die Evaluierung des Systems erfolgte im Rahmen der dreitägigen INSARAG Re-Zertifizierungsübung ACHILLES 17 zusammen mit dem *Technischen Hilfswerk* (THW), *@fire Germany*, *UIISC 1 France* und *Swiss Rescue* (THW 2017).

Dazu wurde 20 Kilometer südwestlich von Genf ein Erdbeben der Stärke 7,5 auf der Richterskala simuliert. Nachdem die virtuelle Regierung des betroffenen Landes internationale Hilfe bei der UN angefordert hatte, trafen 24 Stunden nach dem Erdbeben die ersten Such- und Rettungsteams aus Deutschland, Frankreich und der Schweiz am Militärflughafen Payerne ein. Von dort aus wurden die Rettungsteams mit Hubschraubern nach Epeisses, einem Übungsort der Schweizer Armee gebracht, um von dort aus die Rettungsaktivitäten zu beginnen (Abb. 5). Ziel der Übung war die Abbildung der gesamten Rettungskette, beginnend mit der Aktivierung der Rettungsteams im Heimatland, der Einreise in die Krisenregion und dem Eintreffen im Schadensgebiet (Abb. 6). Vor Ort wurde neben der Logistik vor allem die Suche und Rettung von verschütteten Personen und die medizinische Versorgung erprobt. Das gesamte Übungsgebiet im Kanton Genf umfasste ca. 50 km<sup>2</sup>. Für I-S-A-R Germany und das THW ging es bei der dreitägigen Übung um die Re-Zertifizierung (engl. *INSARAG External Re-classification*, kurz *IER*) des INSARAG Standards. Dazu wurde das Vorgehen kontinuierlich durch unabhängige *UN-Classifier* beobachtet und zum Ende der

Quelle: Stefan Sobotta, I-S-A-R Germany



**Abb. 5:** Ankunft der ersten Erkundungsteams im Übungsort Epeisses in der Nähe des virtuellen Epizentrums



**Abb. 6:** Übungsgebiet mit zerstörten Gebäuden

**Tab. 1:** Übersicht der Aufklärungsflüge am 8.5.2017

Fluggebiet	Gebietsgröße	Notwendige Flugzeit	Bodenauflösung	Anzahl Bilder
A	500 × 250 m	4 Minuten	2,5 cm	128
B	700 × 350 m	6 Minuten	2,5 cm	216
C	700 × 450 m	10 Minuten	3,0 cm	251
D	1.200 × 550 m	8 Minuten	5,0 cm	267

Übung durch ein Gremium bewertet. Beide Organisationen wurden im Ergebnis erneut zertifiziert.

Die Erprobung des Luftbildkamerasystems erfolgte parallel zur Rettungsübung und es wurde im Vorfeld eine offizielle Aufstiegsgenehmigung für den Einsatz des unbemannten Fluggerätes von den Schweizer Behörden eingeholt. Alle Flüge erfolgten in Abstimmung mit der Schweizer Armee, innerhalb der Sichtweite und mit einer max. Flughöhe von 350 m über Grund.

Die Ankunft der ersten Erkundungsteams von I-S-A-R Germany im Übungs-ort erfolgte am 8.5.2017 gegen 12 Uhr. In Absprache mit der Einsatzleitung von I-S-A-R Germany wurden vier Gebiete (Abb. 7a) im Umkreis von vier Kilometern erkundet (siehe Tab. 1). Die Einzelbilder und die daraus resultierenden Lagekarten standen direkt nach der Landung des unbemannten Fluggerätes der Einsatzleitung zur Verfügung. Die Lagekarten wurden zusätzlich in das OSOCC übergeben und standen damit allen beteiligten Rettungsteams zur Verfügung. Die Karten wurden als *GeoTiff* in voller Auflösung übergeben und zusätzlich als *KMZ* in degraderter Auflösung zur schnellen Verwendung auf mobilen Endgeräten.

Mit den aktuellen Lagebildkarten (Abb. 8a) war I-S-A-R Germany in der Lage, die Erkundung der Gebiete zu Fuß und per Fahrzeug zu beschleunigen, da im Vorfeld die Beschaffenheit von Zugangswegen, Arealen und Gebäuden analysiert werden konnte. Ebenfalls erwies sich die Verwendung der Karten zur Navigation und Orientierung im Schadensgebiet als sehr hilfreich (Abb. 7b). Die Karten wurden zusätzlich im Geoinformationssystem der Einsatzleitung zur Koordinierung der Einsatzkräfte und zur Logistik- und Evakuierungsplanung verwendet. Durch den geografischen Bezug, die hohe Bildauflösung (Abb. 8b; siehe Tab. 1) und die Aktualität der Übersichtskarten konnten die Einsatzkräfte geografische Koordinaten besser interpretieren, da diesen ein visuelles Bild zugeordnet werden konnte. Dies war insbesondere für die vom OSOCC übermittelten Koordinaten zur Erkundung, Vermisstensuche und Menschenrettung hilfreich. Gegen 14 Uhr fand im OSOCC ein Treffen aller beteiligten Einsatzleiter statt (engl. *Team Leader Meeting*), wobei Übersichtsbilder von einzelnen



**Abb. 7:** Übersicht der beflogenen Gebiete (links) und Verwendung der Karten für die Navigation und Koordination der Hilfsmaßnahmen (rechts)



**Abb. 8:** Berechnetes Bildmosaik des Übungsortes (siehe Tab. 1, Fluggebiet A) und Ausschnitt zur Darstellung der Bodenauflösung (rechts)

Gebäuden und Bereichen zur weiteren Erkundung und Analyse ausgetauscht wurden. Der wesentliche Vorteil des beschriebenen Verfahrens ist die zeitnahe geografisch korrekte Darstellung aller Luftbildaufnahmen in einer digitalen Karte (siehe Abb. 7) auf einem mobilen Endgerät.

## 6 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem beschriebenen Luftbildkamerasystem und Auswerteverfahren, in kurzer Zeit aktuelle Lagebildkarten von betroffenen Regionen erstellt werden können und dies bedarfsgerecht, direkt im Einsatzgebiet und ohne komplizierte Infrastruktur. Der Einsatz eines unbemannten Flächenflugzeugs, welches vertikal Starten und Landen kann, hat sich als ideales Trägersystem herausgestellt, da große Gebiete in kurzer Zeit aufgeklärt werden können und keine Start- und Landebahn erforderlich ist. Die Aktualität

der Luftbilder und die schnelle Art der Visualisierung auf einem mobilen Endgerät verbessert die Einschätzung und Bewertung der Katastrophenlage durch die *UNDAC-Teams* maßgeblich. Es konnte gezeigt werden, dass die Lagebildkarten im OSOCC und GDACS verfügbar gemacht werden können und damit allen beteiligten Rettungsteams jederzeit zur Verfügung stehen. Diese Karten können ebenfalls für die Navigation verwendet werden, um die Orientierung der Ersthelfer im Katastrophengebiet zu unterstützen. Die geografisch korrekte Darstellung der Einzelbilder und Lagebildkarten in einer digitalen Karte ermöglicht die gezielte Analyse von Ortschaften, Zufahrtswegen und einzelnen Gebäuden und verbessert damit die Koordination der Hilfsmaßnahmen maßgeblich. Die Erprobung des Luftbildkamerasytems unter realen Einsatzbedingungen hat gezeigt, welches Potenzial in der prototypischen Lösung steckt und wie das Konzept die Erkundung und Rettungskette an verschiedenen Stellen verbessern kann. Der Einsatz des erprobten Systems an der internationalen Rettungsübung wurde im *INSARAG IER Report* wie folgt bewertet:

*„The cooperation in the pilot with the drone is considered most promising. Drones are being seen in a lot of operational entities like urban search and rescue teams. This drone and its sensor techniques made it possible to have a very goof operational picture of a very large area in a very short period of time. In this aspect, it seems to be very unique and is rarely seen by IER team.“*

Zusammen mit I-S-A-R Germany wird das Konzept weiter entwickelt um dieses zukünftig auch im realen Katastropheneinsatz erproben zu können. Dazu soll u. a. die Schwadbreite des Kamerasystems erhöht werden um noch schneller größere Flächen aufklären zu können. Die Integration einer Thermalkamera soll Einsätze in der Nacht ermöglichen und es wird die Option zur Aufnahme von Schrägluftbildern geprüft, da damit der Zerstörungsgrad von Gebäuden besser beurteilt werden kann (Vetrivel et al. 2016).

## Literatur

- Alschner, F.; DuPlessis, J.; Soesilo, D. (2016): Using drone imagery for real-time information after typhoon haiyan in the philippines. <http://drones.fsd.ch/wp-content/uploads/2016/06/9Case-Study.Philippine.SearchRescue.3May2016.pdf>, letzter Zugriff 01/2018.
- Brauchle, J.; Bayer, S.; Hein, D.; Berger, R.; Pless, S. (2018): MACS-MAR – A realtime remote sensing system for maritime security applications. CEAS Space Journal, Springer Vienna.
- Duarte, D.; Nex, F.; Kerle, N.; Vosselman, G. (2017): Towards a more efficient detection of earthquake induced façade damages using oblique UAV imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42-2(W6), S. 93–100.

- DuPlessis, J. (2016): Using drones to inspect postearthquake road damage in ecuador. <http://drones.fsd.ch/wp-content/uploads/2016/11/13.Case-StudyEcuador3.pdf>, letzter Zugriff 01/2018.
- FSD (2016): [www.drones.fsd.ch/wp-content/uploads/2016/11/Drones-in-Humanitarian-Action.pdf](http://www.drones.fsd.ch/wp-content/uploads/2016/11/Drones-in-Humanitarian-Action.pdf), letzter Zugriff 01/2018.
- GDACS (2017): [www.gdacs.org](http://www.gdacs.org), letzter Zugriff 01/2018.
- Hartley, R.; Zisserman, A. (2003): Multiple View Geometry in Computer Vision. 2. Auflage, Cambridge University Press.
- Heckbert, P. (1989): Fundamentals of Texture Mapping and Image Warping. Master Thesis, University of California. [www.cs.cmu.edu/~ph/texfund/texfund.pdf](http://www.cs.cmu.edu/~ph/texfund/texfund.pdf), letzter Zugriff 01/2018.
- Hein, D.; Bayer, S.; Berger, R.; Kraft, T.; Lesmeister, D. (2017): An integrated rapid mapping system for disaster management. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42-1(W1), S. 499–504.
- HOT (2017): [www.hotosm.org](http://www.hotosm.org), letzter Zugriff 01/2018.
- ISAR (2016): [www.isar-germany.de/wp-content/uploads/2017/10/Jahresbericht\\_A4\\_2016\\_D\\_ks2\\_09\\_10\\_2017.pdf](http://www.isar-germany.de/wp-content/uploads/2017/10/Jahresbericht_A4_2016_D_ks2_09_10_2017.pdf), letzter Zugriff 01/2018.
- ISAR (2017): [www.isar-germany.de/2017/05/10/i-s-a-r-germany-erneut-durch-vereintenationen-zertifiziert](http://www.isar-germany.de/2017/05/10/i-s-a-r-germany-erneut-durch-vereintenationen-zertifiziert), letzter Zugriff 01/2018.
- Kraft, T.; Geßner, M.; Meißner, H.; Cramer, M.; Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Evaluation of a metric camera system tailored for high precision UAV applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41(B1), S. 901–907.
- MapAction (2017): [www.mapaction.org](http://www.mapaction.org), letzter Zugriff 01/2018.
- OCHA (2017): [www.unocha.org](http://www.unocha.org), letzter Zugriff 01/2018.
- THW (2017): [https://m.thw.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Dokumente/Presse/Pressemitteilungen/2017/04/download\\_005\\_presseeinladung\\_seeba\\_fact\\_sheet.pdf](https://m.thw.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Dokumente/Presse/Pressemitteilungen/2017/04/download_005_presseeinladung_seeba_fact_sheet.pdf), letzter Zugriff 01/2018.
- UNDAC (2013): [www.unocha.org/sites/unocha/files/dms/Documents/UNDAC%20Handbook%202013\\_english\\_final.pdf](http://www.unocha.org/sites/unocha/files/dms/Documents/UNDAC%20Handbook%202013_english_final.pdf), letzter Zugriff 01/2018.
- Vetrivel, A.; Duarte, D.; Nex, F.; Gerke, M.; Kerle, N.; Vosselman, G. (2016): Potential of multi-temporal oblique airborne imagery for structural damage assessment. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-3, S. 355–362.
- ZKI (2015): [www.zki.dlr.de/de/article/2749](http://www.zki.dlr.de/de/article/2749), letzter Zugriff 01/2018.

## Kontakt

Thomas Kraft

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Optische Sensorsysteme | Sicherheitsforschung & Anwendungen

Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

[thomas.kraft@dlr.de](mailto:thomas.kraft@dlr.de)



## **Session 4: Praxisbeispiele und Innovationen**



# Automatische Inspektion von Hochspannungsleitungen durch UAV-basierte Bilddaten

Michael Maurer | Manuel Hofer | Friedrich Fraundorfer | Horst Bischof

## 1 Einleitung

Stromleitungskorridore müssen in regelmäßigen Abständen bezüglich des Wachstums der Vegetation kontrolliert werden, um Ausfälle auf Grund von Überschlägen zu minimieren. Diese Inspektionsaufgabe wird heutzutage manuell durchgeführt, entweder durch Schätzen der Distanzen zwischen Bäumen und Leitung im Vorbeigehen, oder im Überflug mittels eines bemannten Flugobjekts. Typische Luftbilder aus bemannten Flugobjekten sind meist sehr hochauflösend und erreichen nahezu dieselbe Bodenauflösung wie Bilder, die mit einer Drohne aufgenommen werden. Durch die geforderte Mindestflughöhe bei bemannten Flugobjekten können jedoch fast nur Nadir Blickwinkel erreicht werden. Mittels einer Kameradrohne sind jedoch Schrägaufnahmen möglich, welche die Qualität der Rekonstruktion erheblich, bezüglich der Stromleitung und Seitenansichten der Umgebung (Vegetation), verbessern. Der rasante Entwicklungsfortschritt von Kameradrohnen in den letzten Jahren ermöglicht es jetzt qualitativ hochwertige Aufnahmen zu geringen Preisen aufzunehmen und die unterschiedlichen Ausführungen der Kameradrohnen lassen präzise Flugmanöver in direkter Nähe zum Objekt mittels Multi-Rotor-Systemen sowie großflächige Aufnahmen mittels Flächenfliegern zu.

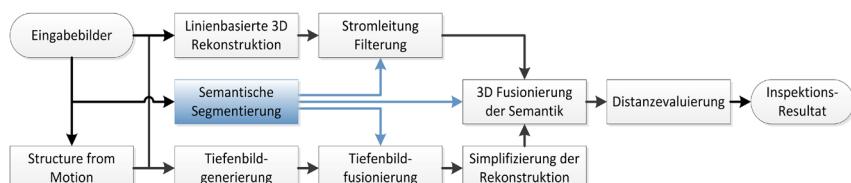
Heutzutage werden Kameradrohnen häufig für 3D-Rekonstruktionen, Inspektionen oder Messaufgaben eingesetzt. Es existieren kommerzielle Produkte für die 3D-Rekonstruktion wie Pix4D (2018) oder Agisoft PhotoScan (2018). Eine Forschungsarbeit, welche eine Variante der dahinter steckenden Algorithmen beschreibt ist (Tscharf et al. 2015). Sie beschreiben eine automatisierte Routine um genaue, metrische und geo-referenzierte 3D-Rekonstruktionen zu erzeugen und verwenden dafür Bilder von Kameradrohnen sowie terrestrische Aufnahmen. Hochauflösende Kameradrohnen Bilder werden auch von (Józków et al. 2015) verwendet um Stromleitungen zu rekonstruieren, wobei sie auf eine exakte Aufnahmeroutine achten müssen um Rekonstruktionen vergleichbar mit LiDAR-Punktwolken zu erzeugen. Kameradrohnen lassen sich auch gut für Inspektionsaufgaben einsetzen, da die Aufnahmeposition fast beliebig gewählt

werden kann. Zhang et al. (2015) verwendet zum Beispiel Thermalbilder von Kameradrohnen um Anomalien bezüglich der thermischen Isolation von Dächern in 2D zu detektieren. Des Weiteren werden Kameradrohnen zur Analyse des Lebensraumes von einzelnen Pflanzenarten verwendet, wie es in (Marcaccio et al. 2015) für Feuchtgebiete demonstriert wurde.

Die zuvor angeführten Publikationen beschäftigen sich entweder mit 3D-Rekonstruktion, Inspektions- oder Messaufgaben. Wie wir auch schon in Maurer et al. (2017) beschrieben haben, stellen wir einen Verarbeitungsablauf vor indem wir automatisiert Analysen durchführen. Dies beinhaltet die Identifikation von Objekten in 3D und interpretierbare, objektbezogene Distanzmessungen. Dafür werden die Eingabebilder zuerst semantisch segmentiert und die Szene rekonstruiert. Um die Qualität der Rekonstruktion zu verbessern werden anhand der Semantik Objekte identifiziert und automatisiert die geeignete Rekonstruktionsmethode gewählt. Unseren Datenverarbeitungsablauf demonstrieren wir am Beispiel der Inspektion von Hochspannungsleitungskorridoren bezüglich des Sicherheitsabstandes zu umliegenden Bäumen.

## 2 Datenverarbeitungsablauf

Dieses Kapitel beinhaltet eine Beschreibung unseres hoch automatisierten Datenverarbeitungsablaufs um semantische 3D-Rekonstruktionen zu erhalten, welche eine dichte Repräsentation der Umgebung beinhaltet wobei aber linienartige Strukturen wie Stromleitungen erhalten bleiben. Eine Simplifizierung der semantischen 3D-Rekonstruktion ermöglicht es im Anschluss effizient Inspek-



**Abb. 1:** Überblick der automatisierten Datenverarbeitungspipeline zur Inspektion von Unterschreitungen des Sicherheitsabstandes zwischen Stromleitungen und umgebender Vegetation: Mittels Bildern von Kameradrohnen rekonstruieren wir die Szene, fügen semantisches Wissen hinzu und messen automatisch Distanzen zwischen Stromleitung und Bäumen. Das Herzstück der Datenverarbeitungspipeline, die Semantische Segmentierung, ermöglicht es uns die Objekte der Szene vor der Rekonstruktion zu interpretieren und dementsprechend die Rekonstruktionsmethode zu wählen. Für die linienartigen Stromleitungen wird daher ein auf Linien-basierende und für die Umgebung eine dichte Rekonstruktionsmethode eingesetzt.

tionsaufgaben an bzw. zwischen einzelnen Klassen durchzuführen. Der Datenverarbeitungsablauf ist in Abb. 1 dargestellt und beinhaltet die folgenden Komponenten, welche in dem jeweiligen Unterkapitel beschrieben werden:

- Structure-from-Motion,
- semantische Segmentierung,
- linienbasierte 3D-Rekonstruktion,
- Tiefenbildgenerierung,
- Tiefenbildungfusionierung mit semantischem Filtern,
- Simplifizierung der Rekonstruktion,
- 3D-Fusionierung der Semantischen Information,
- Distanzevaluierung.

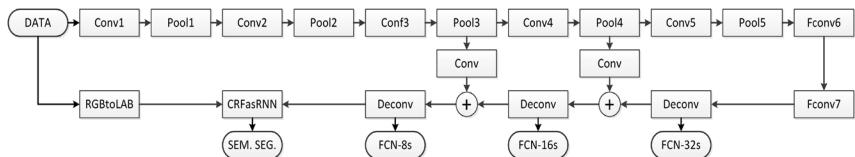
## 2.1 Structure-from-Motion

Mittels Structure-from-Motion (SfM) werden die Kameraposen simultan mit einer dünn besetzten Punktwolke ermittelt. Der verwendete Ansatz ist hoch automatisiert und kann mit ungeordneten, nicht sequenziellen Bildern umgehen. Wir folgen dem Ansatz von Irschara et al. (2012) um die sparse Punktwolke mit ausorientierten Kameras zu ermitteln. Dabei gehen wir von vorkalibrierten Bildern aus, welche mittels Schätzung der intrinsischen Kameraparametern (Daftary et al. 2013) erreicht werden. In der SfM-Pipeline werden zuerst pro Bild SIFT Features (Lowe 2004) berechnet und zwischen Bildpaaren mittels Voctree (Nistér und Stewenius 2006) Korrespondenzen hergestellt. Diesen Korrespondenzen werden dann zur Bestimmung einer robusten relativen Transformation zwischen einem initialen Stereopaar mittels 5-Punkt-Algorithmus (Nistér 2004) und dem Hinzufügen weiterer Bilder mittels 3-Punkt-Algorithmus (Haralick et al. 1991) verwendet. Abschließend werden die berechneten 3D-Punkte und Kameraposen mittels Bundle-Adjustment (Triggs et al. 2000) optimiert.

Da wir die finale Rekonstruktion für Messaufgaben verwenden möchten, ist es notwendig die absolute Position und Orientierung in einem geografischen System zu kennen. Daher verwenden wir die GPS-Positionen der Kameras, um das Modell zu geo-referenzieren (Rumpler et al. 2014).

## 2.2 Semantische Segmentierung

Die semantische Segmentierung stellt das Herzstück des präsentierten Verarbeitungsablaufes dar, da sie direkten Einfluss auf die einzelnen Teile der 3D-Rekonstruktion hat und die automatisierte Analyse der finalen 3D-Rekonstruktion ermöglicht (Abb. 1). Um dies zu ermöglichen benötigen wir pixel-basierte semantische Zuweisungen der Label. Wir folgen dem Ansatz von Long et al. (2014) und verwenden Fully Convolutional Neural Networks (FCN) um pixelweise



**Abb. 2:** Schematischer Überblick des Neuronalen Netzwerkes: Das Netzwerk besteht aus (Fully) Convolutional, Pooling und Deconvolutional Layer. Des Weiteren bietet das Netzwerk die Möglichkeit Zwischenergebnisse abzugreifen, welche gröbere semantische Segmentierungen beinhalten (FCN-XXs). Die Pixel akkurate Segmentierung wird mittels einer Konvertierung des Farbraums (RGBtoLAB) und einem Conditional Random Fields repräsentiert als Recurrent Neural Network (CRFasRNN) erreicht.

Segmentierungen zu erhalten. Das Netzwerk wurde entsprechend unserer Ausgabeklassen angepasst. Da wir linienartige Strukturen in unseren Bildern haben, die nur durch wenige Pixel repräsentiert sind, ist das Rezeptionsfeld von 32 px zu groß um die linienartigen Strukturen korrekt zu detektieren. Daher erweitern wir unser Netzwerk um ein Conditional Random Field (CRF) repräsentiert als Recurrent Neural Network (CRFasRNN) (Zheng et al. 2015). Das CRFasRNN verwendet die Wahrscheinlichkeiten aus dem FCN und verfeinert die Klassifizierung unter der Berücksichtigung von paarweisen Bedingungen. Somit stimmen die finalen Labelgrenzen besser mit den Gradienten im Bild überein. Eine Konvertierung des Farbraums zu LAB vor dem CRFasRNN bewirkt eine weitere Verbesserung der resultierenden Segmentierung. Das finale Netzwerk ist in Abb. 2 abgebildet.

## 2.3 Linienbasierte 3D-Rekonstruktion

Bezüglich der gestellten Aufgabe, der Inspektion an Stromleitungen, ist in der sparsen Punktfolge noch nicht genügend Information über die Stromleitung vorhanden. Daher fügen wir Linienelemente zu der sparsen Rekonstruktion laut Hofer et al. (2016) hinzu. Basierend auf den ausorientierten Kameras der SfM detektieren wir 2D-Liniensegmente und paaren diese mittels geometrischen Bedingungen in 3D. Ein Verifikationsschritt durch mehrere Ansichten der einzelnen Liniensegmente ermöglicht eine finale und genaue Rekonstruktion von linienartigen Strukturen in 3D.

## 2.4 Tiefenbildgenerierung

Basierend auf den orientierten Kameras werden Stereopaare berechnet und dies bezüglich der Epipolar-Geometrie rektifiziert. Anschließend werden dichte Tiefenbilder mittels des Diskret-Kontinuierlichen Ansatzes von Shekhovtsov

et al. (2016) zur Berechnung von dichten Bildkorrespondenzen erstellt. Dafür wird zuerst ein diskretes Optimierungsproblem gelöst. Da dieses auf 128 diskrete Tiefenschritte limitiert ist und wir mit Stereopaaren mit variablen Baselines arbeiten, wurde der Ansatz um eine automatisierte Anpassung der Schrittweite basierend auf den sichtbaren, sparsen 3D-Punkten erweitert. Der Tiefenbereich der sparsen Rekonstruktion wurde durch die zentralen 100 Schritte abgebildet um noch Reserven für dazukommende rekonstruierte Bereiche zur Verfügung zu haben. Das diskrete Tiefenbild wird schließlich noch mittels einer kontinuierlichen Optimierung, die auf derselben Kostenfunktion aufbaut, verfeinert.

## 2.5 Tiefenbildfusionierung mit semantischem Filtern

Basierend auf den Tiefenbildern der einzelnen Stereopaare wollen wir eine dichte Rekonstruktion der Szene erzeugen. Da es bekannt ist, dass linienartige Strukturen durch den Regularisierungsterm in der Berechnung der Tiefenbilder nicht korrekt abgebildet werden, verwenden wir unsere semantische Segmentierung um Stromleitung vor der Fusion zu filtern.

Die Fusionierung basiert auf dem Ansatz von Kähler et al. (2015). Dieser Ansatz ist optimiert um die Fusionierung in Echtzeit auf einer Grafikkarte rechnen zu lassen. Die Szene wird mittels vorzeichenbehafteter Abstandsfunktion modelliert und durch Raycasting visualisiert. Um in der Ausbreitung der Szene nicht begrenzt zu sein, verwenden wir Hashing wie von Nießner et al. (2013) vorgestellt wurde. Anstatt des Tracking der Kamera, was im Framework von Kähler et al. (2015) integriert ist, verwenden wir unsere zuvor ausorientierten Kameraposen zur Fusionierung der Tiefenbilder. Die Fusionierung liefert ein 3D-Netz der Umgebung, da die Stromleitungen zuvor aus den Tiefenbildern gefiltert wurden.

## 2.6 Simplifizierung der Rekonstruktion

Die hohe Auflösung der dichten Rekonstruktion impliziert somit einen hohen Specheraufwand und weitere Verarbeitungsschritte würden sehr zeitaufwändig sein. Daher rastern wir das Modell in ein Voxelgrid bezüglich einer geforderten Auflösung und speichern die Rekonstruktion in einer Octomap (Hornung et al. 2013). Um dies zu bewerkstelligen wurde der der Octomap unterliegende Octree neben den okkupierten Voxel bezüglich der Farbe, semantischen Segmentierung, ihrer Farbrepräsentation und der Distanzmessungen erweitert. Diese modifizierte Octomap ermöglicht es alle geforderten Repräsentationsarten und Messungen in einem Modell zusammen zu fassen und vermeidet das mehrmäig Speichern der Struktur.

## 2.7 3D-Fusionierung der Semantischen Information

Um automatisierte Analysen in der 3D-Rekonstruktion durchführen zu können, ist es notwendig die semantische Information hinzu zu fügen. Da die semantische Segmentierung in 2D einzelne Missklassifikationen enthalten kann, ist es notwendig auf eine robuste Methode zur Fusionierung zurück zu greifen. Wir verwenden dafür ein Histogramm-basiertes Voting. Dazu bestimmen wir für jedes Voxel in welchen Kameras es gesehen wird. Durch Rückprojektion des Voxelzentrums in die semantisch klassifizierten Kamerabilder erhalten wir die semantische Klassifizierung des entsprechenden Voxels, die im Klassenhistogramm zur Bestimmung der Voxelklassifizierung mittels Mehrheitsbeschluss herangezogen wird.

Da die Octomaprepräsentation nur die Umgebung beinhaltet, müssen zusätzlich die rekonstruierten Liniensegmente bezüglich der Klasse Leitung gefiltert und zum Modell hinzugefügt werden. Dafür verwenden wir dasselbe Prinzip des Mehrheitsbeschlusses.

## 2.8 Distanzevaluierung

Der finale Schritt in unserer Inspektionspipeline besteht darin, Distanzen zwischen Bäumen und Stromleitungen automatisiert in unserem 3D-Modell zu messen. Für jedes Voxelzentrum  $P$ , das als Baum klassifiziert wurde, berechnen wir die Punkt-Liniensegment-Distanz laut Formel (1) und (2), wobei ein Liniensegment durch Startpunkt  $V$  und Endpunkt  $W$  definiert ist:

$$f(n) = \begin{cases} P - V_2 & t_0 \leq 0 \\ P - (V + t_0(W - V))_2 & 0 < t_0 < 1 \\ P - W_2 & t_0 \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

mit

$$t_0 = \frac{(W - V) \cdot (P - V)}{(W - V) \cdot (W - V)}. \quad (2)$$

Die minimale Distanz zu allen Liniensegmenten wird im entsprechenden Voxel der Octomap gespeichert.

### 3 Datenaufnahme und Netzwerkinitialisierung

In diesem Abschnitt beschreiben wir die zwei Drohnen, die zur Aufnahme der Datensätze verwendet wurden, geben Details zur Aufnahme selbst und erläutern die Trainingsroutine des semantischen Segmentierungsnetzwerkes.

#### 3.1 Hardware

Wenn Hochspannungsleitungskorridore inspiziert werden sollen, bestimmt die Umgebung die Aufnahmeplattform. Ein Multi-Rotor-System ist geeignet, wenn



**Abb. 3:**  
Aufnahmeplattformen: Die obere Aufnahmeplattform ist ein Falcon 8 von Ascending Technologies GmbH und die untere eine eBee von SenseFly.

die Stromleitung über steile Hänge führt. Wobei ein Flächenflügler seine Vorteile bei langen ebenen Gebieten ausspielen kann. Daher haben wir für die Aufnahme unserer Datensätze auch zwei unterschiedliche Drohnen (Falcon 8 und eBee) eingesetzt.

Der Falcon 8 wurde von Ascending Technologies GmbH (2018) entwickelt. Es ist ein Oktorotor, welcher mit einer 16 MPix Sony NEX-5n Systemkamera mit einem 16 mm Objektiv (entspricht 24 mm im Kleinbildformat) ausgestattet ist. Die Herstellerflugzeit dieses Systems liegt bei 15 Minuten.

Die zweite Drohne, die eBee, wurde von SenseFly (2018) entwickelt und ist ein Starrflügler. Sie wurde konzipiert um vorgeplante reguläre Flugmuster autonom abzufliegen und nimmt dabei Bilder in regelmäßigen Abständen auf um die geforderte Bodenauflösung und Bildüberlappung zu erfüllen. Ein Fortsetzen des geplanten Fluges ist nach Batteriewechsel möglich. Die eBee ist mit einer 12 MPix Canon S110 Kompaktkamera ausgestattet. **Abb. 3** zeigt die zwei eingesetzten Kameradrohnen.

### 3.2 Datensatzaufnahme

Um die Generalisierung unseres Datenverarbeitungsprozesses zu zeigen haben wir zwei Datensätze mit den zuvor beschriebenen Plattformen aufgenommen. Abb. 4 gibt einen Überblick über die Szenen, wobei die Abmessungen darin gut zu erkennen sind, welche mit den jeweiligen Drohnen aufgenommen werden können.

Datensatz\_1 wurde mit dem Multi-Rotor Falcon 8 im Sommer aufgenommen. Wir haben einen GPS-unterstützten Flug 40 m über Grund durchgeführt und haben dabei 387 Bilder aufgenommen, welche eine Bodenauflösung von 12 mm/px aufweisen.

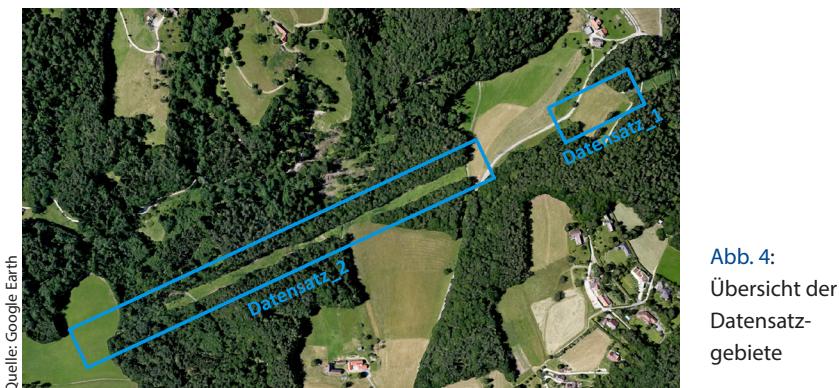


Abb. 4:  
Übersicht der  
Datensatz-  
gebiete



Abb. 5: Vergleich der Datensatzbilder: Die unterschiedliche Auflösung (siehe Strommast) und die jahreszeitliche Änderung der Vegetation sind deutlich erkennbar.

**Tab. 1:** Aufnahmedetails zu den Testdatensätzen

Datensatz	Datensatz_1	Datensatz_2
Aufnahmeplattform	Falcon 8	eBee
Flughöhe [m]	40	85–100
Überflogenes Gebiet [m <sup>2</sup> ]	9.000	44.500
Flugmodus	Manueller Flug	Autonomes Raster
Jahreszeit	Sommer	Herbst
Anzahl der Aufnahmen	387	505
Bildauflösung [px]	4.912 × 3.264	4.000 × 3.000

Datensatz\_2 beinhaltet 505 Bilder mit einer Bodenauflösung von 30 bis 35 mm/px da zwei vorprogrammierte Raster mit der eBee in einer Flughöhe von 85 bzw. 100 m über Grund durchgeführt wurden. Da Datensatz\_2 im Herbst aufgenommen wurde ist in den Bildern auch eine saisonbedingte Verfärbung der Vegetation zu erkennen (Abb. 5). Details zu den Datensätzen sind in Tab. 1 aufgelistet.

### 3.3 Training des semantischen Segmentierungsnetzwerks

Um das neuronale Netz zu trainieren haben wir 25 Bilder von Datensatz\_1 manuell bezüglich der Klassen in Tab. 2 annotiert. Des Weiteren wurden sie augmentiert bezüglich Rotation und Spiegelung und in Teilbereiche von 256 × 256 px mit einem Überlapp von 32 px aufgeteilt, um sie auf der GPU verarbeiten zu können. Das Training des Netzes wurde anhand der Beschreibung in (Shelhamer et al. 2017) durchgeführt. Zuerst wurde das Netz mit den vortrainierten Gewichten von fcn-32s-pascalcontext (Pascal Context 2018) initialisiert und in Abschnitten (32 s, 16 s und 8 s) zu je 160.000 Iterationen trainiert. Schließlich wurde noch das CRFasRNN angehängt und das gesamte Netz für weitere 160.000 Iterationen verfeinert.

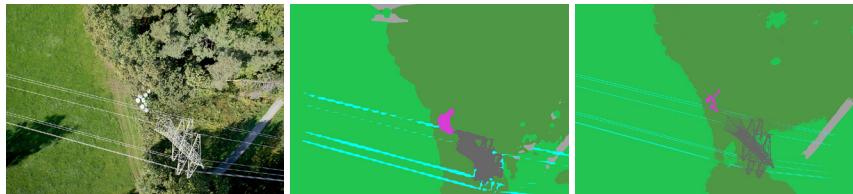
**Tab. 2:** Semantische Klassen mit den dazugehörigen Farbkodierungen

Klasse	Farbe	Klasse	Farbe
Strommast	Dunkelgrau	Gebäude	Rot
Baum	Dunkelgrün	Straße	Hellgrau
Gras	Hellgrün	Objekt	Magenta
Feld	Hellbraun	Stromleitung	Cyan

## 4 Resultate

In diesem Kapitel präsentieren wir Ergebnisse unserer automatisierten Stromleitungsinspektion bezüglich des Sicherheitsabstandes zwischen Stromleitungen und umgebenden Bäumen.

Ein zu segmentierendes RGB-Bild ist in [Abb. 6](#) (links) dargestellt und die dazugehörige 2D-semantische Segmentierung in [Abb. 6](#) (rechts). Um die Notwendigkeit des CRFasRNN zu zeigen ist in [Abb. 6](#) (Mitte) ein Zwischenergebnis



**Abb. 6:** Semantische Segmentierung eines Testbildes aus Datensatz\_1: Links ist das Eingabebild, in der Mitte ein grobes Zwischenergebnis des FCN und rechts die pixelakurate Segmentierung mittels CRFasRNN dargestellt.

vom FCN8s abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass das CRF die Grenzen der Objekte verbessert. Im Speziellen werden die Objektgrenzen von Stromleitungen und vom Strommast deutlich verbessert.

Bevor wir die semantisch interpretierte 3D-Rekonstruktion zeigen, möchten wir das Aufnahmemuster mittels den ausorientierten Kameras und den sparsen Punkten, das Ergebnis der SfM, präsentieren ([Abb. 7](#) und [Abb. 8](#)). Es ist deutlich



**Abb. 7:** Sparses Rekonstruktionsergebnis von Datensatz\_1. Es zeigt die sparse Punktwolke und Kameraposen, welche mittels Structure-from-Motion berechnet wurden.



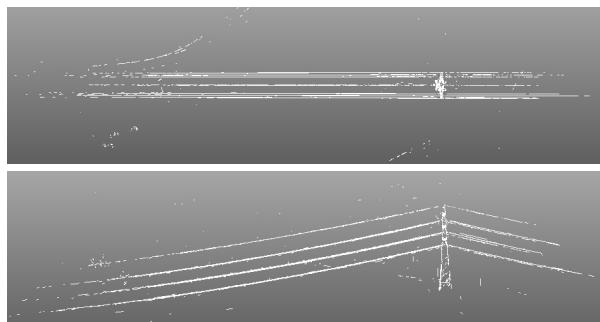
**Abb. 8:** Sparses Rekonstruktionsergebnis von Datensatz\_2. Es zeigt die sparse Punktwolke und Kameraposen, welche mittels Structure-from-Motion berechnet wurden.

zu sehen, dass Gras recht gut rekonstruiert wird, wobei Stromleitung, Strommast und Bäume beinahe komplett fehlen. Daher ist die sparse Rekonstruktion allein für unsere Inspektionsaufgabe nicht ausreichend.

Um die Rekonstruktion bezüglich der Stromleitungen zu erweitern, verwenden wir den Ansatz von Hofer et al. (2016) und verwenden die ausorientierten Kameras der SfM. Das Ergebnis der linienbasierten Rekonstruktion ist in [Abb. 9](#) dargestellt. Durch weiteres Filtern bezüglich der Semantik ist es möglich nur die Stromleitungen zu rekonstruieren.

Bis jetzt fehlt noch eine akkurate Rekonstruktion der Bäume, dafür verwenden wir die in [Kap. 2.4](#) und [Kap. 2.5](#) beschriebene dichte Rekonstruktionspipeline und erhalten eine dichte Rekonstruktion der Umgebung ohne linienartige Strukturen (Stromleitungen), die in [Abb. 10](#) dargestellt ist.

Fügt man nun alle Komponenten zusammen, simplifiziert die Rekonstruktion, transferiert die Semantik und fügt die Distanzmessungen hinzu, so erhält man das finale Ergebnis der automatisierten Inspektion des Sicherheitsabstandes

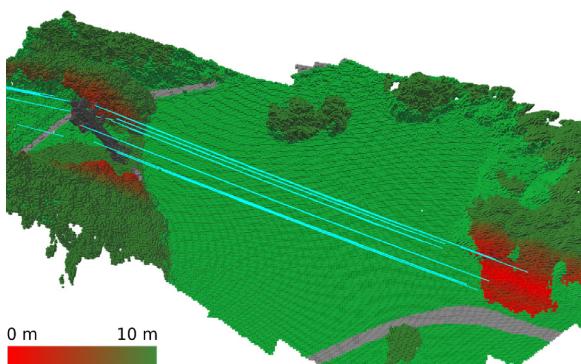


**Abb. 9:**  
Top- und Seitenansicht der rekonstruierten Liniensegmente aus Datensatz\_1: Es ist die Rekonstruierbarkeit von Stromleitungen und Strommasten durch Liniensegmente erkennbar.

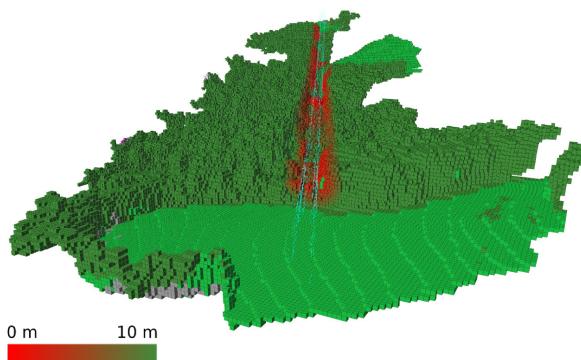
zwischen Stromleitungen und Bäumen (Abb. 11 und Abb. 12). Durch die Rasterung der Rekonstruktion in Voxel von 50 cm haben wir eine Speicherreduktion um einen Faktor von 85 erzielt.



**Abb. 10:**  
Dichte Rekonstruktion aus Datensatz\_1:  
Es ist deutlich erkennbar, dass die Vegetation  
gut repräsentiert ist und die gefilterte  
Stromleitung nicht in der Rekonstruktion  
vorhanden ist.



**Abb. 11:** Semantische  
3D-Rekonstruktion mit  
Distanzevaluierung aus  
Datensatz\_1: Die einzelnen  
Objekte wurden  
laut Tab. 2 bezüglich der  
semantischen Klasse  
eingefärbt und zusätz-  
lich die Distanzmessun-  
gen mittels Farbverlauf  
von Rot zu Dunkelgrün  
visualisiert.



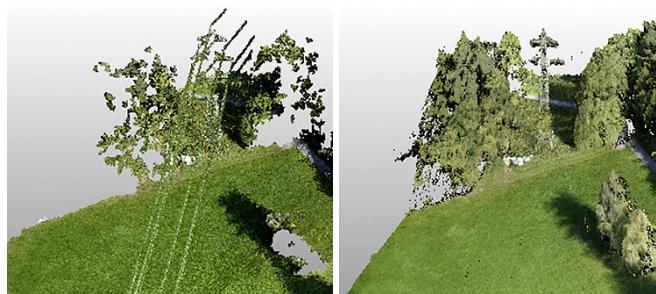
**Abb. 12:** Semantische  
3D-Rekonstruktion mit  
Distanzevaluierung aus  
Datensatz\_2: Die einzelnen  
Objekte wurden  
laut Tab. 2 bezüglich der  
semantischen Klasse  
eingefärbt und zusätz-  
lich die Distanzmessun-  
gen mittels Farbverlauf  
von Rot zu Dunkelgrün  
visualisiert.

## 5 Evaluierung

In diesem Kapitel möchten wir unsere Designentscheidungen untermauern, die während des Entwickelungsprozesses der Pipeline getroffen wurden.

### 5.1 Rekonstruierbarkeit von Vegetation

Um in 3D-Messungen zwischen Stromleitung und Bäumen durchführen zu können, muss die Vegetation detailliert rekonstruiert werden. In erster Linie wird dafür oft PMVS von Furukawa und Ponce (2010) verwendet. PMVS erzielt die Verdichtung der Rekonstruktion durch planares Ausweiten von lokalen Stützpunkten. [Abb. 13](#) (links) zeigt das Ergebnis dieser Methode. Wobei diese Methode für von Menschenhand geschaffene Strukturen gute Ergebnisse erzielt, ist es eindeutig erkennbar, dass PMVS nicht für die Verdichtung von Vegetation geeignet ist, da diese sehr viel Struktur und nicht planare Regionen aufweist. In [Abb. 13](#) (rechts) wurde dieselbe Szene mit unserem dichten Rekonstruktionsansatz (siehe [Kap. 2.4](#) und [Kap. 2.5](#)) rekonstruiert. Damit erzielen wir gute Ergebnisse bezüglich der Vegetation, die geeignet ist um Messungen in 3D durchführen zu können. Des Weiteren erkennt man auch, dass die Stromleitungen nicht rekonstruiert wurden, was jedoch darauf basiert, dass die Tiefenbilder bezüglich der Stromleitung gefiltert wurden da linienartige Strukturen für den dichten Ansatz wegen den Bedingungen in der Kostenfunktion schwer zu rekonstruieren sind. Dieser Nachteil wird jedoch durch unseren zweispurigen Ansatz durch semantisches Aufteilen der Rekonstruktion in linienartige und dichte Objekte gelöst.



**Abb. 13:**  
Vergleich von  
3D-Rekonstruktionsmethoden:  
Im linken Bild ist  
die semidichte  
Punktwolke, die

mittels PMVS erzeugt wurde, dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Vegetation (Bäume) durch das lokale Regiongrowing Verfahren nicht ausreichend rekonstruiert wird. Rechts ist die dichte Rekonstruktion unseres Ansatzes dargestellt, der die Vegetation detailgetreu rekonstruiert und somit für weitere Inspektionsaufgaben geeignet ist. Man beachte jedoch, dass die Stromleitung in der dichten Rekonstruktion (rechts) nicht vorhanden ist, da sie zuvor in den Tiefenbildern semantisch gefiltert wurde.

## 5.2 Einfluss der semantischen Information auf die 3D-Rekonstruktion

In diesem Experiment wollen wir den Einfluss der semantischen Segmentierung auf die 3D-Rekonstruktion untersuchen. Da wir ein dichtes Rekonstruktionsverfahren verwenden, erhalten wir für jeden Pixel im Bild einen Tiefenwert. In



**Abb. 14:** Tiefenbilder: Links: Referenz Bild; Mitte: fehlerbehaftetes Tiefenbild im Bereich von linienartigen Strukturen (Stromleitung); Rechts: Semantisch gefiltertes Tiefenbild. Die fehlerbehafteten Tiefenwerte im Bereich der Stromleitung wurden automatisch bezüglich der Semantik maskiert.

Bereichen großer Tiefendiskontinuitäten können diese Werte auf Grund der Regularisierung fehlerbehaftet sein. Diese großen Tiefendiskontinuitäten treten in unserem Fall speziell bei den Stromleitungen auf, da sie linienartige Strukturen sind und deren Durchmesser nur durch wenige Pixel (4–8 px) im Bild repräsentiert wird (Abb. 14). Da wir mehrere Ansichten zur Rekonstruktion der Szene verwenden, ist es möglich den Bereich der fehlerbehafteten Tiefenwerte mittels der semantischen Segmentierung automatisiert zu maskieren, damit nach der Fusionierung der Tiefenbilder eine genaue Rekonstruktion entsteht, welche aber auf Grund der semantischen Filterung keine Stromleitungen enthält. Ein



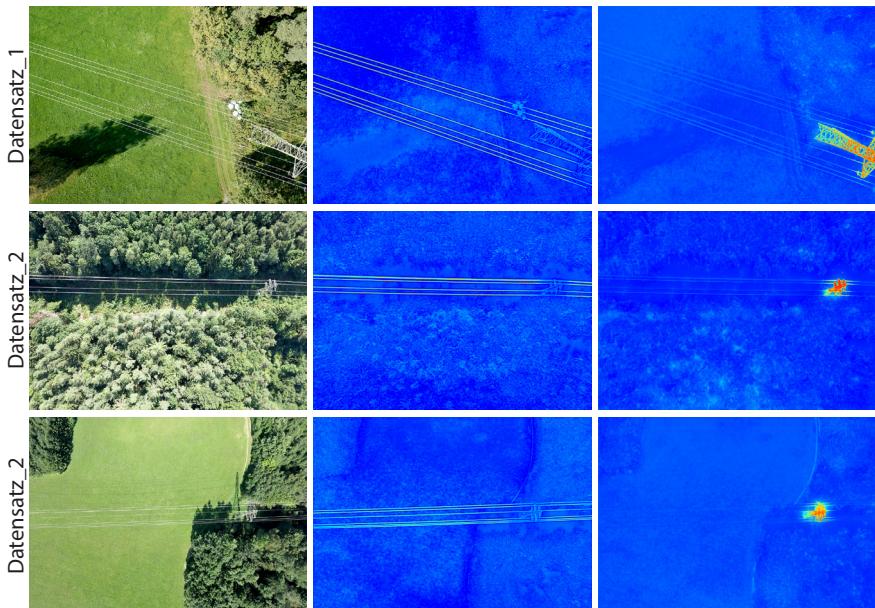
**Abb. 15:**  
Vergleich der  
dichten 3D-Re-  
konstruktion  
ohne (Links)  
und mit (Rechts)  
Filterung der  
linienartigen  
Stromleitungen

in den Tiefenbildern. Mit den blauen Ellipsen sind die Artefakte in der ungefilterten Rekonstruktion markiert, welche in der gefilterten Version nicht mehr rekonstruiert werden.

Vergleich der 3D-Rekonstruktion ohne und mit semantischer Filterung ist in Abb. 15 zu sehen. Es ist darin deutlich zu erkennen, dass durch die Filterung Artefakte, welche vom Boden zu der Stromleitung und umgekehrt wachsen, entfernt sind. Diese Artefakte würden die finale Inspektion des Sicherheitsabstandes beeinflussen und nicht vorhandene Unterschreitungen generieren.

### 5.3 Generalisierung der semantischen Segmentierung

Da pixelweise Annotation der Trainingsdaten eine zeitaufwändige Aufgabe ist, ist es wichtig, dass die semantische Segmentierung auf unterschiedliche Aufnahmemethoden generalisiert. Um diese Generalisierung zu zeigen, haben wir zwei unterschiedliche Datensätze aufgenommen (siehe Kap. 3.2). Das semantische Netzwerk wurde mittels einzelnen Bildern aus Datensatz\_1 trainiert und



**Abb. 16:** Generalisierung der semantischen Segmentierung: Die erste Zeile zeigt ein Testbild aus Datensatz\_1, aus welchem auch die Trainingsbilder für das semantische Netzwerk stammen. Die weiteren Zeilen zeigen Testbilder aus Datensatz\_2. Von links nach rechts sind jeweils das Eingabebild, die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Klasse Stromleitung und die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Klasse Strommast dargestellt. Je wärmer die Farbe, desto wahrscheinlicher gehört das entsprechende Pixel zur jeweiligen Klasse. Da ähnliche Wahrscheinlichkeiten vorliegen, generalisiert die semantische Segmentierung zu Datensatz\_2.

wurde auf die Bilder aus Datensatz\_2 angewandt. Es ist in Abb. 16 zu erkennen, dass, obwohl Datensatz\_2 eine gröbere Pixelauflösung aufweist und zu einer anderen Jahreszeit aufgenommen wurde, die Wahrscheinlichkeiten der Objekte aus Datensatz\_2 mit denen aus Datensatz\_1 vergleichbar sind. Somit generalisiert die semantische Segmentierung in unserem Experiment.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Artikel haben wir eine automatisierte Verarbeitungsabfolge zur Inspektion von Hochspannungsleitungskorridoren bezüglich der Unterschreitung des Sicherheitsabstandes zwischen Bäume und Stromleitungen vorgestellt. Die Verarbeitungsroutine entscheidet eigenständig, basierend auf der Semantik, welche 3D-Rekonstruktionsmethode für linienartige Strukturen (Stromleitung) und solide Objekte (Umgebung) verwendet wird. Die semantische Information wird mittels Fully Convolutional Neural Networks berechnet.

Auf Grund der Octree-basierten Simplifizierung der semantischen Rekonstruktion wird eine effiziente Durchführung der Inspektion und weiterer Nachverarbeitungsschritte ermöglicht. Das semantische Wissen, welches in der 3D-Rekonstruktion enthalten ist, ermöglicht die automatisierte Analyse von Unterschreitungen des Sicherheitsabstandes zwischen Hochspannungsleitung und im Korridor wachsender Vegetation. Da wir eine geografisch kodierte semantische 3D-Rekonstruktion erstellen, sind die Informationen wo Instandhaltungsarbeiten getätigten müssen implizit enthalten und können automatisiert in eine Aufgabenliste exportiert werden. Die Evaluierung des Einflusses der semantischen Segmentierung auf die 3D-Rekonstruktion hat ergeben, dass die automatisierte Aufteilung der 3D-Rekonstruktionsroutinen in linienartige und dichte Objekte die Qualität der 3D-Rekonstruktion und somit auch die automatische Bestimmung der Unterschreitung des Sicherheitsabstandes zwischen Bäume und Stromleitung verbessert hat. In den Experimenten haben wir gezeigt, dass die semantische Segmentierung auf weitere Datensätze generalisiert, wobei sich die Aufnahmeroutinen sowie die Jahreszeiten bei den Aufnahmen unterschieden haben. Da wir einen generellen Ansatz zur 3D-Rekonstruktion und semantischen Segmentierung beschrieben haben, kann dieser auch einfach auf andere Inspektions- und Messaufgaben angewandt werden.

## Dank

Diese Arbeit wurde unterstützt von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Projekt FreeLine (Bridge1/843450) und von OMICRON electronics GmbH.

## Literatur

- Agisoft PhotoScan (2018): [www.agisoft.com](http://www.agisoft.com), letzter Zugriff 01/2018.
- Ascending Technologies GmbH (2018): [www.asctec.de](http://www.asctec.de), letzter Zugriff 01/2018.
- Daftry, S.; Maurer, M.; Wendel, A.; Bischof, H. (2013): Flexible and user-centric camera calibration using planar fiducial markers. Proceedings of the British Machine Vision Conference, BMVA Press.
- Furukawa, Y.; Ponce, J. (2010): Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), S. 1362–1376.
- Haralick, R. M.; Lee, D.; Ottenburg, K.; Nolle, M. (1991): Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 592–598.
- Hofer, M.; Maurer, M.; Bischof, H. (2016): Efficient 3d scene abstraction using line segments. *Computer Vision and Image Understanding*, 157, S. 167–178.
- Hornung, A.; Wurm, K. M.; Bennewitz, M.; Stachniss, C.; Burgard, W. (2013): Octomap: an efficient probabilistic 3d mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*, 34(3), S. 189–206.
- Irschara, A.; Rumpf, M.; Meixner, P.; Pock, T.; Bischof, H. (2012): Efficient and Globally Optimal Multi View Dense Matching for Aerial Images. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, S. 227–232.
- Józków, G.; Vander Jagt, B.; Toth, C. (2015): Experiments with uas for automatic modeling of power line 3d geometry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40-1(W4), S. 403–409.
- Kähler, O.; Prisacariu, V. A.; Ren, C. Y.; Sun, X.; Torr, P. H. S.; Murray, D. W. (2015): Very High Frame Rate Volumetric Integration of Depth Images on Mobile Device. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 21(11), S. 1241–1250.
- Long, J.; Shelhamer, E.; Darrell, T. (2014): Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. *arXiv Prepr. arXiv1411.4038*.
- Lowe, D. G. (2004): Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vision*, 60(2), S. 91–110.
- Marcaccio, J. V.; Markle, C. E.; Chow-Fraser, P. (2015): Unmanned aerial vehicles produce high-resolution, seasonally-relevant imagery for classifying wetland vegetation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40-1(W4), S. 249–256.
- Maurer, M.; Hofer, M.; Fraundorfer, F.; Bischof, H. (2017): Automated inspection of power line corridors to measure vegetation undercut using uav-based images. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2(W3), S. 33–40.
- Nießner, M.; Zollhöfer, M.; Izadi, S.; Stamminger, M. (2013): Real-time 3d reconstruction at scale using voxel hashing. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(6), 169.
- Nistér, D. (2004): An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 26(6), S. 756–777.
- Nistér, D.; Stewenius, H. (2006): Scalable recognition with a vocabulary tree. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2, S. 2161–2168.

- Pascal Context (2018): <http://dl.caffe.berkeleyvision.org/pascalcontext-fcn32s-heavycaffemodel>, letzter Zugriff 01/2018.
- Pix4D (2018): <https://pix4d.com>, letzter Zugriff 01/2018.
- Rumpler, M.; Daftry, S.; Tscharf, A.; Pretenthaler, R.; Hoppe, C.; Mayer, G.; Bischof, H. (2014): Automated end-to-end workflow for precise and geo-accurate reconstructions using fiducial markers. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2(3), 135.
- SenseFly (2018): [www.sensefly.com](http://www.sensefly.com), letzter Zugriff 01/2018.
- Shekhovtsov, A.; Reinbacher, C.; Gruber, G.; Pock, T. (2016): Solving Dense Image Matching in Real-Time using Discrete-Continuous Optimization. arXiv Prepr. arXiv1601.06274.
- Shelhamer, E.; Long, J.; Darrell, T. (2017): Fully convolutional networks for semantic segmentation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 39(4), S. 640–651.
- Triggs, B.; McLauchlan, P.F.; Hartley, R.I.; Fitzgibbon, A. W. (2000): Bundle adjustment – a modern synthesis. Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms: Theory and Practice, ICCV '99, S. 298–372, London, UK, UK. Springer-Verlag.
- Tscharf, A.; Rumpler, M.; Fraundorfer, F.; Mayer, G.; Bischof, H. (2015): On the use of uavs in mining and archaeology – geo-accurate 3d reconstructions using various platforms and terrestrial views. International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-1, S. 15–22.
- Zhang, J.; Jung, J.; Sohn, G.; Cohen, M. (2015): Thermal infrared inspection of roof insulation using unmanned aerial vehicles. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40-1(W4), S. 381–386.
- Zheng, S.; Jayasumana, S.; Romera-Paredes, B.; Vineet, V.; Su, Z.; Du, D.; Huang, C.; Torr, P. (2015): Conditional random fields as recurrent neural networks. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, S. 1529–1537.

## Kontakt

Michael Maurer

Technische Universität Graz

Institut für maschinelles Sehen und Darstellen

Inffeldgasse 16, 8010 Graz, Österreich

[maurer@icg.tugraz.at](mailto:maurer@icg.tugraz.at) | [aerial@icg.tugraz.at](mailto:aerial@icg.tugraz.at)

# Forstwirtschaft 4.0 – Inventur und Schädlingsfrüherkennung mit Drohne, Photogrammetrie und Multispektralanalyse

Albrecht von Ruffer | Simon Mondry

## 1 Einleitung

SKYLAB wurde 2016 gegründet und hat bislang mehr als 1.000 ha kommerzieller Forstflächen mit UAVs jeglicher Art mit Photogrammetrie und Multispektralanalyse ausgewertet. Die Methodiken wurden in Zusammenarbeit mit führenden forstlichen Versuchsanstalten und Profis in der forstlichen Betriebsführung und Plantagenmanagement entwickelt.

## 2 UAV-Befliegungen

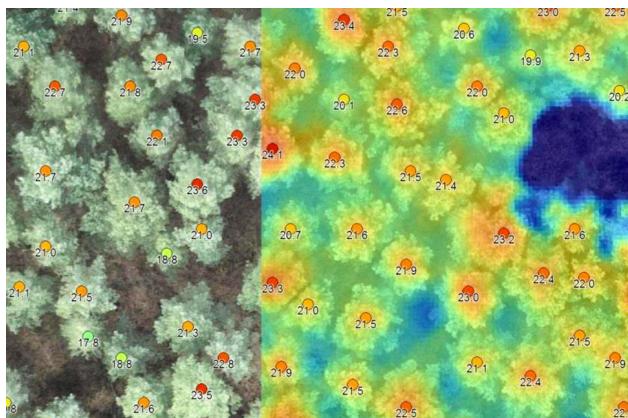
Je nach Einsatzzweck und Größe der zu befliegenden Fläche wird zwischen Multikoptern oder Starrflügler mit bis zu 80 Minuten Flugzeit gewählt. Bei einer Flughöhe von 100 m erreicht die hochauflösende RGB Kamera im UAV eine Bodenpixelgröße von kleiner 2 cm. Für Auswertungen zur Pflanzenvitalität ist im UAV ebenfalls eine Multispektralkamera eingebaut. Durch die Verwendung von DGPS ist eine direkte Georeferenzierung möglich. Für Anwendungen mit höheren Genauigkeitsanforderungen werden eingemessene Bodentargets im Gebiet verteilt. Meist genügt dem forstlichen Auftraggeber jedoch eine Lagegenauigkeit von bis zu 2 m. Die Flugplanung kann mittels vorhandener Bewirtschaftungsflächen im Shapeformat geplant und programmiert werden. Durch die halbautomatische Flugdurchführung wird lediglich ein UAV Pilot für Start, Landung, sowie im Ernstfall benötigt.

## 3 Auswerteverfahren

Sowohl die RGB und multispektralen Bilddaten werden in der Auswertesoftware Pix4D prozessiert und referenziert. Das Ausgabeprodukt dieser photogrammetrischen Berechnung ist die Punktwolke, das hochauflöste RGB Orthophoto und die Orthophotos der jeweiligen Spektralbereiche.

### 3.1 Einzelbaumerkennung

Für eine Bestandsanalyse für forstliche Bewirtschaftungsflächen ist die Anzahl der Einzelbäume und deren Höhe von Interesse. Heutzutage wird in fast allen Bewirtschaftungsflächen durch Stichproben bei terrestrische Inventuren auf



**Abb. 1:**  
Ausschnitt einer  
Einzelbaum-  
erkennung mit  
Höhen. Links das  
Orthophoto als  
Hintergrundkarte,  
rechts das normali-  
sierte Oberflächen-  
modell mit den  
Einzelbäumen.

die gesamte Fläche extrapoliert. Die Verwendung von UAVs stellt eine flächen-deckende Inventur da, und berücksichtigt Kalamitäten, Bepflanzungsdichte und Baumart. Für die Einzelbaumerkennung wird die Punktwolke verwendet, die zuvor durch eine CSF Filterung in Bodenpunkte segmentiert wird. Durch die Interpolation der Bodenpunkte wird ein digitales Geländemodell (DGM) berechnet welches zur Erstellung des normalisierten Oberflächenmodells (nDOM) dient. Einzelne Bäume werden mit Hilfe einer lokalen Maxima Filterung definiert, die den Höhenwert des nDOM annimmt (Abb. 1). Somit sind Parameter wie exakte Stockzahl, dezimetergenauen Einzelbaum-, Bestandesmittel- und -oberhöhen abzuleiten. Diese Parameter können für jeden beliebigen Bereich, pro Hektar oder je Bewirtschaftungseinheit ausgegeben werden.

### 3.2 Kronenfläche

Mit Hilfe von Bilderkennungsverfahren kann die Kronenfläche je Baum und die überschirmte Fläche für den Bestand ermittelt und der Kronenschlussgrad abgeleitet werden (Abb. 2). Im Umkehrschluss wird auch die Größe der einzelnen Lücken ermittelt. Die automatische Detektion von Lücken und Lückengröße hilft bei Entscheidungen zur Bewirtschaftung, zum Beispiel ob aufgeforstet oder eingeschlagen werden soll oder ob eine Regeneration durch Naturverjüngung möglich ist.

### 3.3 Baumarten Segmentierung

Der spektrale Fingerprint verschiedener Baumarten ist durch eine Multispektralanalyse möglich (Abb. 3). Ein pixelbasiertes Bilderkennungsverfahren ermöglicht die Unterscheidungen in Laub und Nadelholzbestände sowie die Berechnung der flächenmäßigen Verteilung im Bestand bis hin zum gesamten Forstbetrieb. Diese Daten zeigen Mischungsverhältnisse die als Vorbereitung für die nächste Forsteinrichtung dienen.

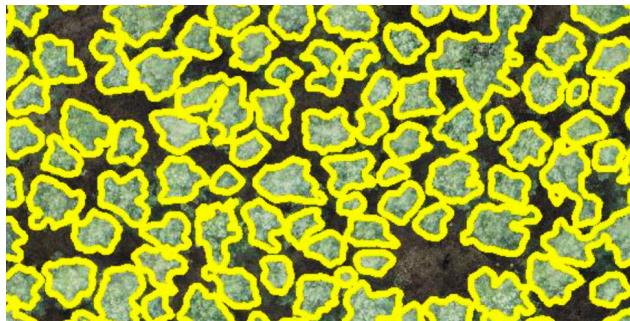


Abb. 2:  
Kronenflächen-  
bestimmung  
anhand Bild-  
erkenntnungs-  
verfahren



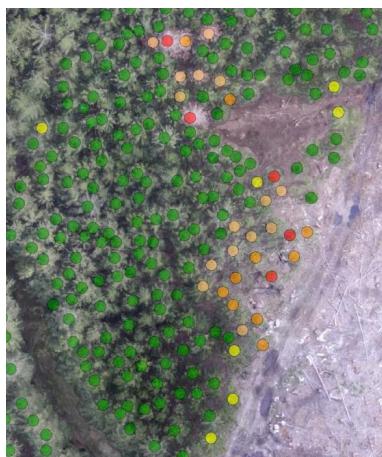
Abb. 3:  
Baumarten-Seg-  
mentierung  
anhand von einer  
Multispektral-  
analyse. Der spek-  
trale Fingerprint der  
unterschiedlichen  
Bäume ist deutlich  
zu erkennen.

### 3.4 Stratifizierung

Auf Basis der errechneten Höhen, Baumzahlen, Kronenflächen und Baumartensmischung wird eine Stratifizierung bzw. Segmentierung erstellt (Abb. 4). Dabei werden die Bestände zu homogenen Einheiten zusammengefasst und gesondert ausgewiesen. Diese Segmentierung kann als Grundlage für eventuelle Neuordnung der Bewirtschaftungseinteilungen und Stichprobeneinteilung für terrestrische Inventuren herangezogen werden.



**Abb. 4:** Stratifizierung einer Waldbewirtschaftungsfläche anhand von Baumhöhen, Baumarten und Kronenfläche



**Abb. 5:** Borkenkäferfrüherkennung im Harz 2017. Grüne Bäume symbolisieren gesunde Bäume, orange bis rote Bäume sind mit Borkenkäfer befallen.

### 3.5 Früherkennung

Schäden durch Insekten und andere Schädlinge haben einen zunehmenden Einfluss auf die Vitalität und Profitabilität von Wald und Forstplantagen. Trotz steigender Aufwendungen für die intensive Früherkennungssuche steigen auch die tatsächlichen wirtschaftlichen Schäden. Der Befall von Borkenkäfern in Fichtenbeständen hat in einigen Regionen katastrophale Ausmaße angenommen. Mittels Spezialkameras und spezifischer Auswerteverfahren kann der Befall aus der Luft bereits im frühen Stadium erkannt werden.

Eine von Borkenkäfer befallene Fichte zeichnet oft erst nach mehreren Wochen eine Verfärbung der Nadeln. Die terrestrische Suche ist sehr zeitaufwändig und erfordert ein hohes Maß an Konzentration und Erfahrung, um befallene Bäume anhand von Einbohrlöchern oder Bohrmehl zu identifizieren. Dabei werden nicht nur viele Ressourcen (Geld und Arbeitskräfte) gebunden, sondern häufig auch befallene Bäume übersehen oder zu spät erkannt, welches Holzverluste und einen weiteren Aufbau der Schädlingspopulation zur Folge hat. Bereits wenige Tage nach dem ersten Einbohren ist die Fichte jedoch so stark gestresst, dass sich die Physiologie der Nadeln ändert. Dies lässt sich noch nicht durch das menschliche Auge, jedoch mit Hilfe von Multispektralkamera erfassen. Die Reflektanz der Nadeln ändert sich in bestimmten Bereichen des sichtbaren und nahinfraroten Lichts. Mit Hilfe der von SKYLAB entwickelten Indizes und statistischer Auswerteverfahren, lässt sich so ein gestresster Baum bereits im sehr

früher Stadium erkennen und verschafft wertvolle Zeit, um befallene Bäume frühzeitig zu entfernen.

SKYLAB hat gemeinsam Feldversuche mit der NW FVA im Sommer 2017 ein Verfahren zur frühzeitigen Erkennung von Borkenkäferbefall entwickelt. Befalls-Hotsports wurden mit großer Zuverlässigkeit erkannt und konnten bereits kurz nach dem Erstbefall – zum Zeitpunkt des Einbohrens und Anlage der Rammelkammer – deutlich ausgewiesen werden ([Abb. 5](#)).

Dieses Verfahren kann zu dramatischen Einsparungen in der aufwändigen terrestrischen Suche nach Borkenkäfer führen. Befallene Bäume können außerdem sehr frühzeitig entfernt werden. Eine weitere Verbreitung wird somit schnell unterbunden und verhindert oder verringert die Schädigung weiterer Bestände. Der schnelle Gesamtüberblick über den Bestand erlaubt zudem die bessere und effiziente Einsatzplanung der Holzernte- und Logistikkette.

## 4 Zukünftige Entwicklungen und Einsatzmöglichkeiten

Die von SKYLAB entwickelten Verfahren sollen zur Anwendung in anderen Bereichen weiterentwickelt werden. Das Verfahren zur forstlichen Inventur ist auch auf Flugzeugdaten anwendbar und kann künftig durch Satellitendaten unterstützt werden, um eine noch höhere Kosten- und Zeiteffizienz zu erreichen. Das Verfahren eignet sich außerdem sehr gut, um die Vegetation entlang von Trassenverläufen, beispielsweise Strom-, Gas- oder Bahntrassen zu vermessen und den zeitlich optimierten Rückschnitt zu planen.

Das Verfahren zur Früherkennung von Borkenkäferbefall soll künftig auch zur Früherkennung in anderen Baumarten zum Einsatz kommen und hierfür ggf. angepasst werden. Besonders nützlich wäre etwa die Früherkennung von Mehltau in Apfelplantagen oder im Weinbau.

### Kontakt

Albrecht von Ruffer | Simon Mondry

SKYLAB GmbH

Wendenstraße 388, 20537 Hamburg

[ruffer@skylab.global](mailto:ruffer@skylab.global) | [mondry@skylab.global](mailto:mondry@skylab.global)

[www.skylab.global](http://www.skylab.global)



# Einsatz von UAV im Bereich der Deutschen Bahn AG

Mario Finkbeiner

## 1 Einführung

Die DB Sicherheit GmbH ist der Sicherheitsdienstleister der Deutschen Bahn. Im Rahmen ihrer Aufgabenbewältigung setzt die DB Sicherheit seit 2015 aktiv auf den Einsatz von Multicoptern (UAV, Drohnen). Für diesen speziellen Technikeinsatz hat die DB 2016 das Kompetenzcenter Multicopter aufgestellt, das heute konzernübergreifend führend in Technologie und Administration für Drohneneinsätze innerhalb der DB AG ist. Mit unterschiedlichen UAV-Typen werden unterschiedliche Aufgaben bewältigt, die im Folgenden beschrieben werden.

Aktuelle Drohneneinsätze sind geprägt von der örtlichen Präsenz der steuernden Piloten. Aufgrund neuer technischer und luftrechtlicher Möglichkeiten entwickeln sich die Einsätze von Drohnen zunehmend in Richtung ferngesteuertes bzw. halb- oder vollautomatisiertes Fliegen. Diese Entwicklung wird vom Kompetenzcenter der DB Sicherheit aktiv begleitet und vorangetrieben. Vor allem im Hinblick auf die Netzstruktur ergeben sich große Vorteile durch den Einsatz von UAV.

## 2 Drohnen im Sicherheitsbereich

Der deutsche Begriff „Sicherheit“ ist allumfassend und nicht differenziert. Im Englischen unterteilt sich dieser in „Security“ und „Safety“. Der Begriff „Security“ umgrenzt hier alle Aktivitäten zum Schutz eines Objektes (Person, Gebäude, Maschinen, Einrichtungen) vor der Umgebung, unabhängig davon ob es sich um Einzelobjekte oder -personen oder Gruppen von Objekten oder Personen handelt. Ein klassisches Beispiel hierfür ist der Objekt- und Personenschutz. Der „Safety“-Begriff hingegen umgrenzt alle Aktivitäten, die sich mit dem Schutz der Umgebung vor einem Objekt befassen. Diesem sind beispielsweise die Themen Verkehrssicherheit, Stand- und Brandsicherheit zuzuordnen.

## 2.1 Drohneneinsatz im Bereich Security

Klassisch durch Personen- und Technikeinsatz (z.B. Videoüberwachungsanlage) besetzt, wird dieser Bereich zunehmend durch den Einsatz von Drohnen unterstützt und flexibilisiert. Die DB Sicherheit setzt Drohnen insbesondere zu präventiven und reaktiven Zwecken ein.

### 2.1.1 Präventiver Einsatz

Das rd. 33.000 km umfassenden Streckennetz steht insbesondere als Angriffsziel, wie z.B. die Zerstörung der Kabel- und Signalverbindungen durch Metalldiebstähle oder Brandanschläge im Fokus kriminell oder politisch motivierter Straftaten ([Abb. 1](#)). Durch den präventiven Einsatz von Drohnen im Tag- aber auch im Nachtbetrieb werden besonders gefährdete Anlagen bzw. Streckenabschnitte gesichert. Durch die flexible, für potenzielle Angreifer zeitlich und

räumlich nicht einzugrenzende Präsenz sowie die tag- und nacht bildgebenden Kameratechnik wird ein hoher Präventionseffekt erzielt. Hierbei werden sowohl Einzelfotos, Orthophotografien, Videoaufnahmen, Livebildübertragungen und Bildstreaming realisiert.

Ein weiteres Einsatzfeld sind Luftaufnahmen von Grundstücken und Gebäuden zur Bewertung verschiedener Aspekte zur Erstellung von Sicherheitskonzepten ([Abb. 2](#) und [Abb. 3](#)). Hier steht die Identifizierung möglicher Schwachstellen und Angriffspunkte z.B. für

Bild: DB Sicherheit



**Abb. 1:** Kabelkanäle an Bahnstrecke

Einbrüche im Mittelpunkt. Die nachfolgende Bewertung fließt dann in andere Präventivmaßnahmen wie z.B. das Aufstellen von Kameras, das Errichten von Zäunen u.a. ein.

### 2.1.2 Reaktiver Einsatz

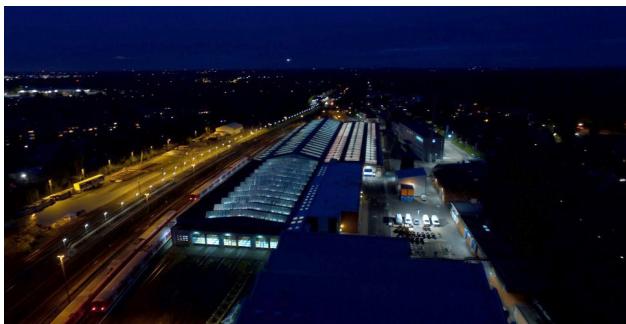
Durch zunehmende Verkehrsichte und wachsende Sorglosigkeit beim Betreten von Bahnanlagen häufen sich Beeinträchtigungen des Bahnverkehrs. Bereits eingetretene Beeinträchtigungen werden reaktiv durch Drohneneinsätze

Bild: DB Sicherheit



**Abb. 2:**  
Zugabstellanlage

Bild: DB Sicherheit



**Abb. 3:**  
DB Werk Hamburg,  
Nachtaufnahme

begleitet (Abb. 4). Hier setzt die DB Sicherheit ihre Drohnen vornehmlich zur Dokumentation, Schadensumfangs- und Ursachenermittlung sowie zur Steuerung des Einsatzpersonals ein (Abb. 5). Im Rahmen dieser Tätigkeiten kommen sowohl Einzelfotos, Videoaufnahmen, Livebildübertragungen, Bildstreaming als auch Orthophotografie und nachfolgendes 3D-Modeling zum Tragen.

Bild: DB Sicherheit



**Abb. 4:**  
Wärmebildauf-  
nahme unbefugter  
Personen

Bild: DB Sicherheit



**Abb. 5:**  
Unglücksstelle  
Bad Aibling

## 2.2 Drohneneinsatz im Bereich Safety

Im Safety-Bereich, der insbesondere die Themen Verkehrssicherheit, Stand- und Brandsicherheit umfasst, setzt die DB Sicherheit Drohnen an Gebäuden, Hochbauten und Brücken sowie über Grundstücken ein. Die hier gefertigten Aufnahmen dienen der Dokumentation von Istzuständen. Auch hier erfolgt der Einsatz präventiv und reaktiv.

### 2.2.1 Präventiver Einsatz

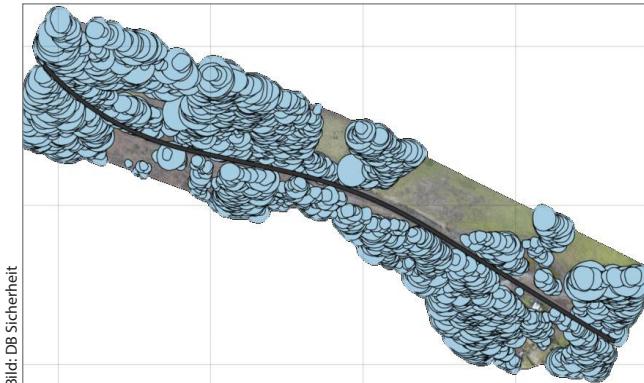
Zur Vermeidung von Beeinträchtigungen der Verkehrs-, Stand- und Brandsicherheit werden luftgestützte Aufnahmen von Gebäuden, Hochbauten und Brücken gefertigt. Aufgrund zunehmend auftretender Witterungseinflüsse wie z. B. Starkregen oder Starkwind, der zunehmenden Betrachtung bahnnaher Vegetation unter Naturschutzaspekten und dem Anstieg des Alters der bahnnahen Vegetation erhöht sich das Risiko der Beeinträchtigung des Bahnverkehrs durch umstürzende Bäume.

Die Beurteilung der Verkehrssicherheit von gleisnaher Vegetation ist daher einer der Schwerpunkte (Abb. 6). Diese Beurteilung erfolgt vornehmlich über Orthophotos. In der nachfolgenden Bearbeitung (Postprocessing) können die Bestände digitalisiert, polygonisiert und katastiert werden.

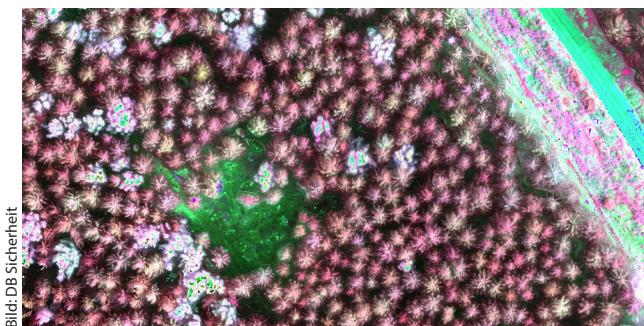
Einfache Bilder sind jedoch nicht ausreichend zur Beurteilung des Vitalzustandes von Vegetation (Abb. 7). Durch den Einsatz von Spektralkameras werden zusätzliche Informationen gewonnen, welche diese Bewertung ermöglichen. So ist der Befall von Bäumen mit Pilzkrankheiten oder Schädlingen direkt oder

indirekt im Bildvergleich zu RGB-Aufnahmen möglich. Die so gewonnen Informationen sind somit Grundlage für die Bestandspflege.

Präventiven Zwecken dient ebenfalls die Befliegung von Brücken- und Hochbauwerken (Abb. 8). Während jedoch Hochbauwerke wie Speichersilos, Schornsteine oder moderne Betonbrücken aufgrund ihrer zumeist freistehenden Bauweise gute Ergebnisse ermöglichen, sind etwa komplexe Stahlkonstruktionen,



**Abb. 6:**  
Fallradienausweis  
von Bäumen im  
Gleisbereich



**Abb. 7:**  
NIR-Aufnahmen  
der Vegetation  
am Gleis



**Abb. 8:**  
UAV-Befliegung  
eines Brücken-  
bauwerkes für prä-  
ventive Zwecke



Bild: DB Sicherheit

**Abb. 9:**  
Inspektion von  
Bahnhöfen

Fachwerk- und Tragseilbrücken nur eingeschränkt oder gar nicht für die Inspektion mit Drohnen geeignet. Auch Brückenlager, Knotenpunkte und unterhalb der Brückewannen gelegene Bauteile sind meist nicht befliegbar und ermöglichen damit keine konsistente Datenerhebung.

Im Rahmen eines Entwicklungsprojektes werden zyklische Hangvermessungen auf Basis von Dronenaufnahmen zur Erkennung von Gefahren erprobt. Hierbei werden gewonnene Bilddaten zu 3D-Datenmodellen verarbeitet, die signifikante Änderungen in der Hangstruktur ausweisen und so die Präventivmaßnahmen ermöglichen.

Bei der Befliegung von Bahnhöfen im Rahmen der Inspektion und Unterstützung von Instandhaltungsprozessen setzt die DB AG sowohl auf die Möglichkeiten des 3D-Modelings, der Einzelbild- und Orthophotografie sowie Livebildübertragung (Abb. 9). Die resultierenden Ergebnisse, Bild- und Datenauswertungsmöglichkeiten verkürzen die Prozesse und bieten hohe Einsparpotenziale. Innenbefliegungen von Bahnhofshallen werden aufgrund der teils Ausstattung (Abspannungen, Fahrleitungen, Lichtbänder etc.) nicht durchgeführt.

## 2.2.2 Reaktiver Einsatz

Reaktive Droneneinsätze erfolgen bei Beschädigungen von Gebäuden und Bauwerken z. B. nach Sturm, Hochwasser oder anderen Elementarereignissen. In Verbindung mit Ergebnissen von Präventivbefliegungen können in vergleichenden Verfahren Schadensumfänge exakt ausgewiesen werden. Auch schleichende Veränderungen an Bauwerken sind so auszuweisen und zu dokumentieren. Dies eröffnet der Instandhaltungsplanung zusätzliche Möglichkeiten (Abb. 10).

Der Droneneinsatz im Bau- und Instandhaltungsbereich gewinnt an Bedeutung im Einsatzalltag (Abb. 10). Die DB Sicherheit leistet hier Baufortschriftdokumentation und Baumassenkontrolle (Abb. 11). Über die 3D-Vermessung von Baufeldern zu bestimmten Leistungszeitpunkten wird die DB AG in die



Bild: DB Sicherheit

**Abb. 10:**  
Schadenserfassung  
an einem Lok-  
schuppen

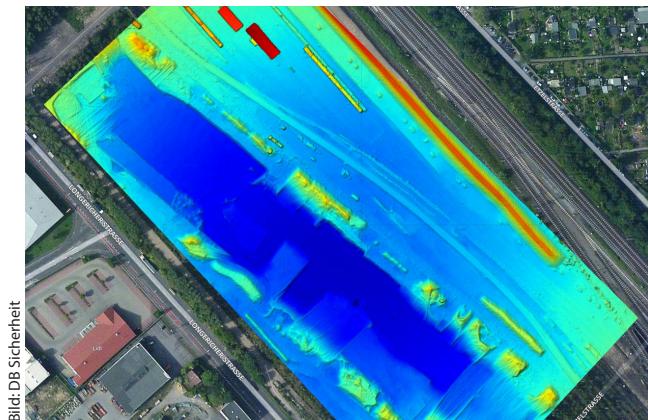


Bild: DB Sicherheit

**Abb. 11:**  
Digitales Höhen-  
modell der Bau-  
grube in Köln

Lage versetzt, vorabgeschätzte, tatsächlich erbrachte und abgerechnete Baumas-  
sen zu messen, zu prüfen und Differenzen genau auszuweisen.

Unterstützt durch Lasermessverfahren zur Erreichung der notwendigen Ge-  
nauigkeiten werden die photogrammetrischen Drohnenaufnahmen zunehmend  
im BIM (Building Information Modeling) eingesetzt. Auf diese Weise können  
zeit- und kostengünstig dreidimensionale Informationen gewonnen werden, die  
in den Bau- und Planungsprozessen Verwendung finden ([Abb. 12](#)).



**Abb. 12:**  
Erfassung der  
Fehmarnsund-  
brücke mittels  
Multicopter

### 3 Zukünftige Entwicklungen

#### 3.1 Einsatz von Langstrecken-UAV

Zur Befliegung langer Streckenabschnitte setzt die DB Sicherheit zunehmend auf sog. Flächenflüglern (Abb. 13). Hier bestehen die Herausforderungen insbesondere noch im Bereich der Steuerung und Datenübertragung auf lange Distanzen sowie in der Lösung genehmigungsrechtlicher Herausforderungen.



**Abb. 13:**  
Streckenflieger der  
DB Sicherheit

#### 3.2 Automatisiertes Fliegen

Im Zuge der Automatisierung von Melde- und Reaktionsketten arbeitet die DB Sicherheit an Lösungen im reaktiven Einsatz, die durch automatisierte Meldungen z. B. über Glasfaser-Sensorik (fiberoptic sense) oder andere Meldegeber auf Störfälle am Gleis automatisch reagieren und den Entscheidern in Leitstellen Daten in Echtzeit zur Verfügung stellen. Im Rahmen mehrerer Projekte konnte die stringente automatisierte Meldekette bereits erfolgreich getestet werden. Ziel ist die Installation von Drohnen an Fixpunkten (z. B. auf Bahnhofsdecken), die

nach Empfang von Melddaten automatisiert zum Ort der Störung fliegen, um Bilder an eine Leitstelle zu übertragen.

## 4 Zusammenfassung und Kontakt

Die DB Sicherheit als Sicherheitsdienstleister der DB AG setzt Multicopter (UAV, Drohnen) erfolgreich im Zuge ihrer Aufgaben innerhalb der DB AG und für externe Kunden ein und treibt die Entwicklung dieser jungen Technologie und der damit verbundenen Anwendungen aktiv voran.

Diese Entwicklung ist eng mit aktiven Lernprozessen verbunden (learning by doing), da für viele fachliche Fragestellungen keinerlei technische oder anderweitig verwertbare Grundlagen existieren. So beispielsweise zur Auswirkung der Streustrahlung von Oberleitungen auf die Steuerungselektronik im UAV oder zur Druck-/Sogwirkung vorbeifahrender Zügen auf verschiedene Dronentypen.

In direktem Zusammenhang damit steht die Anpassung der gesetzlichen Regelungen, die den Flugbetrieb von UAV im Bereich von Bahnanlagen verbieten und von der Zustimmung des Infrastrukturbetreibers abhängig machen.

### Kontakt

Mario Finkbeiner  
DB Sicherheit GmbH  
Kompetenzcenter Multicopter  
Alfred-Herrhausen-Allee 1, 65760 Eschborn  
[mario.finkbeiner@deutschebahn.com](mailto:mario.finkbeiner@deutschebahn.com)

Unbemannte Luftfahrzeuge (engl. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) haben in den letzten Jahren zur Erweiterung des Aufgabenspektrums und einer effizienteren Erfüllung von geodätischen Aufgaben beigetragen. Als Trägerplattform für (geodätische) Sensoren erweitern UAV den Raum, in dem Vermessungen durchgeführt werden können.

Eine Vielzahl an kommerziellen und forschungsnahen UAV-Systemen, mit LIDAR und optischen Sensoren zur Umgebungserfassung, ist heute verfügbar. UAV sind Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen, von Entwicklungen für geodätische Sonderaufgaben und werden bereits vielfach in der Praxis erfolgreich eingesetzt.



ISBN: 978-3-95786-146-7



9 7 8 3 9 5 7 8 6 1 4 6 7

Schriftenreihe des DVW  
Band 89 / 2018  
Printversion: 28,20 Euro  
PDF: kostenfrei  
[www.geodesie.info](http://www.geodesie.info)

