

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

UAV 2020 – The Sky is the Limit?

Beiträge zum 185. DVW-Seminar am
17. und 18. Februar 2020 in Hattingen



Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

UAV 2020 – The Sky is the Limit?

Beiträge zum 185. DVW-Seminar am
17. und 18. Februar 2020 in Hattingen

Redaktion:
Heinz-Jürgen Przybilla
Thomas P. Kersten

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



Schriftenreihe des DVW
Band 97
Wißner-Verlag

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

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 97

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.geodaesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97,
Augsburg, 2020, 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: 978-3-95786-240-2
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2020
www.geodaesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Heinz-Jürgen Przybilla

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: Systeme und Entwicklungen

Oliver Schmechtig Unmanned Aerial Vehicle – Aktueller Stand und technische Entwicklungen	9
--	---

Nikolaus Studnicka Philipp Amon Christoph Fürst Luftgestütztes Laserscanning aus niedriger Höhe mit UAVs	15
---	----

Alexander Tummes Sichere und effiziente Integration von Drohnen in den deutschen Luftraum	31
---	----

Lothar Schlösser Sascha Kuhnt Einsatz von UAV im amtlichen Vermessungswesen – ein Werkstattbericht aus dem Zukunftskonzept VKV 2025	39
---	----

Session 2: Prozesse und Einflussfaktoren

Heinz-Jürgen Przybilla UAV-Befliegung – Alles klar? Über den Einfluss der Aufnahme- konfiguration	61
---	----

Christian Eling Günter Münstermann Direkte Georeferenzierung von Bildverbänden: Zum Leistungsstand von UAV-Systemen mit integrierten RTK-Modulen	77
--	----

Norbert Haala SFM & DIM: Alles schon erfunden?	91
---	----

Session 3: Daten und Qualität

Manfred Bäumker

Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagenternetzes am Beispiel
des UAV-Testfelds Zeche Zollern _____ 103

Thomas P. Kersten | Frederic S. Schlömer | Heinz-Jürgen Przybilla

Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern – Die Ergebnisse
verschiedener UAV-Systeme und zweier Softwarepakete im Vergleich _____ 121

Thomas P. Kersten | Maren Lindstaedt

Zur Qualität dichter Punktwolken aus UAV-basierten Bildflügen _____ 141

Michael Cramer | Patrick Havel

UAV und Monitoring: Widerspruch oder erweiterte Option? _____ 163

Session 4: Praxiserfahrungen

Markus Gerke | Yahya Ghassoun | Ahmed Alamouri | Markus Bobbe |

Yogesh Khedar | Frank Plöger

Hochpräzise Objekterfassung mit UAV am Beispiel einer Gleisanlage _____ 179

Thomas Maier

UAV im kommunalen Einsatz _____ 197

Alexander Zurhorst | Jens Hudusch

Baubegleitende Dokumentation mittels UAV und bildbasierten
Punktwolken _____ 219

Vorwort

Unmanned Aerial Vehicles/Systems (UAV/UAS) haben die geodätische Praxis erreicht und werden vermehrt sowohl zu einem typischen Arbeitsgerät im „Vermessungsalltag“ als auch zum Ausbildungsinhalt an Hochschulen und Universitäten. Die Vielfalt der am Markt verfügbaren Trägerplattformen bietet heute für quasi jeden Einsatzbereich eine passende Hardware-Lösung, denn UAVs sind in der Regel als Komplettsysteme bei zahlreichen Herstellern erhältlich. Auch wenn sich zwischenzeitlich einige Systemanbieter als Marktführer herauskristallisiert haben, so bleibt der Markt nach wie vor innovativ, hier insbesondere durch Entwicklungen kleinerer Unternehmungen oder auch von Spin-offs aus dem universitären Sektor.

Digitalkameras sind nach wie vor die am häufigsten eingesetzten Sensoren auf dem „fliegenden Stativ“, auch wenn der Wunsch nach – im Sinne der Photogrammetrie – metrischen Kamerasystemen bisher weitestgehend unerfüllt geblieben ist. Die Nutzung von Softwarelösungen zur Erzeugung bildbasierter Punktwolken geht damit einher. Einige wenige Anbieter dominieren den Markt, auch wenn die Vielzahl der verfügbaren kommerziellen und freien Softwareprodukte deutlich größer ist. Die Bedeutung von Nahbereichs-Laserscannern, die auf UAV-Plattformen eingesetzt werden können, nimmt stetig zu, wobei (derzeit noch) die sehr hohen Investitionskosten potenzielle Anwender bisher eher zur Zurückhaltung bezüglich einer Investition in die Technologie motivieren. Darüber hinaus ist auch die Fusion der mit unterschiedlichen Sensortechnologien erfassten Punktwolken von gesteigertem Interesse.

Das 185. DVW-Seminar „UAV 2020 – The Sky is the Limit?“ im LWL-Industriemuseum in Hattingen hat zum Ziel, bereits aktive, aber auch zukünftige AnwenderInnen aus Praxis und Forschung über den „State-of-the-Art“ der Technologie zu informieren, um dieses Wissen gewinnbringend sowohl in geodätischen als auch in Anwendungen der Nachbardisziplinen (wie z. B. im Bauwesen, der Archäologie, der Forensik, u. v. m.) einzusetzen.

Die Nutzung von UAV, einschließlich der Bedienung der damit verbundenen Auswertesysteme, wirft eine Vielzahl von Fragen auf, die im Rahmen des Seminars beleuchtet werden sollen. Gibt es Kameras mit metrischen Eigenschaften? Wie lässt sich eine Kamera im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung kalibrieren? Welche Vorteile bietet die Nutzung von Real Time Kinematic (RTK-)Systemen für die Georeferenzierung? Hat RTK Einfluss auf den örtlichen Messaufwand? Wie können Auswerteprozesse optimiert werden? Wie lässt sich die Qualität der erfassten Daten steigern, hier insbesondere die der 3D-Punktwolken? Welche Projekte werden aktuell in Verwaltung und

Industrie UAV-gestützt bearbeitet? Lassen sich neue Anwendungsgebiete, z. B. im Bereich des Monitorings oder der baubegleitenden Dokumentation, erschließen?

Das Seminar ist auch in diesem Jahr wieder eine gemeinsame Veranstaltung verschiedener Trägerorganisationen. Unter dem Dach der GEODÄSIE-AKADEMIE erfolgt die fachliche und organisatorische Betreuung durch den DVW AK 3 „Messmethoden und Systeme“, das BILDUNGSWERK VDV, FG 2 „Messverfahren“ und dem DVW Nordrhein-Westfalen e. V. Weitere fachliche Unterstützung steuert die DGPF (Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation) bei, hier vertreten durch die zwei Arbeitskreise „Sensoren und Plattformen“ sowie „Optische 3D-Messtechnik“.

Ein weiterer, substanzieller Mitveranstalter des diesjährigen Seminars ist mit dem LWL-Industriemuseum des Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) gegeben, das durch die Bereitstellung der Räumlichkeiten auf dem Gelände der ehemaligen „Henrichshütte“ in Hattingen eine besondere, durch die Industriekultur des Ruhrgebietes geprägte Örtlichkeit verfügbar gemacht hat. Das LWL-Industriemuseum mit seinem Standort „Zeche Zollern“ in Dortmund-Boeinghausen unterstützt seit mehreren Jahren erfolgreich die geodätisch-photogrammetrische UAV-Szene durch die Bereitstellung des in seiner Konzeption einzigartigen UAV-Testfelds. Hierfür einen herzlichen Dank!

Wir hoffen, dass das diesjährige Seminar, lokal organisiert von der Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie, einen ähnlich großen Erfolg erreichen wird wie die Vorgänger-Veranstaltungen dieser Themenreihe. Wir wünschen darüber hinaus, dass die Veranstaltung den Vorstellungen der TeilnehmerInnen gerecht wird, dies sowohl aus fachlicher Perspektive als auch aus Sicht des „Social Networking“. Der vorliegende Tagungsband wird allen TeilnehmernInnen in gedruckter Form und allen UAV-Interessierten zusätzlich als Online-Version als wichtige Informationsquelle erhalten bleiben.

Heinz-Jürgen Przybilla, Hochschule Bochum, DGPF
Thomas Kersten, HafenCity Universität Hamburg, DVW, DGPF
Brigitte Gundlich, Hochschule Bochum, DVW
Ingo Neumann, Leibniz Universität Hannover, DVW
Norbert Haala, Universität Stuttgart, DGPF
Danilo Schneider, TU Dresden, DGPF
Klaus Fritzensmeier, Leica Geosystems GmbH Vertrieb, München,
BILDUNGSWERK VDV
Olaf Schmidt-Rutsch, LWL-Industriemuseum
Norbert Tempel, LWL-Industriemuseum

Session 1:

Systeme und Entwicklungen

Unmanned Aerial Vehicle – Aktueller Stand und technische Entwicklungen

Oliver Schmechtig

1 Einleitung

The Sky is the Limit; Alles ist möglich oder nach Oben sind keine Grenzen gesetzt? Die Grenzen nach oben ergeben sich aktuell aus den gesetzlichen Regularien die eine maximale Flughöhe definieren und technisch lassen sich – noch – nicht alle Wunschvorstellungen realisieren.

Betrachtet man die Medien zu Beginn der zwanziger Jahre, findet man die unterschiedlichsten Anwendungen von Drohnen. Als Beispiel seien genannt:

- Drohnen zur Kriegsführung und zur Tötung von Terrorristen
- Drohnen zur Erkundung des Treibeises von Ureinwohnern in Grönland zum Überleben
- Drohnen als Ersatzfeuerwerk in Schanghai (Abb. 1) (hier als Video: <https://youtu.be/Zh3-Mvrp1Lc>)



Abb. 1: Der laufende Mann – dargestellt von programmierten Drohnen in der Hafenbucht von Schanghai zum Jahreswechsel

1.1 Technische Einsatzbereiche

UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) haben mittlerweile auch in vielen technischen Bereichen Einzug gehalten und werden für unterschiedlichste Aufgaben bzw. in vielfältigen Arbeitsumgebungen eingesetzt.

Handwerkskammern schulen Ihre Mitglieder im Umgang mit Drohnen, um für entsprechende Aufgaben vorbereitet zu werden. Als fliegende Helfer bieten Drohnen neue Lösungen unter anderem

- für Kaminkehrer zur Inspektion von Kaminen,
- für Zimmerer zur Inspektion von Dächern oder
- für Förster zur Begutachtung von befallenen Bäumen.

Große Unternehmen wie Boeing, Porsche, Audi, Daimler, Toyota und viele andere rüsten sich für den Personentransport und entwickeln Drohnen als „Luft-Taxis“, um einen Shuttledienste oder einfache Transporte anbieten zu können.

1.2 Geodätische Einsatzbereiche

UAVs haben die geodätische Praxis schon vor über fünf Jahren erreicht, werden seitdem in immer mehr Ingenieurbüros eingesetzt und sind heute für viele Aufgabenstellungen gar nicht mehr wegzudenken.

Dabei werden die photogrammetrischen Möglichkeiten zur Lösung der vermessungstechnischen Aufgabenstellungen bzw. Anforderungen genutzt. Die Theorie der Photogrammetrie begrenzt dabei aber die praktischen Anforderungen der Ingenieurvermessung/Vermessung und darf keinesfalls vernachlässigt werden. Aus diesem Grund können nicht alle Aufgabenstellungen der Geodäsie zufriedenstellend gelöst werden.

Die unterschiedlichen Möglichkeiten haben unter anderem Auswirkungen hinsichtlich:

- der tatsächlich erreichbaren Genauigkeiten
- der Präzision der Ergebnisse
- der Effektivität der Problemlösungen
- der Wetterabhängigkeit

Aktuelle Entwicklungen tragen sicher dazu bei, die erreichbaren oder vorhandenen Einsatzlimitierungen aufzuweiten und zu verschieben, aber können diese nicht vollständig umgehen.

2 Rahmenbedingungen

Als wesentliche Rahmenbedingungen sind nach wie vor die rechtlichen/gesetzlichen Vorgaben zu nennen unter denen die UAV-Befliegungen durchgeführt werden dürfen.

Aktuelle Auskünfte dazu bietet z. B. die Internetseite www.drohnen.de/20336/drohnen-gesetze-eu/ bzw. der entsprechende Vortrag, inwieweit die aktuelle Umsetzung bereits verabschiedet wurde.

3 UAV in der Geodäsie, aktueller Stand

3.1 UAV-Trägersysteme

Wie es in der klassischen Geodäsie üblich ist, gibt es auch im Bereich der UAVs verschiedene Klassen mit unterschiedlichen Klassifizierungsparametern (Gewicht, Flugzeit, Reichweite, Flughöhe etc.). Eine grobe Einteilung der möglichen Klassen ist Armenakis und Patias (2019, S. 5 ff.) zu entnehmen.

Speziell für den Bereich der Geodäsie stellen die dort angeführten UAVs aber nicht mehr den aktuellen Stand dar, sondern müssten laufend aktualisiert werden. Zuletzt wurden auch auf der CES 2020 in Las Vegas relevante Neuentwicklungen vorgestellt, wodurch sich auch die UAV-Lösungen nachhaltig verändern werden.

4 UAV in der Geodäsie, technische Entwicklungen

4.1 UAV-Trägersysteme

Je nach verwendetem Trägersystem (VTOL, Multirotor, Starrflügler etc.) ergeben sich zum Teil wesentlich unterschiedliche Flugzeiten bzw. zu befliegende Flächen, Reichweiten, Start und Landekonstellationen und damit Einsatzmöglichkeiten. Beispielpflicht für ein UAV-System, das vertikal starten und landen kann, ist der Starr- bzw. Flächenflügler Wingtra WingtraOne in [Abb. 2](#) dargestellt.

4.2 Sensoren – Kamera

Ein wesentlicher Faktor für die erreichbaren Genauigkeiten sind sicherlich die verwendeten Kameras. Aktuelle Entwicklungen gehen auch dahin, hochwertige Industriekameras wie die Phase One iXM100 ([Abb. 3](#)) vom gleichnamigen Hersteller in den UAV-Workflow einzubinden.



← Abb. 2:
Wingtra (Vertical take-off
and landing)

↙ Abb. 3:
Kameraaufhängung für die Mittelformat-
kamera Phase One iXM 100



4.3 Sensoren – Laserscanner

Alternativ zu Kameras werden unter anderem auch Laserscanner an UAV-Systemen verbaut. Neben den bereits bekannten Lösungen von Riegl kommen mittlerweile auch mehr und mehr kostengünstigere Systeme auf den Markt. DJI hat z. B. auf der CES 2020 einen neuen, kostengünstigen LIDAR-Ansatz vorgestellt. Inwieweit dieser für geodätischen Aufgaben benutzt werden kann ist abzuklären.

4.4 UAV mit RTK-Lösungen

Geodätische UAVs sind vermehrt mit RTK-Systemen ausgestattet, um die Anzahl der Passpunkte zur Referenzierung zu minimieren oder darauf zu verzich-

ten. Allerdings ist dabei neben den Einsparungsmöglichkeiten im Arbeitsablauf auch die zu erreichende Genauigkeit bzw. Einpassung in die vorhandenen Bezugssysteme zu beachten.

4.5 Auswertung

Problematisch beim Einsatz von UAV-Befliegungen ist sicherlich die Auswertzeit bis die Ergebnisse vollständig zur Verfügung stehen. (Rechenzeit)

5 Zusammenfassung

5.1 Problemstellungen

Aktuell festgestellte Probleme mit der Verfügbarkeit von Navigationssystemen bzw. deren gezielte Störungen (Russland bzw. Geisterschiffe vor der chinesischen Küste) zeigen doch eine sehr große Abhängigkeit der UAV-Systeme.

5.2 Entwicklungen

Die Entwicklungen im Bereich der UAVs gehen sehr schnell weiter, sind aber immer noch nicht abgeschlossen und in vielen Bereichen sehr hochpreisig. Daher stellt sich oft die Frage, wie können diese Entwicklungen wirtschaftlich und überschaubar im Alltag eines Ingenieurbüros refinanziert werden, oder gibt es nicht ökonomischere Lösungsansätze.

Unabhängig davon ergibt sich für viele Ingenieurbüros die Notwendigkeit, die Ausstattung der Außendienstfahrzeuge anzupassen, um die UAV-Ausrüstung mit dem benötigten Zubehör sicher zu transportieren, verschiedene UAV-Systeme für unterschiedliche Aufgabenstellungen zur Verfügung zu haben, oder im Bedarfsfall Projekte im Rahmen von Kooperationen mit anderen besser ausgestatteten Ingenieurbüros zu bearbeiten.

Ferner sind umfangreiche Schulungen des Personals notwendig, um einerseits die rechtlichen Voraussetzungen zu erfüllen, aber auch um die Sicherheit im Umgang mit der UAV-Technologie zu gewährleisten.

5.3 Zusammenfassung

Idealerweise hätte man sofort nach der Landung auch die endgültigen, kontrollierten und georeferenzierten Koordinaten im vorgegebenen Lage- und Höhensystem, das fertige DGM und die fertigen digitalen Orthophotos – oder noch

besser – die Daten während des Fluges, um Soll-Ist-Vergleiche durchführen zu können.

The Sky is not the Limit: Es ist weder alles möglich, noch sind nach oben keine Grenzen gesetzt? Die Grenzen ergeben sich durch die Aufgaben und Anforderungen, die an die zu erstellenden Ergebnisse/Lösungen der Geodäsie und Photogrammetrie gestellt werden. Für geodätische Aufgabenstellungen sollten im Zweifelsfall zusätzliche, kontrollierende Messverfahren zum Einsatz kommen, um die geordneten Genauigkeiten sicherzustellen.

Literatur

Armenakis, C., Patias, P. (2019): Unmanned Vehicle Systems for Geomatics: Towards Robotic Mapping. Whittles Publishing, Dunbeath, 336 S.

Kontakt

Oliver Schmechtig
Ingenieurbüro Schmechtig
Eichenstraße 9, 84061 Ergoldsbach
office@schmechtig.com

Luftgestütztes Laserscanning aus niedriger Höhe mit UAVs

Nikolaus Studnicka | Philipp Amon | Christoph Fürst

1 Einleitung

Historisch gesehen wird die Vermessung der Erdoberfläche von Luftfahrzeugen bereits seit mehr als hundert Jahren durchgeführt und zwar mittels Luftbildvermessung. Ende des vorherigen Jahrhunderts hat sich ALS (Airborne Laser Scanning) besonders wegen der Durchdringung von Vegetation etabliert. So ist es möglich geworden ganze Länder zu vermessen und durch das Ausblenden von Vegetationsdaten sogenannte Oberflächenmodelle zu generieren. Seit dem Durchbruch der UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), also kleinen automatisch fliegenden Plattformen, kann die Laserscanning-Vermessungstechnik auch für kleine bis mittelgroße Projekte verwendet werden. Im Folgenden wird das kinematische Laserscanning auf einer UAV-Plattform „ULS“ (*Unmanned Laserscanning*) genannt.

Diese Arbeit soll die Grundlagen der kombinierten Aufnahme von Laser-scan- und Fotodaten mittels UAVs beschreiben und konkrete Projekte aufzeigen.

2 Grundlagen eines ULS-Systems

Das Herzstück eines ULS-Systems ist der Laserscanner selber. Wegen der „Durchdringung“ von Vegetation eignen sich Laserimpulse für die Entfernungsmessung. Das Impulslaufzeitverfahren der *RIEGL*-Laserscanner beruht auf der Digitalisierung jedes empfangenen Zielechos und der anschließenden Online-Wellenformanalyse. Diese Verarbeitung der Echos ermöglicht es höchste Messgenauigkeit und die Fähigkeit mehrere Ziele aufzulösen (Pfennigbauer et al. 2010). Basierend auf dieser Technik identifiziert jedes Echo mehrere Ziele, die mit zusätzlichen Attributen wie z. B. dem kalibrierten Zielreflexionsgrad (Reflektivität) oder der Abweichung der Echopulsform (Deviation) versehen sind.

Ein kinematisches Messsystem mit einem Laserscanner besteht grundsätzlich aus folgenden Komponenten:

- einem UAV als Flugplattform, welches das gesamte Messsystem mindestens 10 bis 30 Minuten für einen automatischen Flug tragen kann,

- einem Laserscanner, der für die gewählte Flughöhe über Grund eine ausreichende Messreichweite bietet und die Scandaten zeitgestempelt aufzeichnen kann,
- einer IMU/GNSS (Inertial Measuring Unit/Global Navigation Satellite System) Einheit, die den Flugpfad (Trajektorie) zeitgestempelt aufzeichnen kann,
- mindestens einer Kamera.

Die Vielfalt der oben genannten und am Markt erhältlichen Komponenten ist enorm. Durch geforderte Rahmenbedingungen wie Messgenauigkeit, Punktdichte, Flughöhe usw. schränkt sich die Wahl des zu integrierenden Gesamtsystems aber meist ein. Die Abb. 1 zeigt exemplarisch eine Kamera, eine IMU und einen Laserscanner als mechanisch stabil verbundenes Laserscanningsystem.

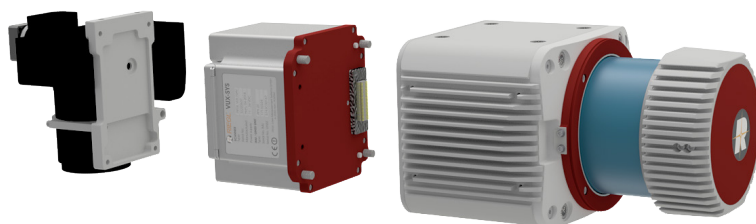


Abb. 1: Typisches kinematisches Laserscansystem RIEGL VUX-SYS

Das Laserscanning eignet sich speziell in folgenden Szenarien: unstrukturierte Oberflächen (wie ausgedehnte Schneeoberflächen), zweidimensionale Objekte (wie Hochspannungsleitungen) oder bei der Vermessung ohne Sonnenlicht (in der Nacht). Gerade Laserscanner, die nach dem Impulslaufzeitverfahren arbeiten, eignen sich für Messungen bzw. Durchdringung von Vegetation.

2.1 ULS-Beispiel: RiCOPTER

Um ein konkretes Beispiel zu zeigen, wird im Folgenden ein RIEGL VUX-1UAV Laserscanner (Abb. 1 rechts) auf einem RiCOPTER-UAV (Amon et al. 2014) beschrieben (Abb. 2). Das Gesamtsystem (siehe Tab. 1) besteht aus dem Laserscanner und einer mechanisch stabil damit gekoppelten hochpräzisen Applanix AP20 IMU/GNSS-Einheit zur Erfassung einer Trajektorie mit zeitgestempelten Positions- und Orientierungswerten. Die starre Kopplung zwischen einzelnen Komponenten ermöglicht eine langzeitstabile Kalibrierung des Messsystems. Für die parallele Bildaufnahme werden zum Beispiel zwei schräg nach unten gerichtete Sony Alpha 6000 Kameras montiert. Zur präzisen Berechnung der

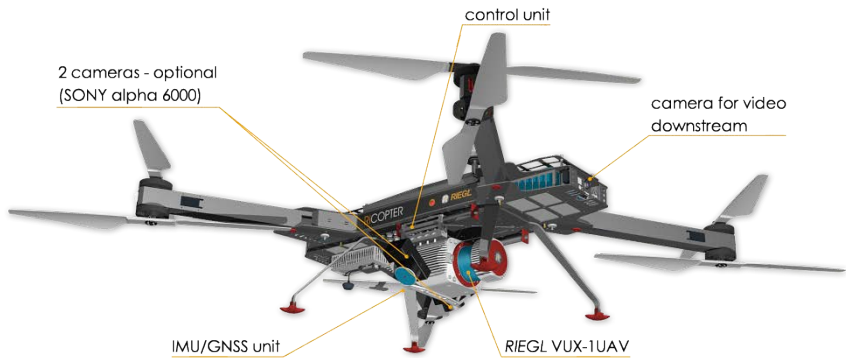


Abb. 2: RiCOPTER ULS-System

Tab. 1: Spezifikation des Gesamtsystems

UAV-Plattform	RiCOPTER
Laserscanner	RIEGL VUX-1UAV
Laser-Impulsrate	550 kHz
Gesichtsfeld des Laserscanners	330 Grad
Scan-Geschwindigkeit	200 Scanlinien pro Sekunde
Präzision	5 mm @ 150 m (siehe RIEGL 2019)
IMU/GNSS-Einheit	Applanix AP20
Fotokamera	2 Stück Sony Alpha 6000
Fotoauflösung	24,3 MPixel pro Fotokamera

Trajektorie wird außerdem noch eine GNSS-Basisstation am Boden aufgebaut, die einen RINEX-Datenstrom über den gesamten Zeitraum des Vermessungsfluges aufzeichnet.

2.2 ULS-Datenaufnahme und -auswertung

Nach der statischen und dynamischen Initialisierung des IMU/GNSS-Systems, führt der RiCOPTER (Abb. 2) eine vorprogrammierte Flugbahn für eine detaillierte Scandatenerfassung durch. Ein Flug wird üblicherweise in einer Flughöhe von etwa 50 bis 150 Metern über dem Boden bei einer konstanten Flugeschwindigkeit von ca. 8 Metern pro Sekunde durchgeführt. Um die Scanschatten zu minimieren, besteht ein Flug aus mehreren überlappenden Scanstreifen. Die Flugdauer beträgt inklusive des Initialisierungsprozesses bis zu 30 Minuten.



Abb. 3: Einfarbte Punktwolke einer ULS-Befliegung

Zur Verarbeitung der ULS-Daten werden vorerst die Rohdaten der IMU/GNSS-Einheit und die RINEX-Daten der GNSS-Basisstation in die Applanix POSpac-Software (Applanix 2019) gelesen und eine zentimetergenaue Trajektorie erzeugt.

Basierend auf den Zeitstempeln der Trajektorien- und Scandaten werden anschließend dreidimensionale Punktwolken mit einer relativen Genauigkeit von wenigen Zentimetern berechnet. Mit Hilfe der Zeitstempel werden auch die von den Kameras aufgenommenen und kalibrierten Bilder entlang der Trajektorien positioniert und orientiert. Sie können anschließend zur Einfärbung der resultierenden Punktwolke (Abb. 3) verwendet werden.

2.2.1 Parametrierung des Scanners vor der Datenaufnahme

Für die Parametrierung und Datenaufnahme des Laserscanners steht die proprietäre Software RiACQUIRE-Embedded zur Verfügung, welche direkt am Laserscanner läuft. Die Einstellungen setzen sich aus Parametern der geplanten Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, Taktrate, Scan-Winkelbereich und des Zeilenabstands bzw. der Ablenkspiegelgeschwindigkeit zusammen. Daraus wird der Punkt- bzw. Linienabstand am Boden und die daraus zu erwartende Punktdichte pro Quadratmeter berechnet. Zusätzlich können die Kameras während des Fluges zeit- oder distanzabhängig ausgelöst werden.

2.2.2 Trajektorienberechnung nach dem Flug

Als Referenz für die Trajektorienberechnung werden RINEX-Daten von der in der Nähe des Vermessungsfluges aufgestellten GNSS-Basisstation oder eines Referenznetzwerks aus dem Internet benötigt. Diese Korrekturdaten ermöglichen die Verbesserung der kinematischen GNSS-Messgenauigkeit vom Meter- in den Zentimeterbereich.

Anschließend werden mit der „POSPac“-Software des GNSS/IMU-Systemherstellers Applanix die Positionsdaten des am UAV befindlichen GNSS-Empfängers mit den Orientierungsdaten des IMU Sensors verknüpft. Dabei kommt ein Kalman Filter Algorithmus zum Tragen. Als Resultat steht eine hochpräzise Trajektorie für die weiteren Prozessierungsschritte zur Verfügung. Sie beinhaltet pro Sekunde 200 Positions- und Orientierungswerte mit hochgenauen Zeitstempelungen. Der Referenzpunkt der Trajektorie liegt wohldefiniert in der IMU-Einheit.

2.2.3 Prozessierung der Laserscandaten

Im nächsten Schritt werden die 2D-Rohdaten des Scanners mit der prozessierten Trajektorie unter Verwendung der automatisierten *RIEGL RiWORLD* Software (RIEGL 2019) zusammengeführt. Es entsteht eine 3D-Punktwolke, wobei jeder einzelne Messpunkt eine global referenzierte 3D-Koordinate erhält. Diese dreidimensionalen Punktdaten können in *RiPROCESS* (RIEGL 2019) visualisiert werden. Für den weiteren relativen bzw. absoluten Ausgleich der Scandaten wird das Tool *RiPRECISION UAV* (RIEGL 2019) verwendet.

2.2.4 ULS-Kalibrierung

Nach dem allerersten Vermessungsflug wird das Gesamtsystem kalibriert. Dies bedeutet, dass

- die Einbaulage des Laserscanners im Bezug zur IMU vermessen beziehungsweise aus der Konstruktionszeichnung entnommen wird. Dies nennt man die Bestimmung des sogenannten „Leverarms“.
- anschließend die Ausrichtung des Scanners im Bezug zum IMU-Koordinatensystem bestimmt wird. Dabei werden von verschiedenen Flugstreifen die Punktwolken herangezogen und die Einbaulagedaten solange verändert, bis die Abweichungen ein Minimum erreichen. Als Ergebnis erhält man die drei Einbauwinkel „Roll“, „Pitch“ und „Yaw“.
- die äußere Orientierung der verwendeten vorkalibrierten Kameras mithilfe von identen Punkten zwischen den Laserscan- und Fotodaten ermittelt wird.

2.2.4.1 Relative Genauigkeit

Für eine Maximierung der relativen Präzision werden die Scandaten für jeden Vermessungsflug mit RiPRECISION UAV (RIEGL 2019) weiter verbessert. Dieses *RIEGL*-Softwareplugin analysiert extrahierte, ebenen Flächenstücke der Punktwolken der einzelnen Flugstreifen und berechnet daraus eine neue, verbesserte Trajektorie unter Berücksichtigung der lokalen GNSS-Genauigkeiten. Danach wird die Punktwolke neu berechnet.

2.2.4.2 Absolute Genauigkeit

Die absolute Georeferenzierung kann unter Verwendung von extern eingemessenen Kontrollobjekten verbessert werden. Als unabhängiges Messsystem wird üblicherweise eine Totalstation oder ein tragbarer GNSS-Empfänger verwendet. Für die luftgestützte Datenaufnahme eignen sich eingemessene Punkte bzw. Flächen am Boden oder auf Hausdächern. Diese Kontrollobjekte dienen als Referenz für den Ausgleich mittels RiPRECISION UAV (RIEGL 2019). Die erreichbare absolute Genauigkeit in Abhängigkeit der Ungenauigkeit der Kontrollobjekte liegt bei wenigen Zentimetern.

2.3 „Stand der Technik“ – ULS-Laserscanner

Als der von der Firma *RIEGL* am weitesten entwickelter ULS-Laserscanner soll hier kurz der *RIEGL VUX-240* Laserscanner vorgestellt werden. Die wichtigsten Faktoren für eine Weiterentwicklung waren ein möglichst kompaktes Design, ein geringes Gewicht und eine hohe Messrate:

- Gewicht: 4 kg
- Sichtfeld: 75°
- Messrate: 1,5 MHz effektive Messimpulse pro Sekunde
- Scangeschwindigkeit: bis zu 400 Linien pro Sekunde
- Integration bis zu vier Kameras

Mit einer Scangeschwindigkeit von maximal 400 Linien pro Sekunde eignet sich dieser Laserscanner vor allem für schnell fliegende Trägerplattformen. Speziell Flächenflugzeuge profitieren von dieser hohen Scangeschwindigkeit. Die typische Anwendung für diesen Laserscanner ist die Befliegung von Stromleitungstrassen.

Das Messsystem kann mit mehreren Kameras ausgestattet werden. Die verwendeten Kameras, meist Sony A6000, Sony A7R, Sony A7R III oder deren Nachfolger samt 21 mm Zeiss Loxia Objektiv, werden dabei vom Scanner aus-

gelöst und zeitgestempelt. Die aufgenommenen Bilder werden direkt auf einer SD-Karte gespeichert, die Zeitstempelliste wird im Scanner abgelegt. In RiPROCESS (RIEGL 2019) werden anschließend die Bilder über den Aufnahmezeitpunkt mit den Zeitstempellisten kombiniert und über die externe Kamerakalibrierung georeferenziert.

3 Datenzusammenführung

3.1 Kinematische und statische Laserscandatenätze

Bei einer ULS-Vermessung sind also grundsätzlich mehrere Sensoren beteiligt, deren Daten mithilfe der gleichen Zeitbasis (Zeitstempel, die mit der GNSS-Zeit synchronisiert sind) zusammengefügt werden. Ein kinematischer Datensatz kann auch mit Punktwolken aus anderen Laserscanprojekten ergänzt werden. Dabei werden jeweils geometrische Zusammenhänge verwendet.



Abb. 4: Orthogonale Ansicht einer eingefärbten Punktwolke von oben. Links: ausschließlich terrestrische Laserscanning-Daten. Rechts: Kombination von TLS und ULS

Um eine ULS-Punktwolke zum Beispiel mit terrestrischen Scandaten zu registrieren (**Abb. 4**), werden Ebenen (so genannte Plane Patches) in der nativen Scannersoftware RiSCAN PRO (RIEGL 2019) extrahiert. Diese Ebenen berücksichtigen neben der Punktwolkengeometrie auch die Attribute der einzelnen Messpunkte, wie Reflektivität und Deviation der rückgestreuten Laserimpulse. Im anschließenden sogenannten „Multi Station Adjustment“ werden verschiedene Datensätze durch miteinander verknüpfte Flächenpaare auf Basis des „Iterative Closest Point“ (ICP) Algorithmus ausgeglichen. Der TLS-Datensatz wird vorab in sich ausgeglichen und die ULS-Scandaten danach starr zu den TLS-Daten verschoben.

Durch die wesentlich unterschiedliche Anzahl von Lasermessungen in unterschiedlichen Datensätzen, sollten diese vorher homogenisiert und so auf ähnliche Auflösung gebracht werden. Die resultierende Standardabweichung der

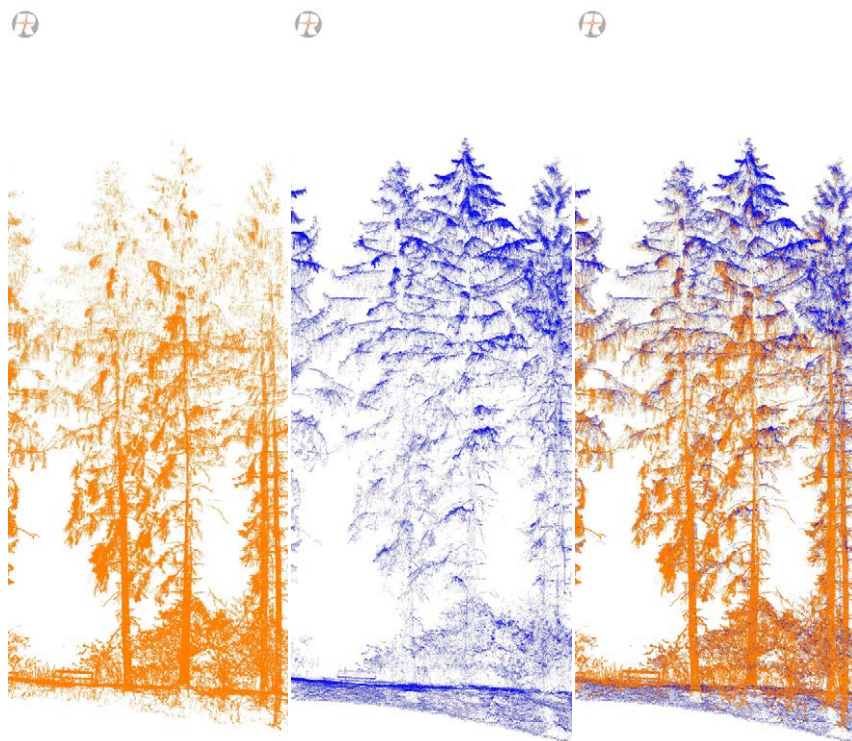


Abb. 5: Kombinierte Laserscanaufnahme im Wald, von links nach rechts: TLS, ULS und Kombination aus TLS- und ULS-Scandaten

Residuen der Normalabstände der ebenen Flächenpaare von unterschiedlichen Datensätzen beträgt je nach Szenario nach dem Blockausgleich wenige Zentimeter.

Bei der Zusammenführung von statischen TLS- und kinematischen ULS-Daten im Wald besteht die Schwierigkeit, dass in diesem Umfeld praktisch keine großen, zusammenhängenden und ebenen Flächenstücke existieren (Abb. 5). Hier stellt die Co-Registrierung von luftgestützten und terrestrischen Laserscans eine große Herausforderung dar (Haring et al. 2019). Beginnend am Waldrand oder an Waldlichtungen können die Datensätze manuell oder automatisch zueinander geschoben und gedreht werden. Die luftgestützten Scandaten sind üblicher Weise besser geo-referenziert, weil der GNSS-Empfang über den Baumkronen besser ist. Dafür sind die Details der Baumstämme und der bodennahen Strukturen wesentlich detaillierter in den TLS-Daten. Wenn die Datensätze hinreichend nahe beieinander liegen, werden sie anschließend mit einem modifizierten ICP-Algorithmus zueinander registriert.

3.2 Structure-from-Motion (SfM) Datensatz kombiniert mit TLS

Der Vollständigkeit halber wird hier auch die Kombination der Punktwolken-daten einer „Fotodrohne“ mit terrestrischen Laserscandaten beschrieben. Zum Beispiel im Stadtbereich sind die gesetzlichen Anforderungen an UAVs sehr hoch. Eine Fotodrohne hat durch ihr geringes Gesamtgewicht den Vorteil, dass man legal im Stadtgebiet über Dächer fliegen kann. Außerdem eignen sich kontrastreiche Flächen (Dächer, Fassaden, etc.) sehr gut für die SfM-Technik.

Um aber einen aus vielen einzelnen Fotos errechneten 3D-Datensatz auch vermessungstechnisch verwenden zu können, sind diverse extern gemessene Passpunkte notwendig. Diese können mithilfe einer Totalstation oder einem TLS-Laserscanner aufgenommen werden. Dadurch verbessern sich die Nivellierung und die Längentreue des SfM-Datensatzes erheblich.

Als Beispiel soll hier die Vermessung der Hofkirche in Innsbruck (Österreich) angeführt werden (Abb. 6). Im Januar und März 2019 wurden der terrestrische Scan mit einem RIEGL VZ-400i Laserscanner und die Befliegung mit einem twinFOLD Geo UAV (Twins 2019) durchgeführt. Die am UAV aufgesetzte Kamera Sony Alpha 6000 lieferte ca. 1200 Schrägbilder. Mit zehn gemeinsamen TLS/SfM-Passpunkten im MGI/Austria GK West Koordinatensystem wurde die Berechnung der SfM-Punktwolke wiederholt. Anschließend konnte sie mit zirka fünf Zentimeter Genauigkeit mit dem TLS-Datensatz kombiniert werden. Schlussendlich wurde für die Sonderausstellung „Maximilian I.“ im Jahr 2019 eine Animation der kombinierten 3D-Punktwolke erstellt.



Abb. 6: Kombination eines terrestrischen Laserscans mit einer SfM-Punktwolke aus einer UAV-Befliegung, Hofkirche Innsbruck

3.3 GeoSysManager

Um Datensätze verschiedener Koordinatensysteme an der richtigen geographischen Position zu kombinieren, verwendet *RIEGL* ein Tool namens „GeoSys-Manager“. Es ist ein Datenbanktool, das den Download und die Verwaltung verschiedener Koordinatensysteme sowie Transformationen zwischen den jeweiligen Daten ermöglicht. Mit der Datenbank ist es auch möglich, georeferenzierte Daten in verschiedene Koordinatensysteme weiter zu exportieren.

4 ULS-Anwendungsbeispiele

4.1 Korridorbefliegung – Stromleitungstrassen

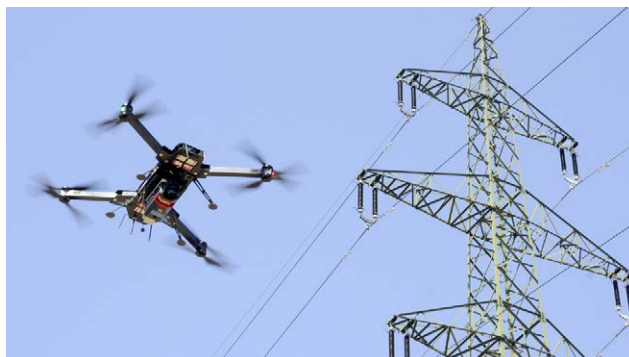


Abb. 7:
UAV-basierte
Vermessung von
Stromleitungs-
trassen: *RIEGL*
VUX-240 Laser-
scanningsystem
am RiCOPTER

Bisher wurden Korridorbefliegungen für den Trassen- und Leitungsbau (z. B. Eisenbahnlinien, Hochspannungsleitungstrassen, Pipelines oder Straßenzüge) bzw. für die Instandhaltung derselben von bemannten Vermessungsflugzeugen oder Helikoptern durchgeführt. Dabei handelt es sich meist um kilometerlange Strecken. UAVs eignen sich bereits schon bei kürzeren Korridoraufnahmen (Abb. 7). Durch die geringe Flughöhe und vergleichsweise langsame Geschwindigkeit erhöhen sich die resultierende Punktdichte und damit der Detaillierungsgrad der Punktwolke am Objekt. Aufgrund des großen Sichtfelds eines Laserscanners ist es möglich, die vergleichsweise dünne Hochspannungsleitung selbst, aber auch flächendeckend die Vegetation und Bodenpunkte darunter zu erfassen. Diese Messdaten können für verschiedene Auswertungen verwendet werden:

- Analyse des Seildurchhangs
- Dokumentation der Masten
- Ermittlung des lichten Raumes, also auch der Distanz des Hochspannungsseils zu Bäumen und Wäldern etc.

Tab. 2: Aufnahmeparameter für eine Leitungsbefliegung

Höhe über Grund	100 m
Fluggeschwindigkeit	8 Meter pro Sekunde
Laserscanner	RIEGL VUX-240
IMU/GNSS-System	Applanix APX-20 UAV
Punktdichte	1100 Messpunkte pro Quadratmeter bei einer effektiven Messfrequenz von 1,5 MHz

Die üblichen Aufnahmeparameter für eine Leitungsbefliegung sind in der Tab. 2 zusammengefasst. Ein RiCOPTER fliegt normalerweise zwar über dem Leitungskabel aber aus Sicherheitsgründen leicht seitlich versetzt. Mit zirka 30 km/h Fluggeschwindigkeit werden pro Flug ca. 1 bis 2 km Leitungslänge vermessen. Dort wo das „Beyond Line-Of-Sight“ Fliegen rechtlich gestattet ist, können UAVs bereits heute auch für mehrere Kilometer am Tag eingesetzt werden.

Neben der Trassenbefliegung können auch die angrenzenden Umspannwerke (Abb. 8) befliegen werden. Der Netzbetreiber bekommt üblicherweise eine georeferenzierte, hoch aufgelöste, eingefärbte Punktwolke und kann damit Pläne erstellen.

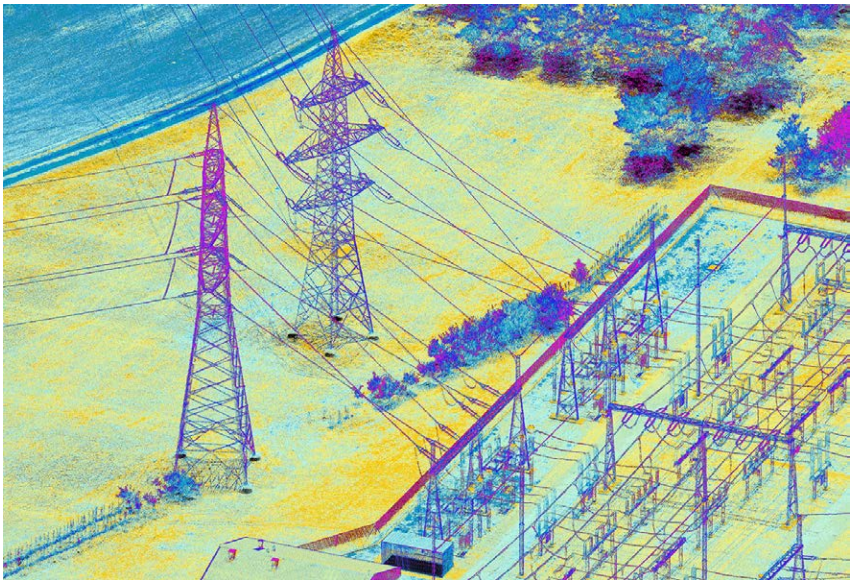


Abb. 8: Hochauflösende Punktwolke (farblich höhenkodierte Messdaten überlagert mit Reflektivitätswerten) von einem RIEGL VUX-240 Überflug in 80 Meter über Grund

4.2 Vegetation – Wald

Bei der Waldvermessung bieten UAV-basierte Laserscanner die Möglichkeit sogenannte Versuchsflächen mit hohem Detaillierungs- und Genauigkeitsgrad zu vermessen. Die Mehrzielfähigkeit dieser Messtechnik ermöglicht auch hier eine Durchdringung des Kronendachs (Abb. 9).

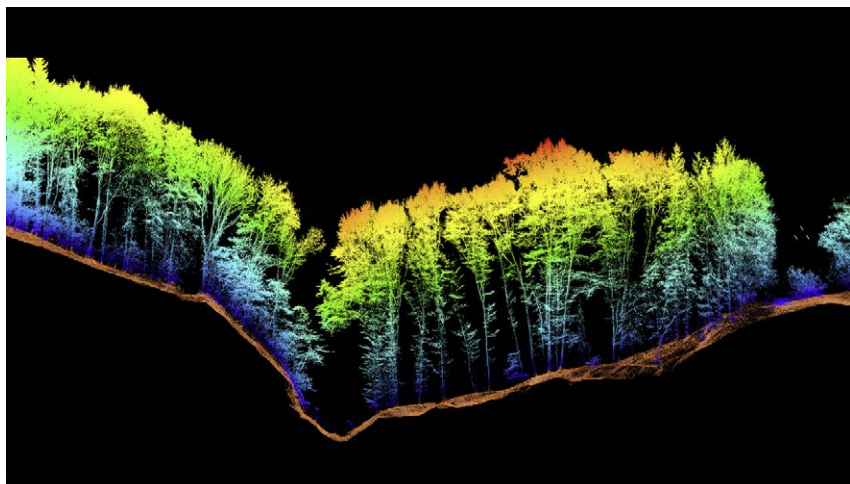


Abb. 9: Höhenprofil einer Punktwolke eines Waldes, aufgenommen mit einem ULS-System

So werden Bäume und ihre Kronen sowie die niedrigere Vegetation darunter erfasst. Aus den gewonnen Punktwolken können anschließend automatisiert Informationen wie der Kronendurchmesser einzelner Bäume oder Terrainmodelle abgeleitet werden. Aufgrund der Aufnahmeorientierung von oben enthalten UAV-basierte Laserscandaten trotz höherer Punktdichte oftmals unvollständige Informationen von vertikalen Strukturen, also den Baumstämmen. Gerade für die Ermittlung von Stammdaten, wie dem Brusthöhendurchmesser, bietet sich hier die Kombination mit terrestrischen Laserscandaten an.

4.3 Geländevermessung – Schneehöhenmessung

Ökonomisch betrachtet bietet die UAV-basierte hochalpine Geländevermessung ideale Einsatzbedingungen gerade für Gebiete im Ausmaß von mehreren Hektar.

Die Messung auf verschiedene Materialien ist maßgeblich von der Wellenlänge der verwendeten Laserquelle abhängig. Üblicherweise wird die sogenannte augensichere Wellenlänge von 1,5 Mikrometer für das Laserscanning verwen-

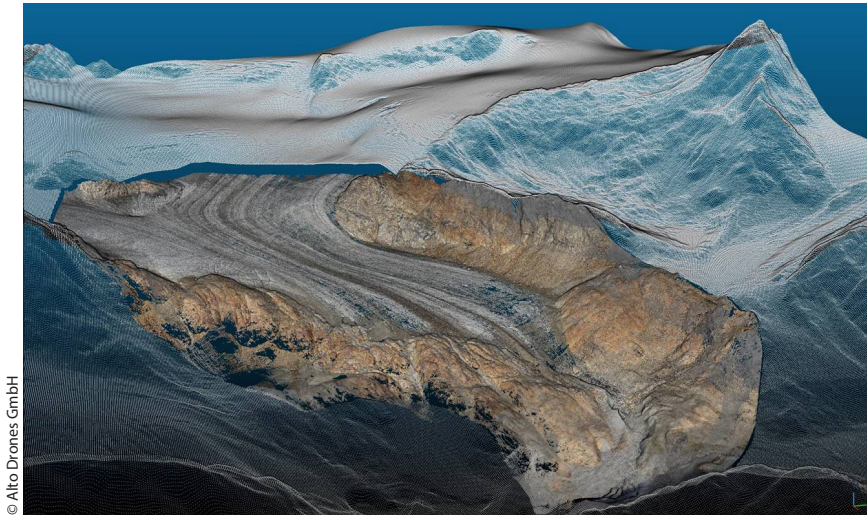


Abb. 10: Gletschermonitoring am Übeltalferner (Südtirol)

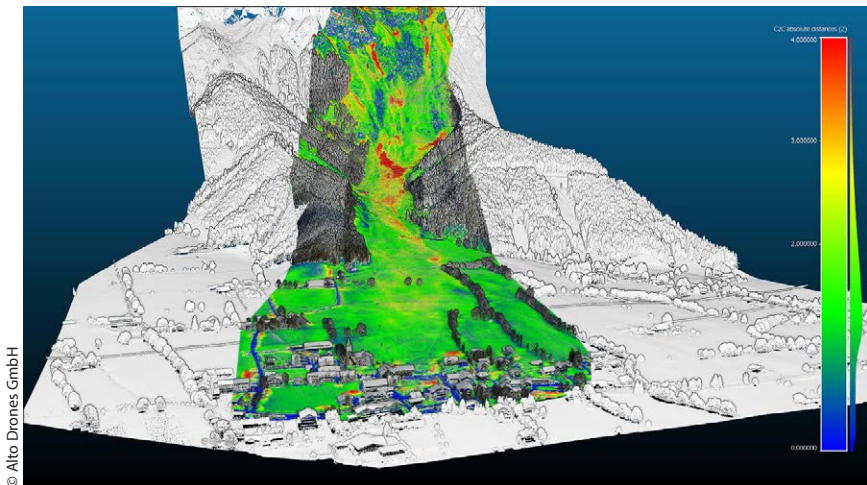


Abb. 11: Lawinendokumentation: Eiskar-Lawine, Ramsau (A), Schneehöhenberechnung als Differenz zu vorhandenem „Sommer“-Geländemodell

det. Hier wird der Umstand ausgenutzt, dass das Laserlicht in Wasser sehr stark gedämpft wird. Dadurch kann der unsichtbare Laserstrahl nicht durch das Auge auf die Netzhaut treffen. Wenn man aber auf Schneeoberflächen messen möchte, empfiehlt sich die unsichtbare nahe-infrarote Wellenlänge von 905 nm. Dies bewirkt bei Einhaltung der augensicheren Laserklasse I eine gewisse Reduktion der

maximalen Reichweite auf natürliche Ziele. Bei einem UAV-Flug über Schnee oder Gletscher (Abb. 10) wirkt sich die Messung mit dieser Wellenlänge jedoch vorteilhaft aus. Hier wird ein kompakter Halbleiterlaser eingesetzt, welcher das Gewicht des Laserscanners herabsetzen kann.

Am Beispiel der Schneehöhenmessung lässt sich ein Vorteil des Laserscanners erkennen. Im Gegensatz zur SfM-Technik ist es nicht notwendig, dass die zu vermessenden Oberfläche eine Struktur besitzt.

Die in Abb. 11 gezeigte Lawinendokumentation der Dienstleistungsfirma Alto Drones GmbH (Alto Drones 2019) zeigt die Auswertung der Eiskar-Lawine in Ramsau/Österreich, aufgenommen kurz nach der Rutschung am Morgen des 15. Januar 2019. Die Kombination der RIEGL miniVUX-1UAV Laserscandaten mit den bereits vorhandenen Daten aus früheren Messkampagnen war die Basis für die Berechnung der Schneehöhen.

Der Oktokopter *Soleon LasCO x8flat* (Abb. 12) wurde eingesetzt, mit dem man auch bei leichtem Schneefall, minus 15 °C und bis zu 40 km/h Wind Vermessungen durchführen kann. Mit insgesamt 15 kg Abfluggewicht stemmt er fast 3,5 kg über 25 Minuten durch die Luft. Erstmalig haben Geologen und Lawinenforscher ein Werkzeug zur Verfügung, um die Lawinendynamik innerhalb eines großen Gebietes zu erforschen und zu analysieren.



Abb. 12: Oktokopter „Soleon LasCO x8flat“ mit integriertem RIEGL miniVUX-1UAV Laser-scanner

5 Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat die weite Verbreitung von computergestützten und batteriebetriebenen unbemannten Luftfahrzeugen der Landvermessung aus der Luft neue Möglichkeiten gegeben. Dort wo früher nur Fotoapparate auf von Menschen gesteuerten Flugzeugen und Helikoptern die Erdoberfläche vermessen konnten, kann man heute ein unbemanntes Fluggerät mit diversen Sensoren ausstatten und auf die Reise bringen.

Dieser Aufsatz soll zeigen, dass sich auf vielen Gebieten die Kombination aus Laserscanning und Photogrammetrie auch bei unbemannten fliegenden Plattformen hervorragend für die professionelle Vermessung eignet. Dabei hat das Laserscanning große Vorteile:

- bei unstrukturierten Gebieten wie Schneeoberflächen
- bei dünnen Seilen einer Hochspannungsleitung
- bei Vegetationsflächen
- bei Aufnahmen in der Nacht, sofern es die gesetzliche Lage erlaubt

Voraussichtlich werden in der Zukunft noch viel mehr Sensoren unsere Umwelt unbemannt aus der Luft vermessen. Der gepulste Laserscanner wird wohl eine immer wichtigere Rolle spielen. Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass schon heute diese Messtechnik von vielen professionellen modernen Vermessungsfirmen eingesetzt wird.

Literatur

- Alto Drones (2019): Technical UAV Services. www.alto-drones.com, letzter Zugriff 12/2019.
- Amon, P., Riegl, U., Rieger, P., Pfennigbauer, M. (2014): Introducing a New Class of Survey-Grade Laser Scanning by use of Unmanned Aerial Systems (UAS). FIG Congress 2014, Kuala Lumpur, Juni 2014.
- Applanix (2019): Applanix IN-Fusion. www.applanix.com/pdf/Applanix_IN-Fusion.pdf, Vol. 89, 86–93.
- Haring, A., Ullrich, A., Studnicka, N., Groiss B. (2019): Co-registration of ALS and TLS forestry data, oral presentation. Silvilaser 2019, www.silvilaser2019.ipecf.br, Iguazu Falls.
- Pfennigbauer, M., Ullrich, A. (2010): Improving quality of laser scanning data acquisition through calibrated amplitude and pulse deviation measurement. Laser Radar Technology and Applications XV, International Society for Optics and Photonics, Vol. 7684, 76841F.
- RIEGL (2019): RIEGL Laser Measurement Systems. www.riegl.com, letzter Zugriff 12/2019.

Riegl, U., Rieger, P., Pfennigbauer, M., Amon, P. (2014): UAS based laser scanning for forest inventory and precision farming. Int. Workshop Remote Sensing and GIS for Monitoring of Habitat Quality, TU Wien, September 2014.

Twins (2019): twins GmbH. <https://manufaktur.twins.co.at>, letzter Zugriff 12/2019.

Kontakt

Nikolaus Studnicka | Philipp Amon | Christoph Fürst

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH

Riedenburgerstraße 48, 3580 Horn, Österreich

nstudnicka@riegl.com | pamon@riegl.com | cfuerst@riegl.com

Sichere und effiziente Integration von Drohnen in den deutschen Luftraum

Alexander Tummes

1 Herausforderung UAS als neue Luftraumteilnehmer

Drohnen sind aus dem deutschen Luftraum nicht mehr wegzudenken. In nur wenigen Jahren hat sich diese Technologie zu einem wahren Massenmarkt entwickelt. In Deutschland wie auch in den anderen europäischen Ländern existieren keine verlässlichen Zahlen darüber, wie viele unbemannte Fluggeräte (Unmanned Aircraft Systems, UAS) sich aktuell im Luftraum bewegen. In Deutschland geht die DFS Deutsche Flugsicherung (DFS) von etwa 500.000 Drohnen im Umlauf aus, Entwicklung steigend. Drohnen sind wertvolle Präzisionswerkzeuge für Anwendungen in der Industrie, im Bauwesen, der Land- und Forstwirtschaft und besonders für Polizei, Feuerwehr und Rettungsdienste. Wirklichen Nutzen



Quelle: DFS

Abb. 1: Drohnen müssen sicher und effizient in den deutschen Luftraum integriert werden.

bringen Drohnen aber erst, wenn sie jenseits der Sichtweite des Steuerers (Beyond visual line of sight, BVLOS) operieren können. Ebenso bergen Drohnen Risiken – besonders für die bemannte Luftfahrt. Denn für die Flugsicherung sind Drohnen unsichtbar – sie sind zu klein, um vom Radar lokalisiert werden zu können. Auch senden sie kein Positionssignal wie es Verkehrsflugzeuge per Transponder tun. Aus diesem Grund beschäftigt sich die DFS schon lange mit der Frage, wie Drohnen als neue Luftraumteilnehmer in den Luftraum integriert werden können – sicher und effizient (Abb. 1). Denn fliegen Drohnen trotz Verbots in der Nähe von Verkehrsflughäfen, kann dies bei Kollision im schlimmsten Fall zu einem Absturz führen. Schon allein wenn ein Pilot eine Drohne sieht, führt dies in der Regel zu einer kurzzeitigen Einstellung des Flugbetriebs, was wiederum enorme wirtschaftliche Schäden nach sich zieht. Daher ist es oberste Priorität der DFS, Drohnen für die Flugsicherung sichtbar zu machen sowie Möglichkeiten zu schaffen, den Steuerer zu identifizieren. Ebenso soll eine Grundlage für die kommerzielle Nutzung von Drohnen geschaffen werden, um das Potenzial dieser Technologie voll ausschöpfen zu können.

2 Marktchancen für UAS-basierte Anwendungen

Eine Vielzahl von Studien zeigt schon heute ein erhebliches Potenzial von drohnenbasierten Anwendungen auf. So besagt die jüngste Studie des Verbands für



Quelle: DLRG Horneburg

Abb. 2: UAS unterstützt die DLRG Horneburg bei der Vermisstensuche in schwer zugängigem Gebiet (Testszenario im Rahmen des Forschungsprojekts „Connected Drones“ von DFS und Deutsche Telekom).

die Unbemannte Luftfahrt (VUL) von BDL & BDLI, dass der deutsche Drohnenmarkt aktuell auf knapp 600 Millionen Euro geschätzt wird und bis 2030 auf fast 3 Milliarden Euro anwachsen soll. Dies entspricht einer jährlichen durchschnittlichen Wachstumsrate von 14 Prozent. Das Wachstum wird vor allem durch den kommerziellen Markt getrieben. Weltweit wird eine Vielzahl von Anwendungen bereits erprobt, teilweise auch schon umgesetzt. Besonders großes Potenzial existiert vor allem in den Marktsegmenten Agriculture, Public Services, Rescue, Security & Protection und Surveillance & Mapping (siehe auch [Abb. 2](#)).

3 Droniq – ein Gemeinschaftsunternehmen der DFS Deutsche Flugsicherung und der Deutschen Telekom

Mit dem Gemeinschaftsunternehmen Droniq GmbH entstand Anfang 2019 eine gemeinsame Firma zwischen der DFS Deutsche Flugsicherung und der Deutschen Telekom. Geschäftsziel ist die Erbringung, Vermarktung und der Vertrieb von Dienstleistungen für Drohnen und andere unbemannte Luftfahrzeuge in Europa. Droniq versteht sich als führende digitale Plattform für die unbemannte Luftfahrt, um sinnvolle professionelle Drohnenflüge sicher und im Einklang mit den geltenden Regularien zu ermöglichen. Dazu vereint Droniq das Luftfahrt-Knowhow der DFS mit der ITK-Kompetenz der Telekom ([Abb. 3](#)).



Abb. 3: Droniq ist ein Gemeinschaftsunternehmen der DFS und der Deutschen Telekom. Die DFS hält 51 % der Anteile, die Telekom 49 %.

Droniq bietet einen Einstieg in den kommerziellen Betrieb von unbemannten Fluggeräten auf breiter Ebene, insbesondere für Drohnenflüge außerhalb der Sichtweite im Einklang mit den Regularien. Dazu führt Droniq das deutschlandweit erste einsatzfähige UAS Traffic Managementsystem (UTM) in den Markt ein, um Drohnen sicher und effizient in den Luftraum zu integrieren. Eine wesentliche Grundlage dafür ist die Ortung von Drohnen über das Mobilfunknetz als innovative Technologie, welche die DFS und Telekom in den vergangenen Jahren zusammen in dem Projekt „Connected Drones“ entwickelt haben ([Abb. 4](#)).



Abb. 4:

Der technologische Ansatz von Droniq beruht auf der Idee, das Mobilfunknetz der Telekom zur Ortung von Drohnen zu nutzen.

Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, auch außerhalb der Sichtweite sicher zu fliegen. Das ist eine zentrale Voraussetzung, um Drohnen wirkungsvoll und wirtschaftlich einsetzen zu können.

4 Angebot entlang der Wertschöpfungskette für BVLOS-Flüge

Droniq bietet mit ihrer Plattform, ihren Lösungen und ihren Dienstleistungen Kunden ein Produktpaket je nach Bedarf – inklusive SORA (Specific Operations Risk Assessment), Beantragung der Aufstiegserlaubnis bei den Landesluftfahrtbehörden, Schulung und Prüfung (Drohnenführerschein), Vermittlung geeigneter Partner z. B. bei der Durchführung des Flugs und der Nachbereitung (Datenanalyse, ...). Das Angebot von Droniq ist neben der nationalen Regulierung ein wichtiger Treiber für einen wachsenden kommerziellen Drohnenmarkt.

Außerdem können zusätzliche Services in engem Zusammenhang mit der kompletten Luftlagedarstellung für den unteren Luftraum bis zum Boden auch für andere Nutzer bereitgestellt werden. Für Behörden werden digitale Schnittstellen zur Erteilung einer Aufstiegs Genehmigung sowie zur Einrichtung von temporären Flugverbotszonen (z. B. bei großen Veranstaltungen mit Menschenansammlungen) zur Verfügung gestellt.

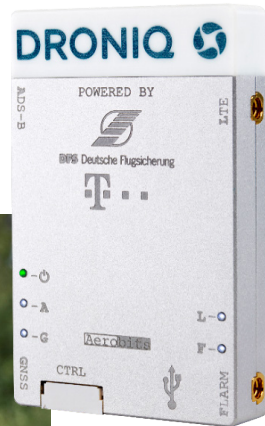
5 UTM – UAS Traffic Managementsystem

Mit dem UTM bietet Droniq eine Möglichkeit für den sicheren und effizienten Drohnenbetrieb außerhalb der Sichtweite. Dazu erhalten Sie von Droniq die nötige Infrastruktur, bestehend aus einem System für die Bodensensorik (Ground-

based situational awareness system, GBSAS, Abb. 6) und einem Hook-on-Device (HOD) zur Ortung des Fluggeräts während des Fluges. Das HOD wird an der Drohne befestigt (Abb. 5) und übermittelt per LTE die exakte Position an das UTM der DFS Deutsche Flugsicherung. Das HOD wurde in der neuen Generation um neue Kommunikationskanäle ergänzt (FLARM, ADS-B), womit die Positionssignale von Flugzeugen im Nahbereich empfangen werden können. Ebenso sendet es über FLARM seine Position kontinuierlich aus. Die Drohne wird so für bemannten Verkehr im Nahbereich die FLARM nutzen (z. B. Segelflieger, Helikopter), sichtbar ohne dass diese das UTM nutzen. Das UTM verarbeitet dann die Positionsdaten sämtlicher Drohnen in Echtzeit, prognostiziert deren Routen und erstellt ein aktuelles Luftlagebild. Dieses wird dem Steuerer zusammen mit dem relevanten bemannten Flugverkehr sowie seiner eigenen Position webbasiert dargestellt. Darüber hinaus bietet das UTM für alle Phasen des Fluges (Pre-Flight, In-Flight und Post-Flight Phase) maßgebliche Funktionen zum sicheren und integrierten Betrieb von Drohnen in den deutschen Luftraum.



Quelle: Droniq



Quelle: Droniq

↑ **Abb. 5:**
Das LTE-Modem (Hook-on-Device, HOD) der Droniq kann an jeder Drohne befestigt werden.

← **Abb. 6:**
Die Bodensensorik empfängt die Positionsdaten von kleinen Flugzeugen und Hubschraubern im Nahbereich.

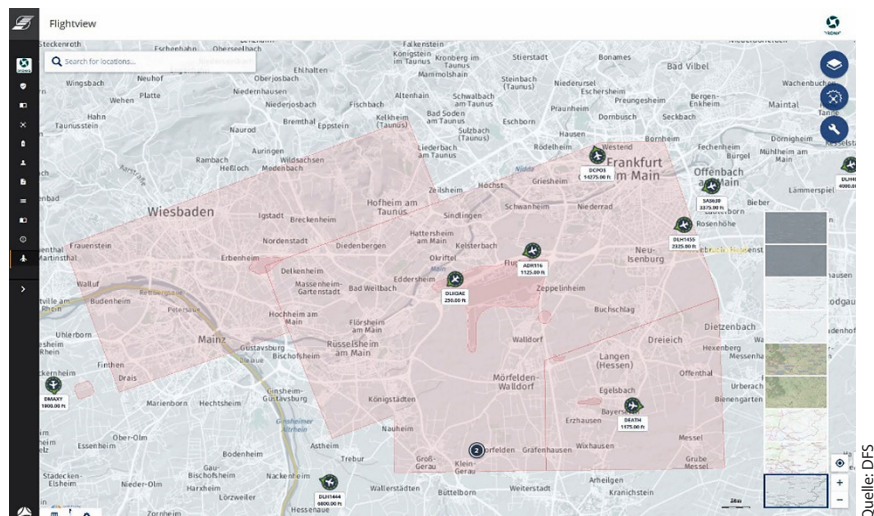


Abb. 7: Die Luftlagedarstellung des UTM zeigt Drohnen, die mit einem Hook-on-Device ausgerüstet sind, sowie den relevanten bemannten Flugverkehr.

In der Pre-Flight Phase kann sich der Operateur im UTM registrieren, seine Mission planen und diese gegenprüfen (Sind Flugverbotszonen/Luftraumbeschränkungen vorhanden? Gibt es andere angemeldete Flugbewegungen? Benötige ich eine Aufstieggenehmigung oder eine SORA?).

In der In-Flight Phase kann der Operateur seine Drohne in Echtzeit tracken und andere Luftfahrzeuge in einer kombinierten Luftlagedarstellung beobachten (Abb. 7), auch die, die sich außerhalb Sichtweite des Nutzers befinden (bemannte sowie im UTM registrierte unbemannte Flugobjekte). Außerdem erhält er nach Bedarf Payload-Daten (Fotos/Videos etc.) in Echtzeit.

Die UTM-Systemkomponenten der Post-Flight Phase helfen bei der Auswertung und Nachbereitung des Flugs (z. B. Pflege des Logbuchs, Incident Management, Batteriemangement).

6 Potenzielle Kundengruppen und Märkte

Die Zielkunden von Droniq teilen sich vor allem in vier Kundensegmente, die das Droniq Serviceangebot aufgrund von mehreren unterschiedlichen Anwendungsfällen in Anspruch nehmen können:

- Gewerbliche Steuerer, die überwiegend außerhalb der Sichtweite fliegen müssen (z. B. bei Trasseninspektion, Pipeline-Befliegungen, etc., Abb. 8),
- BOS-Kräfte bzw. Einsatzleiter und/oder Leitstellen, z. B. bei Rettungseinsätzen,



Quelle: DFS

Abb. 8: Bei einem Test von DFS und Telekom mit Thyssengas zur Inspektion einer Gas-pipeline von Thyssengas wurde eine Drohne eingesetzt.

- Behörden, die mit Hilfe des UTM-Systems in digitaler Form Aufstiegsge-nehmigungen erteilen, aber auch selbst Flugverbotszonen definieren können (z. B. am Oktoberfest, bei einem großen Wochenmarkt),
- Nutzer aus dem Umfeld der allgemeinen Luftfahrt, für die eine Luftlagedar-stellung bis zum Boden Transparenz und Sicherheit schafft.

7 Was macht Droniq so einzigartig?

Im Kern bietet Droniq alle Services rund um den Drohnenflug – von der Kon-kretisierung der Geschäftsidee bis hin zur Überführung des Flugvorhabens in einen Regelbetrieb. Mit Droniq kann der Kunde den Betrieb von Drohnen sicher und nach den geltenden Regularien durchführen und so Potenziale neuer Droh-entechnologien voll umfänglich nutzen. Darüber hinaus entsteht durch die sichere und effiziente Integration von UAS in das Luftverkehrssystem ein volks-wirtschaftlicher Nutzen durch den Schutz der zivilen Luftfahrt vor gefährlichen Annäherungen und Kollisionen zwischen Drohnen und bemannter Fliegerei.

Kontakt

Alexander Tummes
Droniq GmbH
Ginnheimer Stadtweg 88, 60431 Frankfurt a. M.
alexander.tummes@droniq.de

Einsatz von UAV im amtlichen Vermessungswesen – ein Werkstattbericht aus dem Zukunftskonzept VKV 2025

Lothar Schlösser | Sascha Kuhnt

1 Einführung

Zivile unbemannte Luftfahrtsysteme (UAS – Unmanned Aircraft System) werden in vielen professionellen Bereichen erfolgreich eingesetzt. Sie sind fester Bestandteil der angelaufenen vierten industriellen Revolution und der Digitalisierung 4.0 in der Wirtschaft und Verwaltung. In der Fachliteratur wird aufgrund des Innovationspotenzials über diese Technologie auch als sogenannter „Game Changer“ für Produktion, Logistik, Mobilität, Sicherheit und Verwaltung gesprochen.

Im Vermessungswesen werden vermehrt UAS der ersten Generation eingesetzt. Gekennzeichnet ist diese Generation von der berührungslosen Vermessung relativ kleinräumiger Teile der Erdoberfläche. Zum Einsatz kommen Träger- und Kamera- oder zunehmend Lasersysteme unterschiedlicher Größe, Bauart und Qualität (Dieckert und Eich 2018).

Das amtliche Vermessungswesen in Deutschland steht zurzeit am Beginn dieses Technologieeinsatzes. Dabei ist nach derzeitigem Stand das Einsatzspektrum in kommunalisierten Vermessungs- und Katasterverwaltungen vielfältiger als in nicht kommunalisierten Vermessungsverwaltungen.

2 Ausgangssituation

Die Vermessungs- und Katasterverwaltung (VKV) in Niedersachsen hat sich in ihrem Zukunftskonzept VKV 2025 zum Ziel gesetzt, den Einsatz von UAS im amtlichen Vermessungswesen zu untersuchen. Ausgehend vom gesetzlichen Auftrag und dem Anspruch sich als zentraler Anbieter von Geobasisdaten und Geodatendienstleistungen innerhalb der Landesverwaltung zu positionieren, wurde dazu eine Projektgruppe ins Leben gerufen.

2.1 Der Projektauftrag

Die Projektgruppe soll untersuchen, inwieweit die Erhebung von Geobasisdaten mit UAS in der VKV technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist. Der Projektauftrag beinhaltet folgende Teilaspekte:

- a) Zusammenstellung der relevanten rechtlichen Regelungen für den Einsatz von UAS
- b) Analyse der technischen Anforderung für den Einsatz in der VKV
- c) Beschaffung (oder ggf. Mietung) von UAS für die praktische Erprobung von Datenerhebungen
- d) Praktische Erprobung von Vermessungsverfahren
- e) Untersuchung von notwendiger Software
- f) Produkte eines Drohnenfluges
- g) Schnittstellen zu den aktuellen Fachsoftwareprodukten der VKV
- h) Erarbeitung von Handlungsempfehlungen
- i) Notwendige Fortschreibung der Verwaltungsvorschriften

2.2 Einsatzmöglichkeiten

Ziel eines möglichen Einsatzes von UAS muss es sein, bisherige Produkte und Dienstleistungen der VKV wirtschaftlicher und/oder qualitativ besser anzubieten sowie Synergieeffekte dabei zu erzeugen. Darüber hinaus gilt es, neue Produkte und Dienstleistungen für Abnehmer innerhalb und außerhalb der VKV zu entwickeln.

Der Umfang der potenziellen Einsatzmöglichkeiten in der VKV erforderte zunächst eine Fokussierung auf die Anwendungen digitales Geländemodell, Gebäudevermessung, langgestreckte Anlagen und amtliche Planunterlagen.

3 Rechtliche Regelungen für den Einsatz von UAS

UAS unterliegen ebenso dem Luftrecht wie die bemannte Luftfahrt. Verstöße gegen das Luftrecht beim Einsatz von UAS können ordnungs-, straf- und zivilrechtliche Konsequenzen nach sich ziehen. Eng verknüpft damit sind Fragen der Haftung und Versicherung beim Betreiben eines UAS (Giemulla 2019). Erfolgt eine Datenerhebung mittels z.B. photogrammetrischer Sensorik von einem UAV (Unmanned Aerial Vehicle) aus, können die Wahrung von Persönlichkeitsrechten, Urheberrechten und allgemeiner Datenschutz sowie IT-Sicherheit eine wichtige Rolle spielen. Darüber hinaus sind beim Einsatz von UAS in der VKV Auswirkungen auf Arbeitsschutz- und Verwaltungsvorschriften zu beachten.

3.1 Sonderregelungen für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS)

Nach der seit April 2017 geltenden „Drohnenverordnung“ (BMVI 2017) unterliegen BOS keiner Erlaubnispflicht gem. § 21a Abs. 1 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). Es sind keine Betriebserlaubnis über 5 kg Startmasse, keine Einhaltung der Abstandsregelung von 1,5 km zu Flugplätzen (aber Abstimmung mit Flugleitung und ggf. Flugaufsicht in kontrollierten Lufträumen) und keine Nachtflugerlaubnis erforderlich. Ein Kenntnissnachweis gem. § 21a Abs. 4 LuftVO ist nicht notwendig. Die Verbote gem. § 21b Abs. 1 LuftVO gelten nicht. Der Flugeinsatz durch BOS muss in Erfüllung ihrer Aufgaben stattfinden. Gewerbliche Piloten, die unter Aufsicht und im Auftrag einer BOS einen Flugauftrag ausführen, profitieren ebenfalls uneingeschränkt von der Sonderregelung. Diese Sonderregelung gilt zurzeit auch für die VKV in Niedersachsen.

3.2 Neue EU-Luftfahrt-Grundverordnung

Die nationale Gesetzgebung für UAV wird aktuell sukzessiv durch EU-Recht abgelöst. Ermöglicht wird dies durch die neue europäische Luftfahrt-Grundverordnung 2018/1139, in Kraft getreten am 11.9.2018, die den Rechtsrahmen für das gesamte UAS-Spektrum setzt (EUR-Lex 2018). Weitere konkrete Festlegungen dazu hat die EU-Kommission in zwei Verordnungen getroffen, die in [Abb. 1](#) dargestellt sind.



Abb. 1: Europäischer Rechtsrahmen für UAS

Gemäß Art. 2, Abs. 3, Punkt a der EU-Luftfahrt-Grundverordnung gelten die darin aufgeführten Sonderregelungen nicht mehr wie bisher für alle BOS. Das bedeutet, dass die VKV, aber auch andere Bereiche der Landesverwaltung ohne Sicherheitsaufgaben, nicht wie bisher unter die gültigen Ausnahmeregelungen

des nationalen Rechtes fallen. Eine Qualifikation des Personals und die Genehmigung jedes UAS-Einsatzes nach den dann gültigen EU-Regeln werden notwendig. Tendenziell könnte die Erlaubnispflicht bereits zum 1.7.2020 eintreten, da es sich bei den bisherigen Sonderregelungen für BOS nicht um Genehmigungen nach nationalem Recht handelt. Somit gelten auch die daran geknüpften Übergangsfristen des EU-Rechtes nicht. Derzeit erarbeitet eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe Vorschläge zur Ausgestaltung des vorgegebenen EU-Rechtsrahmens.

3.3 Weitere Rechtsbereiche und Regelungen

3.3.1 Haftung und Versicherung

In § 4 Abs. 2 des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG) heißt es: „Der Halter eines Luftfahrzeugs ist verpflichtet, zur Deckung seiner Haftung auf Schadensersatz nach diesem Unterabschnitt eine Haftpflichtversicherung in einer durch Rechtsverordnung zu bestimmenden Höhe zu unterhalten. Satz 1 gilt nicht, wenn der Bund oder ein Land Halter des Luftfahrzeugs ist.“ Generell gelten die allgemeinen Haftungs- und Versicherungsgrundsätze des Landes Niedersachsen.

3.3.2 Arbeitsschutz

Der Arbeitsschutz beim Einsatz von UAS ist ein relativ neues Thema, nicht nur im Vermessungswesen. Die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) hat dazu eine Informationsschrift mit dem Titel „Einsatz von Multikoptern (Drohnen) – Grundlagen und Tipps für die sichere Verwendung“ mit Stand 19.9.2019 herausgegeben. Im Jahr 2020 wird die DGUV zur Vermessung im Allgemeinen und zum Einsatz von UAS im Speziellen eine neue Informationsschrift auflegen.

3.3.3 IT-Sicherheit

Befindet sich ein UAS im Einsatz, gibt es nicht nur zahlreiche Kommunikationskanäle, sondern auch diverse Angriffspunkte, die abgesichert werden müssen. Bekannte Risiken sind das Ausspionieren von Flugdaten, Störung der Verbindung zwischen UAV und Steuereinheit, Deaktivierung der Bordelektronik, Manipulation von Daten durch Dritte u. v. a. m.

3.3.4 Persönlichkeitsrechte, Datenschutz und Urheberrechte

Aus den Artikeln 1, 2, 10 und 13 des Grundgesetzes leiten sich die allgemeinen Persönlichkeitsrechte ab. Dieses Recht auf Privatheit wird in Form des

Datenschutzrecht auf Daten und Informationen ausgedehnt. Kern des Datenschutzes im Einsatzbereich von Datenerhebung mittels UAS ist die EU-Datenschutzgrundverordnung (DSGVO). Das an das EU-Recht angepasste Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) und die Landesdatenschutzgesetze konkretisieren dieses Recht auf nationaler Ebene. Neben der „normalen“ Anwendung der DSGVO ist zu berücksichtigen, dass beim Einsatz von UAS auf vielfältige Weise Daten erhoben und im Nachgang verarbeitet werden, die personenbezogene Daten im Sinne der DSGVO darstellen. Da der Begriff der personenbezogenen Daten (Adressdaten, Kfz-Kennzeichen, Sozialversicherungsnummern, Bilddaten etc.) sehr weit gefasst ist, sind die Betroffenen vorab rechtzeitig in geeigneter Weise über die Datenerhebung und -verarbeitung zu informieren (Dieckert und Eich 2018).

Urheberrechte des Gestalters treten erst in Kraft, wenn Ablichtungen hinter Zäunen und Hecken aufgenommen werden. Gemäß § 59 des Urheberrechtsgesetz ist jeder befugt, Werke an öffentlichen Wegen, Straßen und Plätzen zu vervielfältigen, verbreiten und öffentlich wiederzugeben. Es können daher Perspektiven, die von der Straßenansicht abweichen oder Balkone/Dächer aus der Luft abbilden, das Urheberrecht verletzen.

Gemäß dem Kunsturheberrechtsgesetz dürfen Bilder nur mit Einwilligung des Abgebildeten verbreitet werden. Das gilt für Abbildungen, bei dem der Fokus auf dem Abgebildeten liegt. Ist die Person nur ein „Beiwerk“ der Landschaft oder unter einer Menschenmenge, findet das Gesetz keine Anwendung (Dieckert und Eich 2018).

4 Analyse und Beschaffungen für den Einsatz in der VKV

Der Beschaffung und der praktischen Erprobung ist eine umfassende Marktanalyse voraus gegangen. Die Produktvorgaben bestimmen den Workflow. Aus dem Workflow lassen sich die nötigen Hard- und Softwarekomponenten und das erforderliche Wissen ableiten. Die Genauigkeits- und Wirtschaftlichkeitsanforderungen ergeben sich aus den Vorschriften, Erfassungs- und Auswertemethoden.

4.1 Workflow

Der Einsatz eines UAS zur Gewinnung von Geodaten und daraus abgeleiteter Produkte wird von fünf Prozessschritten bestimmt. Der in [Abb. 2](#) gezeigte Ablauf bleibt grundsätzlich auch bei geänderten rechtlichen Rahmenbedingungen und unterschiedlichen Produkten gleich. Die Qualität der Produkte oder

Dienstleistungen ist nur dann gegeben, wenn das Zusammenspiel der technischen Komponenten unbemanntes Flugsystem (UAV), Sensorik (Kamerasystem, Laserscanner), Auswertung und Produkterzeugung im komplexen Workflow einwandfrei beherrscht wird.



Abb. 2: Workflow

Geleitet vom Workflow ergeben sich für die Analyse und mögliche Beschaffungen die nachfolgenden Komponenten.

Hardware:

- UAV (Multikopter, Starrflügler, Hybridsystem, Steuereinheit, GNSS, RTK)
- Sensoren (Kamerasystem, Laserscanner)
- Rechner (Auswertung und Produktentwicklung)

Software:

- Flugplanungssoftware
- Auswertesoftware
- Produktentwicklungssoftware
- Datenformate/Schnittstellen

Wissen:

- Schulung (Kenntnisnachweis, Geräteeinweisung, Softwareschulung)
- Wissensaufbau (Handling, Erfahrungswerte, Arbeitssicherheit, Öffentlichkeitsarbeit, rechtliche Entwicklung etc.)
- Produkte (Marktanalyse gem. VKV-Zukunftskonzept, Produktentwicklung, Business Case)

4.2 Genauigkeitsbetrachtungen

Der Aufnahme- und Auswerteprozess eines UAV-Bildfluges ist komplex, obwohl dieser aktuell ausgenommen von wenigen Arbeitsschritten vollautomatisiert erfolgen kann. Die absolute Genauigkeit eines Punktes der 3D-Punktwolke hängt

dabei u. a. vom Flugsystem, von der Anzahl der Bilder und deren Überlappung, der Genauigkeit der inneren und äußeren Orientierung (Verwendung von Passpunkten und deren Anordnung), den Flugparametern und Kameraeinstellungen sowie der Bildauswertung ab (Luhmann 2018).

Aktuelle Untersuchungen mit handelsüblichen UAS gehen derzeit je nach Konfiguration von einer erzielbaren Genauigkeit von 0,5 bis 2 cm Bodenauflösung, auch als „Ground Sample Distance (GSD)“ bezeichnet, aus. Bereits im Low-Cost-Segment ist diese Bodenauflösung erreichbar. Die Genauigkeitsvorgaben in den Verwaltungsvorschriften zur Erfassung von Gebäuden im Liegenschaftskataster des Landes Niedersachsen würden damit im Regelfall erfüllt werden. Gleiches gilt für die Erfassung von neuen Grenzverläufen bei umfangreichen Liegenschaftsvermessungen wie z. B. Straßenschlussvermessungen. Auch die derzeit geforderte Qualität im Bereich der 3D-Geobasisdaten, beispielhaft sei hier die bildbasierte Erfassung topografischer Elemente oder die Aktualisierung des DGM genannt, könnte damit erfüllt werden. Dies gilt ebenfalls für die Erstellung von Planunterlagen.

4.3 Anforderungen an das UAV

Allein die Genauigkeit gibt noch keinen Aufschluss darüber, ob das System für den Einsatz in der VKV geeignet ist. Anforderungen wie Bauart, Flugzeit, Gewicht, eine integrierte RTK Lösung, Wetterfestigkeit, Kamerasystem sowie der Preis sind essenziell, um einen Einsatz der Flugsysteme für die VKV wirtschaftlich zu gestalten. Nicht außer Acht zu lassen ist die Arbeitssicherheit.

4.3.1 Gewicht

Je schwerer ein UAV ist, desto strenger sind die zu beachtenden Einsatzregeln. Auch nach neuem EU-Recht spielt das Gewicht für die Risikobewertung eine entscheidende Rolle. Schwere UAV besitzen stabilere Flugeigenschaften und haben die Möglichkeit der Aufnahme hochwertiger und/oder unterschiedlicher Sensoren.

4.3.2 Flugzeit

Durch längere Flugzeiten lassen sich (bei gleicher Kamera) größere Gebiete auf einmal befiegen. Die Flugzeit ist hauptsächlich von der Art des UAV (z. B. Flächenflügler) und dem Gewicht sowie der Akkuleistung und diese wiederum von den Witterungsbedingungen (negativ sind vor allem Kälte und Gegenwind) abhängig.

4.3.3 Georeferenzierung

Im Gegensatz zu vielen ingenieurtechnischen Anwendungen ist die Georeferenzierung der erfassten Daten in der VKV essenziell. Die Georeferenzierung kann durch bekannte Passpunkte oder eine zeitnahe terrestrische Bestimmung dieser Punkte mittels GNSS-Messung erfolgen. Eine deutliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit ist durch einen Verzicht auf Passpunkte zu erwarten, wenn die direkte Georeferenzierung der Bilddaten ausreichend genau erfolgen kann (Gerke und Przybilla 2016). Hierzu müssen die GNSS- sowie IMU-Sensoren (IMU = Inertial Measurement Units) der Drohne die Koordinaten der Aufnahmezentren sowie die Neigungswinkel der Drohne mit hoher Genauigkeit erfassen. Für hochgenaue Positionsdaten sind GNSS-Korrekturdaten erforderlich. SAPOS®, der Satellitenpositionierungsdienst der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, sendet diese mit einer Frequenz von 1 Hz aus. Innerhalb dieser Zeit legt die Drohne mehrere Meter zurück. Die Bewegung ist jedoch nicht linear, so dass die Positionsbestimmung durch Interpolation zu großen Unsicherheiten führt. Die SAPOS-Frequenz ist für diese Anwendung zu gering. Abhilfe kann eine Referenzstation, die Korrekturdaten mit höherer Frequenz bereitstellt, schaffen. Alternativ können die Aufnahmepositionen im Post-Processing verbessert werden (Dworak 2017).

4.3.4 Sensoren

Die Erfassung von Geodaten kann durch sehr unterschiedliche Sensoren erfolgen. Aktuell erfolgt im ersten Schritt nur eine Betrachtung von fotografischen Kamerasystemen aus dem Consumer-Bereich (Kompakt-, System- oder Spiegelreflexkameras) mit einer Pixelzahl von 20 Megapixeln (MP) bis 42 MP (Przybilla et al. 2018). Die Kamerasysteme sind zum Teil im UAV fest verbaut oder austauschbar. Die Pixelzahl allein ist jedoch nicht aussagekräftig, vielmehr beeinflusst die Sensorgröße das tatsächliche Auflösungsvermögen eines Sensors. Bei gleicher Pixelanzahl sind größere Sensoren weniger rauschempfindlich, da mehr Photonen auf die größeren Bildelemente treffen. Da es sich beim UAS-Einsatz in der Regel um lichtkritische Aufnahmen u. a. durch möglichst kurze Belichtungszeiten handelt und später Präzisionsmessungen mit möglichst wenig Bildrauschen erfolgen sollen, ist die Größe des Sensors von entscheidender Bedeutung. Hinzu kommt, dass es sich um bewegte Aufnahmen handelt, die je nach Verschluss technik und Sensor mit einem sogenannten Rolling Shutter-Effekt behaftet sein können. Vermieden werden kann der Rolling-Shutter-Effekt mit sogenannten Global-Shutter-CMOS-Sensoren, welche das Bild nicht zeilen- und spaltenweise, sondern vollständig aufnehmen. CCD-Sensoren zeigen aufgrund ihrer anderen Funktionsweise keinen Rolling-Shutter-Effekt.

Darüber hinaus ist eine stabile innere Orientierung der Kamera notwendig. Kameras mit wenigen beweglichen Teilen, z. B. einer Festbrennweite, bieten günstige Voraussetzungen für eine hohe Stabilität während des Fluges. Einige Softwarepakete (z. B. Agisoft Metashape oder Pix4Dmapper) versuchen Unzulänglichkeiten der Kamerageometrie rechnerisch zu kompensieren. Tatsächlich lassen sich anhand der Herstellerangaben keine Aussagen über die Stabilität und Metrik der Kameras treffen, diese können nur durch Untersuchungen beurteilt werden.

4.3.5 Betriebssicherheit

Die Betriebssicherheit hängt von der Technik und Bauweise des UAV, der regelmäßigen Wartung des Systems und der Ausbildung und Erfahrung des Fernpiloten ab. Der Kenntnissnachweis gem. § 21a Abs. 4 LuftVO für die Steuerer (im Projekt erworben) und eine Betriebseinweisung in das jeweilige UAS sind für einen sicheren Betrieb unerlässlich.

4.4 Marktüberblick und Beschaffung

4.4.1 UAS

Ausgehend von dem nachfolgend entwickelten Anforderungsprofil wurden zahlreiche Angebote für eine Beschaffung bzw. Testbefliegungen eingeholt. Folgende Hauptpunkte wurden als Kriterium festgelegt:

1. RTK/PPK-Lösung
2. GPS, Glonass und Galileo, (Beidou)
3. Genauigkeit (Lage < 4 cm / Höhe < 10 cm / GSD mind. 2 cm)
4. Flugzeit
5. Sicherheit (Redundanz der Systeme, Gewicht, Wetterfestigkeit)
6. Preis

Die in [Tab. 1](#) genannten Systeme wurden getestet. Für den kostengünstigen Bereich ist eine DJI Phantom 4 RTK + D-RTK 2 Mobile Station Kombination die erste Wahl. Für den Highend-Bereich eignet sich das UAS AX20 des Unternehmens Leica. Es ist, im Vergleich mit der DJI Phantom 4 RTK ([Tab. 2](#)), teurer und größer, liefert aber bei gleichen Voraussetzungen eine bessere GSD. Weiter befliegt es die gleiche Fläche in deutlich kürzerer Zeit, da eine Systemkamera (Sony Alpha 7R II, Vollformat) mit entsprechendem Objektiv verbaut ist. Bei der DJI Phantom 4 RTK und dem Leica Aibot sind jeweils RTK-Empfänger integriert. Dies ist für die TOPCON Intel Falcon 8+, ausgerüstet ebenfalls mit der Sony Alpha, nicht umgesetzt.

Im ersten Schritt wurde eine DJI Phantom 4 RTK + D-RTK 2 Mobile Station Combo beschafft. Erste Flugerfahrungen wurden mit dem Modell DJI Mavic 2 Pro gesammelt.

Tab. 1: Ausgewählte UAV-Systeme



Modell	Mavic 2 pro	Phantom 4 RTK	Falcon 8+	Aibot
Hersteller	DJI	DJI	Topcon	Leica + DJI
Startgewicht	907 g	1391 g	2800 g	ca. 12 kg
Typ	Quadrokopter	Quadrokopter	Octokopter	Hexakopter
Kamera	20 M (fest)	20 M (fest)	Variabel (Sony a7R II)	Variabel (Sony a7R II)
Flugzeit (tatsächliche Flugzeit)	ca. 31 Min. (25 Min.)	ca. 30 Min. (25 Min.)	ca. 26 Min. (16 Min.)	ca. 24 Min. (ca. 22 Min.)
Flug- planungs- software	DJI GO bzw. DJI GS (Variabel)	DJI GS RTK	IntelMission- Control	Leica QGround Control und Leica skyCAPP

4.4.2 Flugplanungssoftware

Einige Softwarelösungen zur Flugplanung sind an die jeweiligen UAV-Hersteller gebunden. Je nach Anwendungsausrichtung der UAV-Hersteller, insbesondere bei den Low-Cost-Systemen, sind die Lösungen angepasst und variieren stark. Für die Verwendung eines UAS für Vermessungsaufgaben ist es wichtig, sämtliche Kamera- und Flugplanungsparameter explizit vorgeben zu können.

Bislang wurde die Flugplanungssoftware DJI GS RTK mit der DJI Phantom 4 RTK sowie Pix4D Capture (UAV-Hersteller ungebunden) mit der DJI Mavic 2 Pro getestet. Die Software Intel Mission Control und Leica QGroundControl/SkyCAPP wurden im Rahmen einer Firmenpräsentation vorgestellt. Intel Mission Control bietet für die Erfassung von Gebäudefassaden zusätzlich einen vertikalen Flugmodus an. Die unterbrechungslose Kreuzbefliegung in zwei unterschiedlichen Höhen zur Qualitätsverbesserung der Datenerhebung bietet keines der Flugplanungsprogramme.

Tab. 2: Technische Daten DJI Phantom 4 RTK

Gewicht	1391 g
Diagonaler Abstand	350 mm
Max. Geschwindigkeit	16 m/s
Max. Geschwindigkeit (Steig/Sink)	6 m/s / 3 m/s
Max. Flugzeit	Etwa 30 Minuten
Betriebstemperatur	0 °C bis 40 °C
Positionsbestimmung	GPS + GLONASS + Galileo, RTK
Bildpositionsversatz	36 mm nach vorn, 0 mm seitlich und 192 mm nach unten

Tab. 3: Technische Daten der Kamera der DJI Phantom 4 RTK

Sensor	1" CMOS; Pixel: 20 MP
Sensorformat, Pixel	13,2 mm × 8,8 mm, 2,4 µm
Objektiv	Sichtfeld 84° 8,8 mm/24 mm, F2.8 – F11, Autofokus ab 1 m bis ∞
ISO-Bereich	Foto: 100-3200(A), 100-12800(M)
Verschluss (mechanisch/elektr.)	8 – 1/2000 s / 8 – 1/8000 s
Maximale Bildgröße	5472 × 3648 (3:2)
Fotoformat	JPEG
Betriebstemperatur	0 °C bis 40 °C

4.4.3 Auswertesoftware

Tab. 4 zeigt eine Auflistung von Auswertesoftware unter Angabe besonderer Eigenschaften (nach Herstellerangaben und eigenen Erfahrungen). Aus der Vielzahl an Softwareprodukten wurde lediglich „Metashape“ der Firma Agisoft im Projekt eingesetzt. Zusätzlich soll noch „Pix4D Mapper“ der Firma „Pix4D“ getestet werden, da diese beiden Produkte eine sehr hohe Verbreitung in der Auswertung von UAV-gestützten Aufnahmen, sowohl im gewerblichen als auch im wissenschaftlichen Bereich, haben. Beide Programme unterstützen eine Vielzahl von Produkten und Dateiformaten (Alidoost und Arefi 2017, Remondino et al. 2017). Die Firma Leica stellte im Rahmen einer Testbefliegung die haus-eigene Auswertesoftware IMAGINE vor.

Tab. 4: Auswertesoftwareprodukte

Anwendung/ Hersteller	Herkunft	Besondere Eigenschaften/ Bemerkungen	Ausgabe- formate
Metashape Agisoft	3D-Modellie- rung	Intuitiv bedienbar und sehr verbreitet, auf Drohnenvermessung ausgerichtet.	Standard- formate
Pix4D Mapper Pix4D	Luftbild- photogram- metrie	Sehr verbreitet, gute Bedienbarkeit, auf Drohnenvermessung ausgerichtet.	Standard- formate
Context Capture Bentley	CAD und GIS	Sehr umfangreiches Softwareangebot. Integration von Laserscandaten, parallele Rechenleistung, Weiterverarbeitung der Daten möglich (z. B. Kantenextraktion, Querschnitte).	Standard- formate
3Dsury	Vermessungs- bereich und 3D-Modellie- rung	Intuitiv bedienbar und sehr verbreitet, auf Drohnenvermessung ausgerichtet, speziell für DJI Phantom 4 RTK kon- figurierbar.	Standard- formate
Reality Capture	Photogram- metrie	Intuitiv bedienbar und sehr verbreitet, auf Drohnenvermessung ausgerichtet. (Erst mit Speichern fallen Kosten an, bis dahin kostenfrei).	Standard- formate
Terra DJI	UAV-Entwi- cklung bzw. Flugplanung	Sehr intuitiv, keine Vorkenntnisse not- wendig, Flugplanung und Auswertung in einer Software, Szenarien Auswahl (Land, Stadt, etc.) für angepasste Flug- planung. Wenig Einflussnahme bei Auswertung, Wenig detaillierter Quality Report, „Blackbox“ Lösung für Einsteiger.	GeoTIFF, PLY, OSGB, B3DM
Imagine Hexagon/ Leica	Luftbildphoto- grammetrie	Auch für Fernerkundung und Analyse nutzbar, da ERDAS Imagine integriert werden kann. Sehr schnell (durch Semi-Global-Mat- ching Verfahren; Daten können direkt im ArcGIS Stereo Analyst genutzt werden.)	Standard- formate
Socet GXP BAE Systems	Fernerkun- dung und Nachrichtliche Analysen	Sehr vielseitig, Integration von verschie- denen Datenquellen. Umfangreiche Analysemöglichkeiten	Standard- formate
iWitness PRO Photometrix	Nahbereichs- photogram- metrie	Einfache Handhabung, „Blackbox“ Verfahren. Besondere Werkzeuge zur Kamerakalibrierung.	GeoTiff, LAS, PLY

4.4.4 Rechnerausstattung

Die zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten sind entscheidend für eine zeitnahe Auswertung. Standardmäßig vorhandene Rechner benötigten erhebliche Rechenzeit, um eine Punktwolke in höchster Qualität zu erzeugen. Zurzeit werden leistungsstarke Workstations mit folgenden Eckdaten beschafft:

Betriebssystem:	Windows 10 Pro for Workstations
CPU:	Intel Xeon W-2133 6C 3.6 Ghz
RAM:	4 × 16 GB DDR4-2666 rg ECC
Grafik:	Nvidia Geforce RTX 2080 Ti
SSD:	PCIe, 512 GB
HDD:	4000 GB HDD SATA III 7.2k BC

5 Praktische Erprobung

Ziel dieser Phase war es, den Workflow zu beherrschen, Erfahrungen zu sammeln und Erkenntnisse hinsichtlich der wesentlichen Teilaspekte des Projektauftrages zu gewinnen. Es wurden dazu Gebäude und langgestreckte Anlagen befliegen. Die praktische Erprobung wird nachfolgend am Beispiel der Testbefliegung „Gut Altona“ (Abb. 3) geschildert.

5.1 Planung

Eine vor der Flugplanung durchgeführte Auftragsprüfung umfasst:

- Rechtliche Beurteilung (Lage und Luftraum siehe Abb. 3)
- Fachliche Beurteilung mit der Prüfung vorhandener Geobasisdaten, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Risikoabschätzung
- Terminplanung (Wetter, Topografie, Naturschutz etc.)
- Informationen an Polizei/Ordnungsbehörden, Eigentümer/Verantwortliche



Abb. 3: Lage und Luftraum „Gut Altona“

Nach dem positiven Abschluss der Auftragsprüfung beginnt die eigentliche Flugplanung unter Berücksichtigung der fachlichen Anforderungen und unter Einbeziehung risikominimierender Faktoren mit folgenden Punkten:

- Art der Befliegung (z. B. Kreuzbefliegung, RTK-Einsatz, 5 GCP-GNSS-Messung)
- Flugparameter (z. B. Höhe 50 m, GSD 1,37 cm, Bildüberlappung 80×80 , Kameraneigung 60° , Fluggeschwindigkeit 2 m/sec.)
- Kameraparameter (z. B. ISO-Wert 100, Belichtungszeit 1/1600, $f/2,8$, Fokus ∞)

5.2 Flugdurchführung

Die Datenerfassung erfolgte aus Sicherheits- und Informationsgründen mit zwei Einsatzkräften. Zur unmittelbaren Flugvorbereitung gehören dabei:

- Abarbeitung einer entwickelten Sicherheitscheckliste
- Prüfung der örtlichen Situation (Topografie, Menschenansammlungen etc.)
- Erzeugung von Testaufnahmen und deren Beurteilung
- Beginn der Flugdokumentation im Flug- und Auftragsbuch

Der eigentliche Flug wird vom Steuerer am Controller anhand von eingesetzter Flugplanungssoftware, Telemetriedaten und Kamera überwacht, ein Luftraumbeobachter sichert zusätzlich den Flug und den Einsatzort ab bzw. unterstützt die Datenerfassung.

Die erfassten Daten sind vor Ort auf ihre Qualität zu prüfen. Der gesamte Einsatz ist abschließend im Flug- und Auftragsbuch zu dokumentieren. In der Auftragsdokumentation sind für die weitere Auswertung relevante Vorkommnisse wie z. B. Akku-Wechsel festzuhalten.

5.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgte mit dem Programm Metashape. In [Abb. 4](#) ist das Auswerteprotokoll auszugsweise dargestellt.

Die aufeinanderfolgenden Prozesse erzeugen zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche Produkte. Diese können als Vorprodukte oder Endprodukte genutzt werden. In der [Abb. 5](#) sind die einzelnen Workflows, Produkte und Formate mit der Software Metashape abgebildet (Agisoft LLC 2019). Die Produkte „Mesh“ und „ModelTexture“ sind nicht notwendig, um die Produkte „DEM“ und „Orthomosaic“ zu berechnen.

In [Abb. 6](#) ist das bDOM mit einer Auflösung von 40 cm, abgeleitet aus der turnusmäßigen Luftbildbefliegung, dem aktuellen bDOM mit einer Auflösung von 3 cm aus der UAV-Befliegung gegenübergestellt.

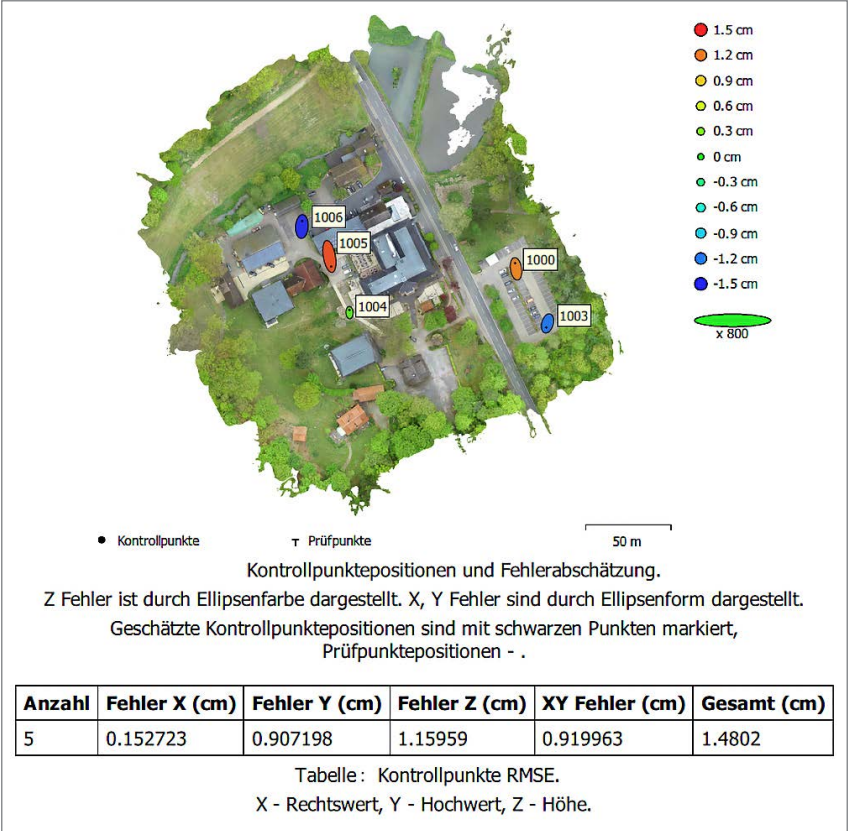


Abb. 4: Passpunktpositionen und Fehlerabschätzung

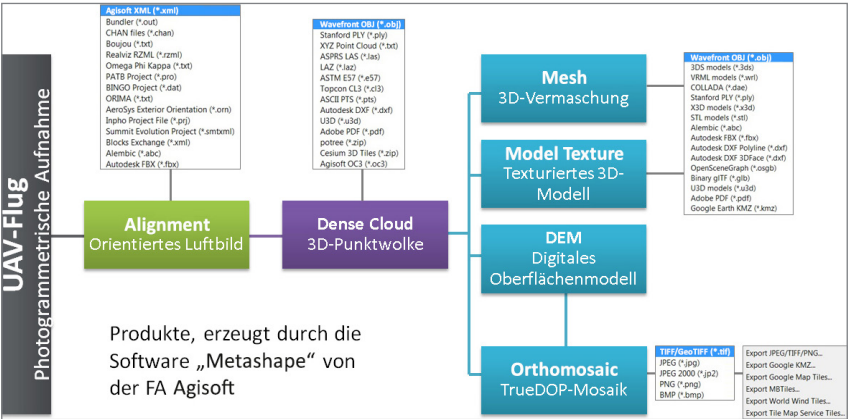


Abb. 5: Produkte und Formate erzeugt mit Metashape

Die Abb. 7 zeigt ein Orthophoto aus der turnusmäßigen Luftbildbefliegung neben einem TrueDOP aus der UAV-Befliegung. In beiden Fällen wurde der Gebäudebestand in der Liegenschaftsgrafik, terrestrisch mit 4 cm Genauigkeit erfasst, hinterlegt. Auch wenn die Dachüberstände eine direkte Ableitung der Gebäudegrundrisse für die Liegenschaftsgrafik aus dem UAV-TrueDOP nicht erlauben, wird die Qualität (räumliche Auflösung) und der Informationsgehalt (u. a. die Aktualität) der UAV-Erfassung für das Liegenschaftskataster sichtbar.

Die Abb. 8 zeigt die abgeleitete Punktwolke in hoher Auflösung.

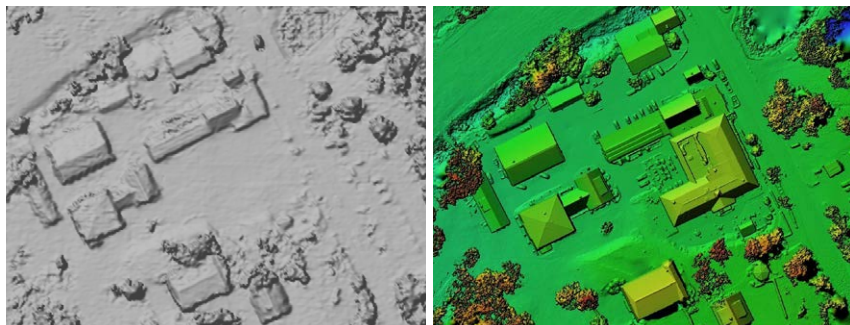


Abb. 6: Links: bDOM (40 cm). Rechts: UAV-bDOM (3 cm)



Abb. 7: Links: Orthofoto (20 cm). Rechts: UAV-TrueDOP (1,5 cm)

Die einzelnen Prozessschritte, Produkte und erzeugten Datenformate lassen erkennen, dass durch die Auswertung der erfassten Massendaten, im Gegensatz zur herkömmlichen terrestrischen Gebäudeerfassung, wesentlich mehr Anwendungsgebiete bedient werden. In der Befliegung von „Gut Altona“ wurden in kürzerer Zeit wesentlich mehr Daten als bei der herkömmlichen Tachymetermessung erfasst. Beispielsweise betrug der Zeitaufwand für einen Trupp aus zwei Beschäftigten für die Datenerfassung im Feld einschließlich der Bestimmung der GCP (SAPOS®-Messung) ca. zwei Stunden.



Abb. 8: Ddense point cloud, hohe Auflösung

Der Zeitaufwand für die Datenprozessierung hängt maßgeblich von der Rechnerleistung ab, wobei diese in großen Teilen automatisiert erfolgt. Beispielfhaft können neue Flurstücksgrenzen an Straßen oder Gewässern mit Bezug zur Topografie aus dem UAV-TrueDOP erfasst werden. Die Ableitung der Liegenchaftsgrafik für ein Gebäude kann aus dem orientierten Luftbild oder einer 3D-Vermaschung erfolgen.

Entscheidend für gute Auswerteergebnisse sind gute Rahmenbedingungen (Vorbereitung, Wetter, Information etc.) und insbesondere Erfahrungen in der Flugplanung, im Flugbetrieb sowie bei den richtigen Einstellungen der Kamera-parameter.

6 Einsatzmöglichkeiten und Produkte

Der aktuelle Stand des Projektes erlaubt aufgrund des erworbenen Wissens sowie der Testerfahrungen aus Flugplanung, Befliegung und Auswertung eine Abschätzung der Einsatzmöglichkeiten und Produkte von Daten, die mittels UAS erfasst werden. Dabei wurden über die VKV hinaus Anwendungsgebiete auch für andere Teile der Landesverwaltung identifiziert. Hier müssen die Qualität und Wirtschaftlichkeit noch genauer untersucht werden. Aus zahlreichen Kontakten innerhalb der Landesverwaltung wurde deutlich, dass es durchaus Bedarf an Produkten und Dienstleistungen gibt. In der [Tab. 5](#) werden die Einsatzmöglichkeiten strukturiert aufgelistet.

Tab. 5: Einsatzszenarien

Anwendungsgebiet/Produkt		Welche Daten können ggf. genutzt werden?						
		Foto	Orientiertes Luftbild	3D-Punktwolke	3D-Vermaschung	Texturiertes 3D-Modell	Digitales Oberflächenmodell	TrueDOP
Auftragskernbereich	Gebäude 2D (Grundriss)		x	x	x			
	Gebäude 3D		x	x	x	x		
	Planunterlage	x	x	x	x	x	x	x
	Langgestreckte Anlage			x			x	x
	DGM			x			x	
Potenzielle Möglichkeiten	Gutachten (Foto)	x						
	Schrägluftbilder	x	x					
	Feldvergleich	x	x					
	Tatsächliche Nutzung		x	x				x
	Aktuelle räumliche Veränderungen		x	x	x		x	x
	Senkungsgebiete (zur Dokumentation)			x			x	
	Qualitätsverbesserung			x			x	x
	BIM (Building Information Modeling)			x				
Geodaten-dienstleister	Plan nach § 41 FlubG			x			x	x
	Denkmalschutz	x	x	x	x	x	x	x
	Katastrophenschutz	x	x	x	x	x	x	x

7 Vorläufiges Fazit und Ausblick

Der Werkstattbericht gibt eine Momentaufnahme des Projektes wieder und ist nicht abschließend. Im Verlauf der Projektarbeit wurde erkennbar, dass sich bisher nur wenige Vermessungs- und Katasterverwaltungen der Länder in Deutschland umfänglich mit dem Einsatz von UAS in ihrem Anwendungsbereich

befasst haben. Klar wird auch, dass die Integration der UAV-gestützten Datenerhebung bei der VKV bisherige Messverfahren ergänzen oder vielleicht sogar ablösen kann. Die geforderte Qualität der Datenerfassung ist bereits jetzt in vielen Fällen erreichbar. Um die Praxistauglichkeit nachzuweisen, bedarf es allerdings Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. In kürzerer Zeit werden mehr Informationen erfasst, die mit mehr Rechenkapazität auszuwerten sind. Aus einer Datenerfassung können verschiedene Anwendungen innerhalb und außerhalb der VKV bedient werden. Die dynamischen Entwicklungen in den Bereichen UAV-Systeme, optische Sensoren und LIDAR sowie bekannte wissenschaftliche Untersuchungen lassen erkennen, dass die bestehenden Herausforderungen wie z. B. Optimierung der Georeferenzierung, die Abschattungsproblematik sowie selektive und weitgehende automatisierte Auswertung der Massendaten bewältigt werden können.

Für die zukünftige Projektgruppenarbeit bedeutet dies, den Nachweis der Praxistauglichkeit für das Liegenschaftskataster in den Bereichen Straßenschluss-/Gewässervermessungen, Gebäudevermessung und Lageplanerstellung zu erbringen. Gleiches gilt für die Landesvermessung bei der partiellen Spitzenaktualisierung der 3D-Geobasisdaten (DGM1, DOM, 3D-Gebäudemodelle).

Darüber hinaus müssen die Entwicklungen im rechtlichen Bereich genau beobachtet werden. Sollte es insbesondere zu keiner weiteren Privilegierung der VKV beim Einsatz von UAS kommen, ist es aus heutiger Sicht erforderlich, die Anerkennung als Betreiber für Leicht-UAS in der Betriebskategorie „Speziell“ nach neuem EU-Recht zu erhalten. Bei erwiesener Praxistauglichkeit, ist die neue Technologie in die bestehenden Vorschriften und in das Verwaltungshandeln zu integrieren.

Um das Projekt weiter voran zu bringen, sollte die Kooperation mit Hochschulen gesucht werden. Gezielte Themensetzungen bei Bachelor- und Masterarbeiten können bei der Lösung bestehender Herausforderung helfen.

Literatur

- Agisoft LLC. (2019): Agisoft Metashape User Manual. Professional Edition, Version 1.5.
- Alidoost, F., Arefi, H. (2017): Comparison of UAS-Based Photogrammetry Software for 3D Point Cloud Generation: a Survey over a Historical Site. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-4/W4, 55–61. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017).
- BMVI (2017): Homepage des BMVI. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/151108-drohnen.html, letzter Zugriff 11/2019.
- Dieckert, U., Eich, S. (2018): Drohnen – Technik und Recht: bei gewerblicher und behördlicher Nutzung. Köln, Bundesanzeiger, 1. Aufl., 88 ff., 404 ff.

- Dworak, E. (2017): Untersuchungen zur Genauigkeit von PPK GNSS basierten UAV-Luftbildbefliegungen im Insel- und Küstenschutz. Unveröffentlichte Abschlussarbeit, Jade Hochschule Oldenburg.
- EUR-Lex (2018): Homepage der EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1139>, letzter Zugriff 12/2019.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (1), 17–30.
- Giemulla, E. (2019): Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Drohnen. In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum. DVW-Schriftenreihe, Band 94, Augsburg, 9–19.
- Luhmann, T. (2018): Bildbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion – Möglichkeiten und Grenzen. In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 31–44.
- Przybilla, H.-J., Bäumker, M., Vieten, J. (2018): Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund. In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 61–79.
- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., Menna, F. (2017): A Critical Review Of Automated Photogrammetric Processing of Large Datasets. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W5, 591–599. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017).

Kontakt

Lothar Schlösser

Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen

Regionaldirektion Oldenburg-Cloppenburg, Katasteramt Brake

Schrabberdeich 43, 26919 Brake (Unterweser)

lothar.schloesser@lgln.niedersachsen.de

Sascha Kuhnt

Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen

Regionaldirektion Hameln-Hannover, Katasteramt Rinteln

Breite Straße 17, 31737 Rinteln

sascha.kuhnt@lgln.niedersachsen.de

Session2:

Prozesse und Einflussfaktoren

UAV-Befliegung – Alles klar?

Über den Einfluss der Aufnahmekonfiguration

Heinz-Jürgen Przybilla

1 Einleitung

Die Planung eines Bildfluges mittels UAV ist mit einer Vielzahl von Fragen zur konkreten Umsetzung verknüpft. System- und Third-Party-Anbieter stellen diverse Applikationen zur Verfügung, mit dem Ziel diese Aufgabenstellung möglichst optimiert durchführen zu können. Während Begriffe wie Bodenauflösung (Ground Sample Distance – GSD), Flughöhe über Grund, Überlappungsverhältnis, etc. aus der „klassischen“ Photogrammetrie stammen und konkrete Vorgaben für die Aufnahmekonfiguration bezeichnen, geben Bezeichnungen wie „2D-Photogrammetrie/2D maps“ oder „3D-Photogrammetrie/3D models“ in den Planungs-Apps eher Hinweise auf mögliche Endprodukte der Befliegung (Abb. 1).

Offensichtlich soll der (unbedarfte?) Anwender hier von Detailfragestellungen entlastet werden und möglichst schnell eine standardisierte Flugplanung erstellen können. Als möglicher Nebeneffekt dieser Strategie kann jedoch die

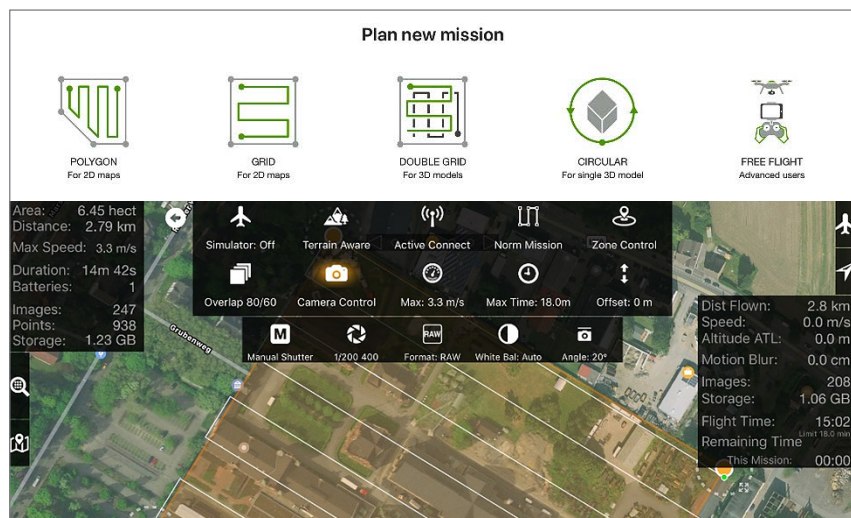


Abb. 1: Benutzeroberflächen der Planungstools Pix4DCapture (oben) und Map Pilot (unten)

sinnvolle Variation in den – an das spezifische Projekt – anzupassenden Einstellungen verloren gehen.

Im vorliegenden Beitrag wird der Einfluss der Aufnahmekonfiguration auf die Qualität von Bildverbänden untersucht. Das Bilddatenmaterial wurde im Rahmen von Aufnahmekampagnen auf dem UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund (Przybilla et al. 2018, LWL 2019) in 2018 und 2019 erfolgen.

2 Aufnahmekonfiguration

Um eine Vergleichbarkeit der aus verschiedenen Konfigurationen resultierenden Ergebnisse zu gewährleisten, wurde für alle Systeme eine einheitliche GSD von 14 mm festgelegt (Fluganordnung: Regular/R). Ergänzend hierzu erfolgte jeweils ein weiterer Flug in einer Kreuzanordnung (Cross/C), wobei die Flughöhe um 20 % von der Regular-Anordnung abweicht (Abb. 2). Hintergrund für die Erweiterung des Aufnahmekonzepts um die Kreuzanordnung ist deren positive Auswirkung auf die in-situ-Kalibrierung des eingesetzten Kamerasystems sowie die in der Regel damit einhergehende Steigerung der Genauigkeit des Bündelblocks (Przybilla et al. 2015, Gerke und Przybilla 2016).



Abb. 2: Nadir-Kreuzbefliegung (Regular + Cross)

Eine weitere, relevante Einflussgröße ist durch das Überlappungsverhältnis (in Längs- und Querrichtung) gegeben. Während für die meisten Anwendungen eine Längsüberdeckung von 80 % angesetzt wird, variiert die Querüberdeckung vielfach zwischen 60 % und 80 %. Grundsätzlich verbessert die höhere Überlappung die Stabilität des Bildverbands und gleicht Unregelmäßigkeiten im Flugverhalten des UAV besser aus (z.B. bei auftretenden größeren Bildverkantungen), jedoch geht dies einher mit einem deutlich höheren Befliegungsaufwand. Im Vergleich zu einer 60 %-Querüberdeckung resultiert aus einem Bildflug

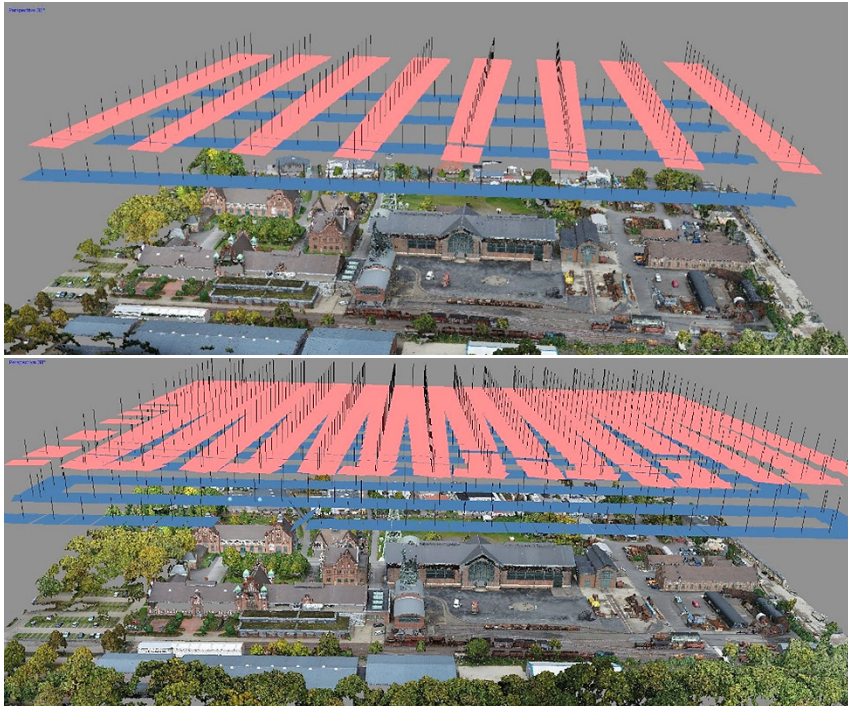


Abb. 3: Querüberdeckung 60 % (oben) vs. 80 % (unten)

mit 80 %-Querüberlappung die doppelte Bildanzahl (Abb. 3). Dies übt natürlich auch Einfluss auf den Aufwand für die Prozessierung aus – hier insbesondere die zeitliche und somit auch wirtschaftliche Komponente.

Die Senkrecht- oder auch Nadir-Aufnahme stellt den Standardfall der Luftbildaufnahme dar. Dies gilt auch für UAV-Anwendungen. Allerdings bieten vor allem Koptersysteme, bei denen die Kamera in einem (in Flugrichtung) schwenkbaren Gimbal gelagert ist, die Option Schräg-(Oblique-)Aufnahmen zu erstellen. Diese Option kann vorteilhaft genutzt werden, um eine erweiterte Erfassung stärker geneigter Geländeoberflächen sowie auch vertikaler Flächen, z. B. in Gebäudeszenarien, zu ermöglichen. Darüber hinaus können derartige Messbilder auch zur weiteren Stabilisierung des Bildverbandes beitragen. Die in Abb. 4 dargestellten Schrägbilder des Flächenverbands weisen einen Winkel von ca. 20° (gegenüber dem Nadir) in Flugrichtung auf.



Abb. 4: Bildverband Nadir-Oblique (oben, rot) und Oblique-Oblique (unten, blau)

3 Untersuchungsergebnisse

Für die im Nachfolgenden beschriebenen Auswertungen wurden folgende Plattformen und Sensoren genutzt:

- DJI Phantom 4 Pro, Kamera: Zenmuse X4S
- DJI Matrice 210 V2 RTK, Kamera: Zenmuse X7

Die Zenmuse X4S verfügt über einen 1 Zoll Sensor mit 20,8 MPixel und einer Brennweite von 8,8 mm. Die Kamera wird auch auf der aktuellen Phantom 4 mit RTK-Sensorik eingesetzt (DJI 2020a)

Die Zenmuse X7 ist das Standardsystem der DJI Matrice Baureihe. Der Sensor verfügt über 24 MPixel bei einem Sensorformat von $23,5 \times 15,7$ mm (DX-Format). Die eingesetzte Wechseloptik hat eine Brennweite von 24 mm (DJI 2020b).

Bei beiden Kameras handelt es sich somit um Weitwinkelsysteme. Sie sind zudem mit einem mechanischen Zentralverschluss ausgestattet.

3.1 Einfluss der Bildausrichtung

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse basieren auf Befliegungen mit dem System Zenmuse X4S. Untersucht werden hier die Auswirkungen unterschiedlicher Bildausrichtung auf die Resultate der Bildtriangulation. Die Berechnungen erfolgten mit der Software Agisoft Metashape. Aus den im Testfeld erfassten Bilddaten resultieren die folgenden Konfigurationen:

- 50 m NADIR (R)
- 50 m OBLIQUE (R)
- 50 m NADIR (R) / 60 m NADIR (C)
- 50 m OBLIQUE (R) / 60 m OBLIQUE (C)
- 50 m NADIR (R) / 60 m OBLIQUE (C)
- 50 m OBLIQUE (R) / 60 m NADIR (C)

Für die Lagerung der Bildverbände wurden 12 flächenhaft verteilte Bodenpasspunkte (GCP) genutzt. Zur Kontrolle standen 33 Kontrollpunkte (CP) zur Verfügung. Die a-priori-Genauigkeit der GCP und CP wurde auf Grund der Qualität des Grundlagenternetzes auf 5 mm festgesetzt (Lindstaedt und Kersten 2018). In die Bündelausgleichung wurde zudem ein Satz Parameter für die Innere Orientierung (IORI: UNIFIED) eingeführt.

Abb. 5 zeigt die gemittelten quadratischen Restabweichungen (RMSE) an Pass- und Kontrollpunkten nach der Bündelausgleichung. Die hier dargestellten Abweichungen an den Kontrollpunkten (CP) sind der eigentliche Indikator für die Qualität der Bildorientierung, da mit ihrer Hilfe neben einem allgemeinen Genauigkeitsniveau auch Blockdeformationen erkannt werden können.

Während die (einfachen) Regular-Befliegungen die schlechtesten Genauigkeiten aufweisen, ist eine deutliche Steigerung bei den Kreuzbefliegungen erkennbar. Die besten Ergebnisse liefern hierbei die Varianten „50 m Oblique/60 m Oblique“ sowie „50 m Oblique/60 m Nadir“, wobei insbesondere ein Genauigkeitszuwachs in der Z-Komponente (Höhe) erkennbar wird. Die Ursache für diesen Effekt ist durch die – gegenüber den reinen Nadir-Flügen – verbesserten Strahlenschnittgeometrie begründet.

Insgesamt liegen die 3D RMSE-Werte für alle Konfigurationen unterhalb der GSD von 14 mm und zeigen damit ein insgesamt hohes Qualitätsniveau.

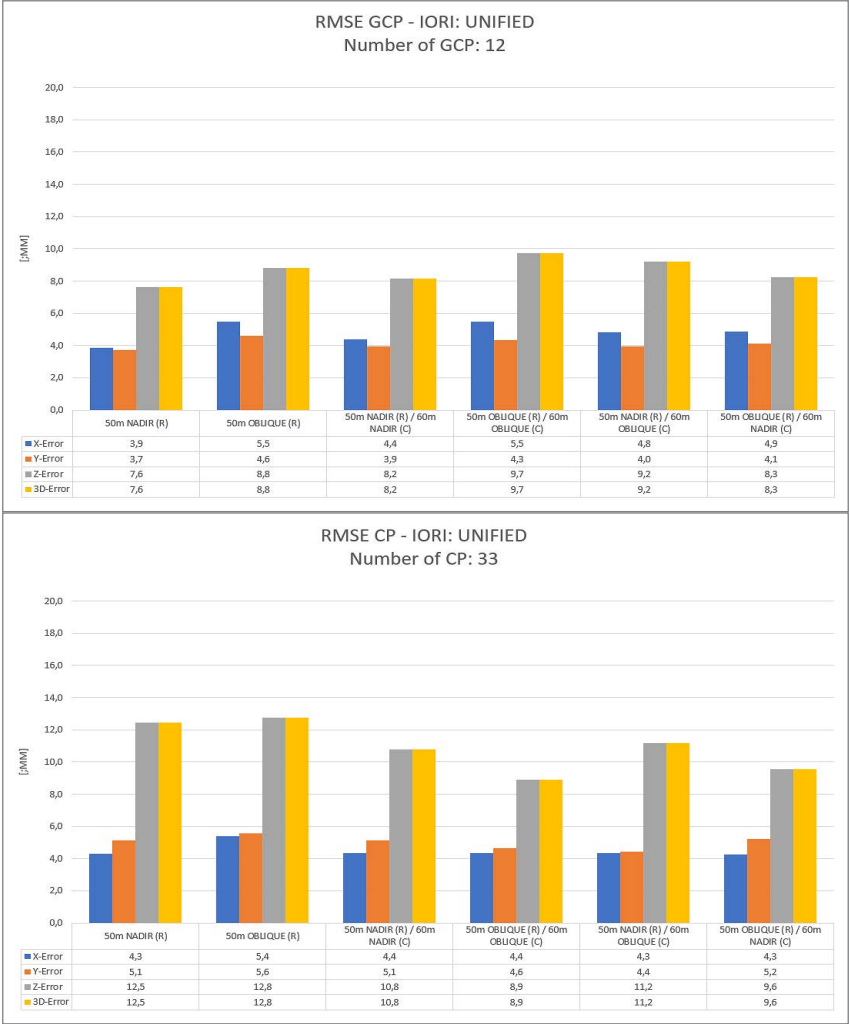


Abb. 5: Restabweichungen (RMSE) an den Passpunkten (GCP, oben) und Kontrollpunkten (CP, unten)

3.2 Einfluss der Bildüberlappung

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse basieren auf Befliegungen mit dem System Zenmuse X7. Untersucht wird die Qualität der Bildtriangulation, hier jedoch in Abhängigkeit von der Bildüberlappung. Zudem werden RTK-Daten zur Sensororientierung genutzt. Aus den erfassten Bilddaten resultieren die folgenden Konfigurationen:

- 80 m NADIR (R) / Overlap 80_80
- 80 m NADIR (R) / Overlap 80_60
- 100 m NADIR (R) / Overlap 80_80
- 100 m NADIR (R) / Overlap 80_60
- 80 m NADIR (R) / 100 m NADIR (C) / Overlap 80_80
- 80 m NADIR (R) / 100 m NADIR (C) / Overlap 80_60

Für die Lagerung der Bildverbände wurden die mittels Realtime Kinematic GNSS (RTK) gemessenen Bildpositionen (Äußere Orientierungen) sowie vier in den Ecken des Blocks befindliche Passpunkte genutzt (a-priori-Genauigkeit 5 mm). Dabei handelt es sich um eine grundsätzlich zu empfehlende Lagerungskonfiguration (Integrierte Sensororientierung, Cramer 2001, Glira et al. 2013). Zur Kontrolle standen (variantenabhängig) maximal 46 Kontrollpunkte zur Verfügung. In die Bündelausgleichung wurde zudem ein Satz Parameter für die Innere Orientierung (IORI: UNIFIED) eingeführt.

Abb. 6 zeigt die gemittelten quadratischen Restabweichungen (RMSE) an Pass- und Kontrollpunkten nach der Bündelausgleichung. Insgesamt liegen die 3D RMSE-Werte für alle Konfigurationen oberhalb der GSD von 14 mm, wobei sie diese um 10 bis 50 % überschreiten. Auffällig ist, dass die Varianten mit 80 %-Querüberdeckung in zwei von drei Versionen größere RMSE-Werte liefern als die entsprechenden mit 60 %-Querüberlappung. Die höhere Überlappung, mit einer ungefähr zweifachen Bildanzahl, liefert in der Blockgenauigkeit keinen erkennbaren Zugewinn. Der 80 m Regular-Flug – in der Konfiguration 80 % Längs- und 80 % Querüberdeckung – liegt zudem auf gleichem Genauigkeitsniveau wie die Kreuzbefliegung in der Variante 80 %_60 %, wobei Letztere über eine bessere Höhengenaugkeit verfügt.

Der gesteigerte Aufwand durch eine höhere Querüberlappung scheint für das vorliegende Objekt ungerechtfertigt. Allerdings sind auch weitere Aspekte, wie solche, die die Qualität/Vollständigkeit der 3D-Punktwolke betreffen, zu berücksichtigen. Insbesondere bei bewegter Oberflächenstruktur oder im Bereich städtischer Szenarien kann eine höhere Querüberlappung vorteilhaft sein (Kap. 3.3).

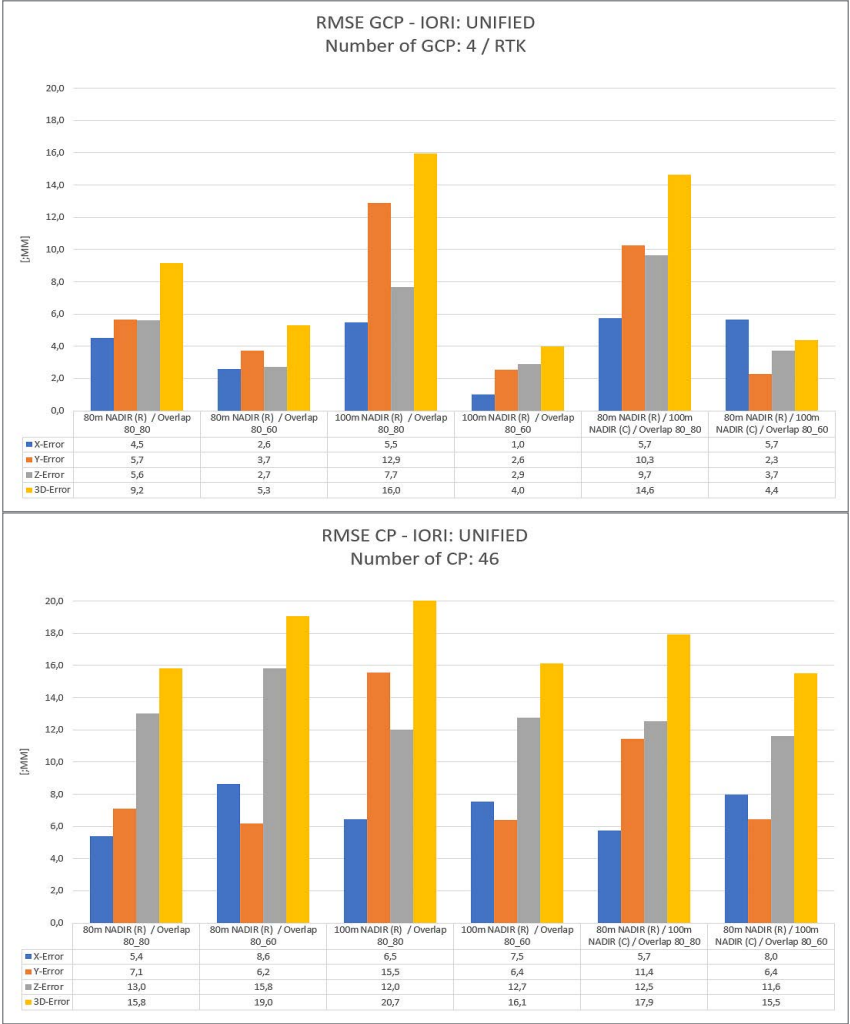


Abb. 6: Restabweichungen (RMSE) an den Passpunkten (GCP, oben) und Kontrollpunkten (CP, unten)

3.3 Auswirkungen auf die 3D-Punktwolke

Im Rahmen der Bildorientierung werden die Daten der Inneren und Äußerer Orientierung sowie die Koordinaten der Merkmalspunkte (dünne Punktwolke) ermittelt. Diese Parameter bilden die notwendigen Grundlagen für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte, hier insbesondere für den Matching-Prozess, aus dem die dichte 3D-Punktwolke abgeleitet wird. Diese wiederum ist die Basis für weitere Sekundärprodukte, wie das Orthophoto, die Ermittlung von Volumina, die Ableitung von Profilen, etc.

Der Qualität der dichten Punktwolke kommt somit eine besondere Bedeutung zu. Neben ihren geometrischen Eigenschaften, die u. a. durch diverse Einstellung im Vorfeld der Prozessierung (z. B. Dichtestufen, Filterung, etc.) festzulegen sind, ist vor allem die Frage zur Vollständigkeit der 3D-Punktwolke zu berücksichtigen. Nachfolgend stehen die Aspekte „Abbildung vertikaler Flächen“ (z. B. Fassaden) sowie „Abbildung der 3D-Objektoberfläche“ (als Grundlage für das Orthophoto) im Fokus. Die Bewertung erfolgt interpretativ.

Die in [Tab. 1](#) und [Tab. 2](#) dargestellten Informationen resultieren aus Berechnungen mit der Software Agisoft Metashape. Die Punktwolken wurden in der Qualitätsstufe „High“, bei gleichzeitiger Nutzung des Tiefenfilters „Aggressive“.

Deutlich erkennbar ist der höhere Zeitbedarf für die Prozessierung bei großer Bildanzahl, erstaunlich hingegen (hier insbesondere bei den Bildverbänden der Zenmuse X4S) die nahezu gleichbleibende Größe der resultierenden dichten Punktwolken. Die statistische Größe „Punkte pro Bild“ zeigt bei kleineren Bildverbänden unerwartet größere Punktmengen!

Die [Abb. 7](#) und [Abb. 8](#) zeigen die unterschiedlichen Vollständigkeitsgrade der 3D-Punktwolke in Abhängigkeit von der Blickrichtung der Kamera. Aus Nadir-Aufnahmen bestehende Bildverbände – sowohl als Regular- als auch als Kreuzverband – stellen vertikale Flächen nur mit großen Lücken dar.

Oblique-Aufnahmen liefern eine deutlich vollständigere Punktwolke, insbesondere in der Kreuzanordnung. Auch diese Punktwolken sind (erwartungsgemäß) im Bereich von Dachüberständen und nicht erfassten Abschattungsbereichen lückenhaft. Eine nur wenig schlechtere Abdeckung wird im 50 m Nadir/60 m Oblique-Verband erreicht.

Der Einfluss variierender Querüberdeckung ([Abb. 8](#)) ist erkennbar, jedoch weniger signifikant. Die vollständigsten Punktwolken liefert hier der Kreuzverband mit 80-prozentiger Längs- und Querüberdeckung, der aber gleichzeitig auch die mit Abstand größte Prozessierungsdauer aufweist ([Tab. 2](#)).

Orthogonale Ansichten der Punktwolke sind in den [Abb. 9](#) und [Abb. 10](#) dargestellt. Die Geländeoberfläche sowie ein Großteil des dargestellten Gebäudebestands sind lückenlos abgebildet. Lediglich das Fördergerüst sowie das dazugehörige Gebäude (rote Kreise in [Abb. 9](#)) sind aufgrund ihrer Höhe von bis

zu 40 m – bei Flughöhen von 50 m bzw. 60 m über Grund – mit diversen Löchern in den Punktwolken versetzt. Letztlich sind diese Objektbereiche nur in wenigen Fotos der Bildverbände abgebildet. Entsprechende Effekte sind in [Abb. 10](#) nicht erkennbar. Aufgrund der größeren Flughöhe (80 m bzw. 100 m) erfolgt auch für diese Gebäude eine Mehrfachabdeckung im Bildmaterial, die in geschlossenen Punktwolken resultiert. Ein Einfluss auf die Vollständigkeit der Punktwolke als Folge verringerter Querüberdeckung ist nicht erkennbar.

Tab. 1: Parameter der dichten 3D-Punktwolke (Bildverbände mit Zenmuse X4S)

			50 m NADIR (R)	50 m OBLIQUE (R)	50 m NADIR (R)	50 m OBLIQUE (R)
	50 m NADIR (R)	50 m OBLIQUE (R)	60 m NADIR (C)	60 m OBLIQUE (C)	60 m OBLIQUE (C)	60 m NADIR (C)
DJI P4 PRO / Zenmuse X4S						
Bilder	253	248	432	404	409	427
Dichte Punkt- wolke [Mio.]	214	222	217	224	225	218
Punkte pro Bild [Mio.]	0.85	0.90	0.50	0.55	0.55	0.51
Prozessie- rungszeit [h]	1:36	1:52	5:58	5:24	5:10	5:37

Tab. 2: Parameter der dichten 3D-Punktwolke (Bildverbände mit Zenmuse X7)

					80 m NADIR (R)	80 m NADIR (R)
	80 m NADIR (R)	80 m NADIR (R)	100 m NADIR (R)	100 m NADIR (R)	100 m NADIR (C)	100 m NADIR (C)
DJI Matrice 210 RTK V2 / Zenmuse X7	Overlap 80_80	Overlap 80_60	Overlap 80_80	Overlap 80_60	Overlap 80_80	Overlap 80_60
Bilder	314	124	392	152	706	276
Dichte Punkt- wolke (Mio.)	319	199	242	161	318	206
Punkte pro Bild [Mio.]	1.02	1.60	0.62	1.06	0.45	0.75
Prozessie- rungszeit [h]	2:51	0:41	7:28	1:23	19:39	3:50

50 m NADIR (R)



50 m OBLIQUE (R)



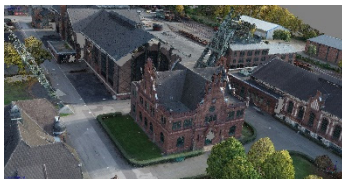
50 m NADIR (R)

60 m NADIR (C)



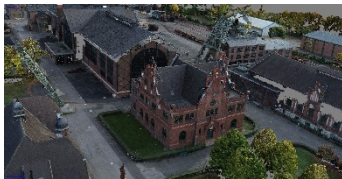
50 m OBLIQUE (R)

60 m OBLIQUE (C)



50 m NADIR (R)

60 m OBLIQUE (C)



50 m OBLIQUE (R)

60 m NADIR (C)

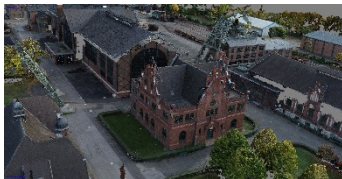
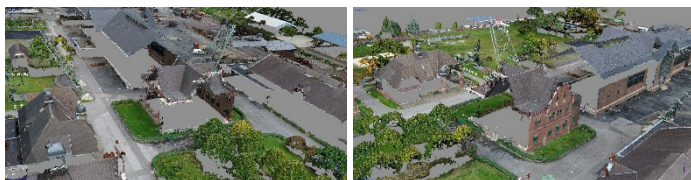


Abb. 7: Vollständigkeit der dichten Punktwolke für Objekte mit vertikaler Ausdehnung (Fassaden) bei variierender Aufnahmerichtung (Nadir/Oblique)

80 m NADIR (R)
Overlap 80_80



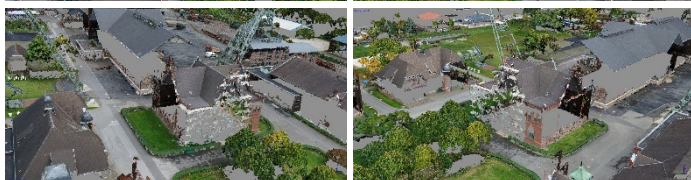
80 m NADIR (R)
Overlap 80_60



100 m NADIR (R)
Overlap 80_80



100 m NADIR (R)
Overlap 80_60



80 m NADIR (R)
100 m NADIR (C)
Overlap 80_80



80 m NADIR (R)
100 m NADIR (C)
Overlap 80_6

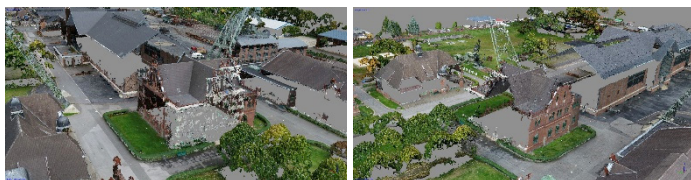


Abb. 8: Vollständigkeit der dichten Punktwolke für Objekte mit vertikaler Ausdehnung (Fassaden) bei Nadir-Flug und variierender Überlappung

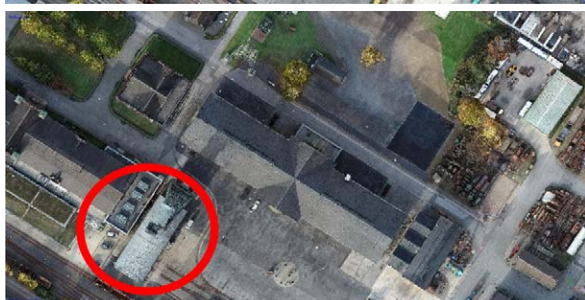
50 m NADIR (R)



50 m OBLIQUE (R)



50 m NADIR (R) 60 m NADIR (C)



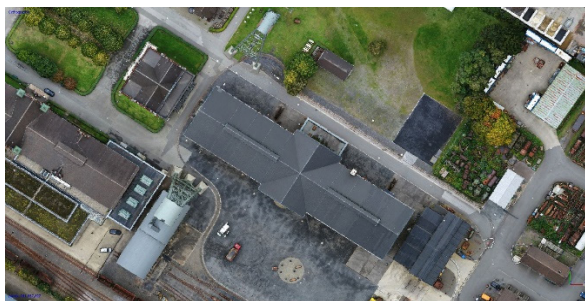
50 m OBLIQUE (R)

60 m OBLIQUE (C)

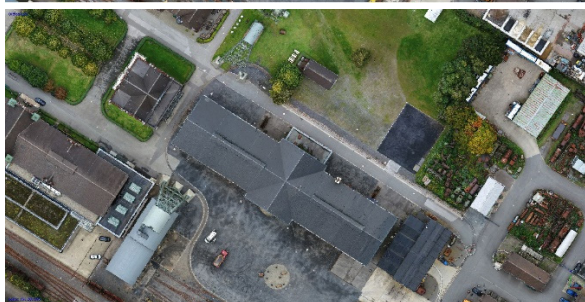


Abb. 9: Vollständigkeit der dichten Punktwolke als Grundlage für die Erstellung von Orthophotos bei variierender Aufnahmerichtung (Nadir/Oblique)

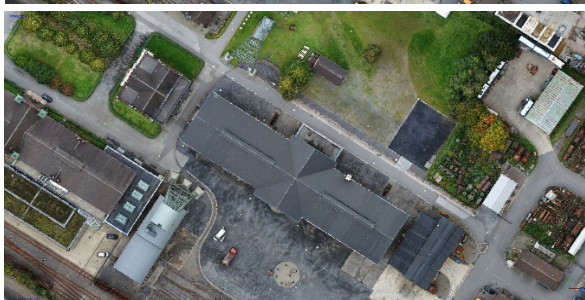
100 m NADIR OVERLAP 80_80



100 m NADIR OVERLAP 80_60



80 m NADIR 100 m NADIR
OVERLAP 80_80



80 m NADIR 100 m NADIR
OVERLAP 80_60

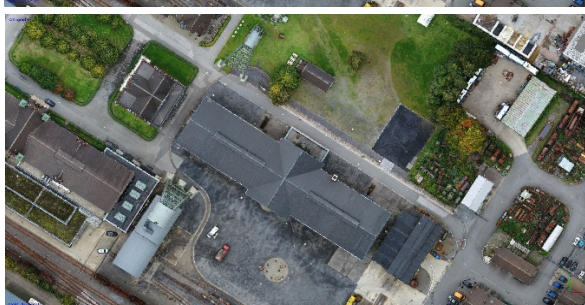


Abb. 10: Vollständigkeit der dichten Punktwolke als Grundlage für die Erstellung von Orthophotos bei Nadir-Flug und variierender Überlappung

4 Fazit

Die fachgerechte Planung eines UAV-Bildverbands bildet die Grundlage für eine erfolgreiche Projektabwicklung. Die Topographie der natürlichen Objekte, die geometrischen Eigenschaften der künstlichen Aufbauten sowie letztlich die zu erstellenden Endprodukte sind wesentliche Faktoren, die die Aufnahmekonfiguration des UAV-Bildflugs beeinflussen. Damit unabdingbar verknüpft sind Einflussgrößen aus dem photogrammetrischen Prozess, hier insbesondere Kenntnisse zur Abbildungsqualität und Metrik des Sensors „digitale Kamera“.

Der Beitrag zeigt exemplarisch die Auswirkungen unterschiedlicher Bildflugparameter auf die Aufnahmekonfiguration sowie die hieraus resultierenden Ergebnisse. Der klassische Nadir-Flug hat auch für UAV-Bildverbände eine hohe Bedeutung. Allerdings wird deutlich, dass die Qualität der Bildorientierung durch Kombinationen mit Oblique-Aufnahmen gesteigert werden kann. Diese Effekte lassen sich sowohl mit Hilfe geometrischer Qualitätsparameter (RMSE-Werte), als auch durch die (hier vorgenommene) visuelle Interpretation der 3D-Punktwolken nachweisen.

Im Ergebnis wird deutlich, dass die Nutzung einer App zur Bildflugplanung allein nicht ausreichend ist, um ein wunschgemäßes Endprodukt zu erstellen. Vielmehr ist hier erweitertes Expertenwissen zum photogrammetrischen Gesamtprozess notwendig.

Literatur

- Cramer, M. (2001): Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 537, München. 122 S.
- DJI (2020a): Technische Daten Zenmuse X4S. www.dji.com/de/zenmuse-x4s/info, letzter Zugriff 01/2020.
- DJI (2020b): Technische Daten Zenmuse X7. www.dji.com/de/zenmuse-x7/info, letzter Zugriff 01/2020.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (1), 17–30.
- Glira, P., Briese, C., Pfeifer, N. (2013): Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, 101(2+3), 75–87. www.ovg.at/de/vgi/ausgabe/1270/#article5154, letzter Zugriff 12/2019.
- Lindstaedt, M., Kersten, T. (2018): Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 81–101.

- LWL (2019): Homepage des Industriemuseums Zeche Zollern. www.lwl.org/industriemuseum/standorte/zeche-zollern, letzter Zugriff 12/2019.
- Przybilla, H.-J., Bäumker, M., Vieten, J. (2018): Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 61–79.
- 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, 45–54.

Kontakt

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

Direkte Georeferenzierung von Bildverbänden: Zum Leistungsstand von UAV-Systemen mit integrierten RTK-Modulen

Christian Eling | Günter Münstermann

1 Einleitung

Seit den ersten Versuchen, unbemannte Fluggeräte (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) für geodätische Zwecke zu nutzen (z. B. Przybilla und Wester-Ebbinghaus 1979), hat sich sowohl in der Technik der Flugsysteme als auch im Bereich der Datenverarbeitung einiges getan. Dies hat in den letzten 5 bis 10 Jahren dazu geführt, dass UAVs in der Geodäsie deutlich an Bedeutung gewonnen haben. Ein Indikator für diese Entwicklung ist die zunehmende Präsenz von UAV-Systemen auf der INTERGEO, der Fachmesse für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, auf der die UAVs nun schon seit einigen Jahren mit einer eigenen Themenplattform (Interaerial Solutions) vertreten sind.

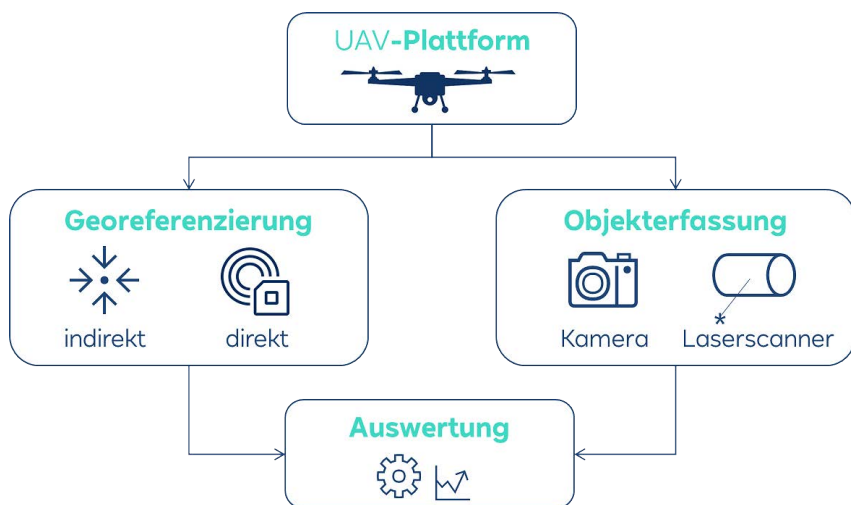


Abb. 1: Optionale Grundvoraussetzungen für die Vermessung mit UAVs

Die zunehmende Nachfrage nach UAV-Systemen zeigt sich allerdings nicht nur im Bereich der Geodäsie, sondern auch in vielen anderen Fachbereichen, in denen die Aufnahme von Daten aus der Luft Vorteile mit sich bringt. Beispiele hierfür sind die Nutzung von UAVs für Infrastruktur Inspektionen oder Search and Rescue Anwendungen.

Grundsätzlich basieren fast alle Anwendungen, bei denen eine berührungslose Objekterfassung mittels UAVs im Fokus steht, auf ähnlichen Grundbausteinen (Abb. 1). Das, was die Geodäsie dabei im Wesentlichen von den anderen Fachbereichen unterscheidet, ist die Qualität der Georeferenzierung, mit der die während eines Fluges aufgenommenen Daten in einem übergeordneten Koordinatensystem positioniert und orientiert werden.

Bei der Realisierung der Georeferenzierung von UAV-Daten muss grundsätzlich zwischen der indirekten und der direkten Georeferenzierung unterschieden werden. Während bei einer indirekten Georeferenzierung Passpunkte (Ground Control Points, GCPs) für die Herstellung eines übergeordneten Raumbezugs verwendet werden (siehe z. B. Eisenbeiss et al. 2005), erfolgt die 3D-Positions- und die 3D-Orientierungsbestimmung eines UAVs bei einer direkten Georeferenzierung über ein auf dem Fluggerät angebrachtes Multisensorsystem (z. B. Schwarz et al. 1993). Der Vorteil einer direkten gegenüber einer indirekten Georeferenzierung ist dabei, dass sie wesentlich effizienter und auch vollständig automatisierbar ist. Des Weiteren ist unter Verwendung einer direkten Georeferenzierung die Vermessung von unzugänglichen oder sogar gefährlichen Bereichen möglich.

Im weiteren Verlauf dieses Beitrags werden die Grundlagen zur Realisierung einer direkten Georeferenzierung von leichten UAVs näher beschrieben. Mit leichten UAVs sind dabei Fluggeräte mit einem Gesamtgewicht von weniger als 5 bis 10 kg gemeint. Diese Abgrenzung beinhaltet die in der Vermessung am häufigsten verwendeten UAV-Systeme.

Anhand eines Beispiels wird in diesem Beitrag abschließend darauf eingegangen, welche Ergebnisse mit einem relativ preiswerten, kommerziellen RTK-gestützten UAV-System erreicht werden können und welche Vorgehensweise dafür erfahrungsgemäß einzuhalten ist.

2 Direkte Georeferenzierung leichter UAVs

Die direkte Georeferenzierung eines UAVs umfasst grundsätzlich die Bestimmung der Position (z. B. X, Y, Z) und Orientierung (z. B. Roll-Winkel, Pitch-Winkel und Yaw-Winkel) eines UAVs und/oder der auf einem UAV angebrachten objekterfassenden Sensorik relativ zur Erde, in einem definierten Koordinatensystem und unter Verwendung eines onboard Multisensorsystems.

2.1 Direkte Georeferenzierung mit Multisensorsystemen

Die Aufgabe der Realisierung einer direkten Georeferenzierung mobiler Objekte unter Verwendung von onboard Sensorik ist im Grunde nicht neu. Zum Beispiel werden im Bereich der Luftbildphotogrammetrie mit bemannten Flugzeugen oder Helikoptern schon seit Jahrzehnten GNSS (Global Navigation Satellite System)-Empfänger und Inertialsensoren (Beschleunigungssensoren/Akzelerometer und Drehratensensoren/Gyroskope) zur Georeferenzierung aufgenommener Luftbilder verwendet (Schwarz et al. 1993, Cramer 2001). Das Konzept unterscheidet sich dabei kaum von dem, was auch auf bodengebundenen Mobile-Mapping-Systemen, wie z. B. Autos, Schiffen oder Zügen, angewandt wird, wobei hier zum Teil weitere plattformabhängige Sensoren (z. B. Odometer) zum Einsatz kommen können (El-Sheimy 2005).

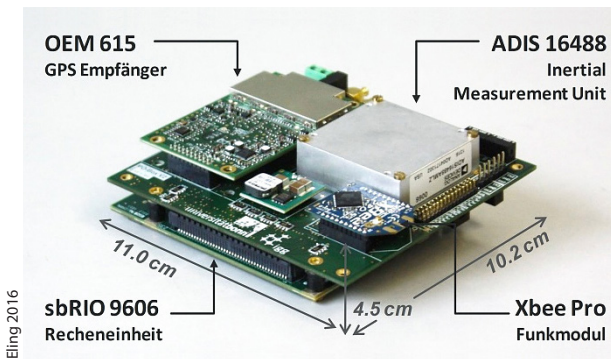


Abb. 2:

Kleines und leichtes
Multisensorsystem zur
hochgenauen direkten
Georeferenzierung
leichter UAVs in Echt-
zeit

Nichtsdestotrotz sind sowohl die aus den Airborne- als auch die aus bodengebundenen Mobile-Mapping-Anwendungen bekannten Systeme für die direkte Georeferenzierung leichter UAVs nicht ohne weiteres adaptierbar. Gründe dafür ergeben sich speziell aus Gewichts-, Platz- und Stromversorgungslimitationen, die insbesondere bei UAVs zu erheblichen Restriktionen bezüglich der einsetzbaren Sensorik führen. Dies betrifft vor allem die Wahl der Inertialsensoren, die sowohl für die Positions- als auch die Orientierungsbestimmung von enormer Bedeutung sind. Während bei Flugzeugen, Schiffen und Autos hochwertige Faseroptische- oder Ring-Laser-Kreisel zum Einsatz kommen, sind für UAVs ausschließlich kleine und leichte auf MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)-Technologien basierende Inertialsensoren verwendbar. Aufgrund temperatur- und zeitabhängiger Abweichungen liefern diese jedoch nur für kurze Zeit stabile Ergebnisse, wenn sie nicht mit anderen Sensoren, wie beispielsweise GNSS- oder Magnetfeldsensoren, kombiniert werden (El-Sheimy und Niu 2007).

Die Herausforderung bei der Entwicklung eines Multisensorsystems zur hochgenauen direkten Georeferenzierung (Position: < 5 cm, Orientierung: $< 0,5$ deg) leichter UAVs besteht deshalb darin, kleine und leichte Sensoren über eine geeignete Sensorintegration so miteinander zu kombinieren, dass sie trotz ihrer jeweiligen Limitationen auch unabhängig von den Umgebungsbedingungen (z. B. schwierige GNSS-Bedingungen) durchgehend hochgenaue Ergebnisse liefern (Eling 2016). In Abb. 2 ist ein solches System dargestellt. Diese Georeferenzierungseinheit wurde im Rahmen eines Projektes namens *Mapping on Demand* an der Universität Bonn entwickelt (Klingbeil et al. 2014).

Die Frage ist jedoch, ob eine solche, hochgenaue, direkte Georeferenzierung für die Vermessung mit leichten UAVs überhaupt standardmäßig benötigt wird oder ob es nicht auch einfacher geht?

2.2 Direkte Georeferenzierung vs. GNSS-gestützte Aerotriangulation

In Anbetracht der oben genannten Herausforderungen bei der direkten Georeferenzierung leichter UAVs, ist eine Differenzierung verschiedener Anwendungen in Abhängigkeit der jeweiligen Zielsetzung der Georeferenzierung sinnvoll:

1. Für die Flugplanung, Navigation und Steuerung eines UAVs ist eine vollständige direkte Georeferenzierung (Positions- und Orientierungsbestimmung) in einem übergeordneten Koordinatensystem notwendig. Dies gilt insbesondere, wenn die Flüge des UAVs, wie so häufig in geodätischen Anwendungen, automatisiert ablaufen sollen. Da für die Navigation eines UAVs meist jedoch lediglich Genauigkeiten in einer Größenordnung von 1 bis 20 m und 0,5 bis 10 deg in der Positions- und Orientierungsbestimmung erforderlich sind, werden hier weniger hohe Anforderungen an die Genauigkeit als an die Zuverlässigkeit der Hardware gestellt. Die hier einsetzbare Sensorik (Low-Cost MEMS-Inertialsensoren, Magnetfeldsensoren und ein L1 C/A-Code GPS-Chip) ist kostengünstig und deren Integration vielfach erprobt. Dementsprechend werden UAVs schon seit einigen Jahren standardmäßig mit dieser Art der direkten Georeferenzierung ausgestattet (z. B. Yoo und Ahn 2003).
2. Für die hochgenaue Vermessung (cm-Genauigkeit) mit UAVs muss zwischen zwei Anwendungen unterschieden werden:
 - (i) Für den Fall, dass eine Echtzeitfähigkeit des Systems erforderlich ist, was bedeutet, dass die Vermessung mit dem UAV bereits während des Fluges realisiert werden muss (Klingbeil et al. 2015), oder als objekterfassender Sensor ein Laserscanner verwendet wird (Gaisecker 2015), ist eine hochgenaue direkte Georeferenzierung (Positions- und Orientierungsbestimmung) wie oben beschrieben (Abschnitt 2.1) erforderlich.

- (ii) Wird als objekterfassender Sensor eine Digitalkamera verwendet, erfolgt die Bildauswertung meist mittels einer Bündelblockausgleichung (Aerotriangulation) im Postprocessing. Dabei wird die gegenseitige Orientierung der Bilder in der Regel rein aus der Bildinformation abgeleitet. Der gesamte Bildverbund kann anschließend auf den RTK-GNSS-Positionen der Kamera gelagert werden. Da es sich dabei um keine vollständige direkte Georeferenzierung, sondern lediglich um die Verwendung der Positionsbestimmung einer direkten Georeferenzierung handelt, wird diese Art der Georeferenzierung auch als GNSS-gestützte Aerotriangulation bezeichnet. Die hohen Genauigkeiten in der Georeferenzierung werden dabei durch die onboard Verwendung eines RTK (Real Time Kinematic)-GNSS-Moduls realisiert. Gleichzeitig wird für die Flugplanung, Navigation und Steuerung eine Low-Cost-Georeferenzierungseinheit, wie unter Punkt (1) beschrieben, verwendet.

2.3 Zeitliche Synchronisierung und räumliche Kalibrierung

Sowohl für eine direkte Georeferenzierung als auch eine GNSS-gestützte Aerotriangulation sind neben den oben genannten Anforderungen zusätzlich eine zeitliche Synchronisierung und eine räumliche Kalibrierung der Sensorik notwendig.

2.3.1 Zeitliche Synchronisierung

Die zeitliche Synchronisierung beinhaltet dabei die Berücksichtigung möglicher Latenzzeiten zwischen der georeferenzierenden und der objekterfassenden Sensorik. Diese Latenzzeiten ergeben sich bei einer GNSS-gestützten Aerotriangulation beispielsweise dadurch, dass die Kamera (objekterfassender Sensor) nicht zeitgleich mit der Messung des RTK-GNSS-Moduls (georeferenzierender Sensor) auslöst. Dass diese Latenzzeiten nicht zu vernachlässigen sind, wird an folgendem Beispiel deutlich:

Bei einer Fluggeschwindigkeit von lediglich 3 m/s mit einem rotorbetriebenen UAV und einer Latenzzeit von 0,05 sek würde sich bereits eine Abweichung von 15 cm aus einer fehlenden zeitlichen Synchronisierung ergeben. Bei Starrflüglern, die deutlich schneller fliegen (z. B. 50 km/h), führt eine Latenzzeit von 0,05 sek schnell zu Abweichungen von 0,5 bis 1 m in der Georeferenzierung.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Varianten eine zeitliche Synchronisierung zu realisieren. Für die Nutzung einer Digitalkamera als objekterfassenden Sensor sind im Grunde zwei Optionen denkbar:

- a) Die Kamera wird durch die Georeferenzierungseinheit getriggert, so dass zu einem vorgegebenen Zeitpunkt ein Foto ausgelöst wird. Dies kann z. B. über einen Fernauslöser realisiert werden.
- b) Die Kamera sendet zum Zeitpunkt der Belichtung einen Hardwareimpuls (elektrisches Signal) an die Georeferenzierungseinheit, an der dann pro Bild ein Zeitstempel abgespeichert wird.

Die Variante a) ist im ersten Moment oftmals leichter umzusetzen, hat aber den Nachteil, dass der Zeitpunkt, an dem ein Foto ausgelöst wird oftmals nicht mit dem Belichtungszeitpunkt übereinstimmt (Rehak et al. 2014).

Ein Beispiel für die Umsetzung der Variante b) ist in (Eling et al. 2015) zu finden. Dabei wurde auf der Platine einer Panasonic Lumix GX1 Kamera mittels eines zusätzlichen Kabels das Signal des Belichtungsvorhangs (Shutters) der Kamera abgegriffen. Damit konnte der Beginn der Belichtung des jeweiligen Fotos eindeutig definiert werden. Mit Hilfe eines eigens entwickelten Messsystems, bestehend aus einem zeitdeterministischen LED Array, wurde anschließend die restliche Latenzzeit, die sich aufgrund des Schließvorgangs des Shutters und der Signalübertragung ergibt, gemessen (Abb. 3). Dieser Restbetrag von ca. 3 ms konnte dann für weitere Messungen als Offset angebracht werden.

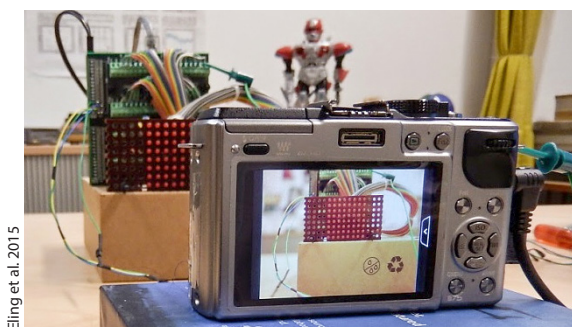


Abb. 3:
Messung von Latenzzeiten zwischen dem gemessenen und tatsächlichen Belichtungszeitpunkt während der Bildaufnahme mit einer Kamera

Insgesamt ist die Schwierigkeit der Realisierung einer zuverlässigen zeitlichen Synchronisierung ein wesentlicher Grund dafür, dass es trotz vieler früherer Entwicklungen (z. B. Bäumker et al. 2013, Rehak et al. 2014, Eling et al. 2015) dann doch relativ lange gedauert hat, bis die ersten zuverlässigen RTK-fähigen UAV-Systeme kommerziell erworben werden konnten.

Insbesondere die Schwierigkeit eine beliebige Consumer-Kamera zeitlich mit einer onboard Georeferenzierungseinheit zu synchronisieren, hat in der Vergangenheit häufig dazu geführt, dass auch die technisch relativ simple Einbindung eines RTK-GNSS-Moduls auf einem UAV nicht den gewünschten Erfolg in der Genauigkeit der Georeferenzierung mit sich gebracht hat.

2.3.2 Räumliche Kalibrierung

Die räumliche Kalibrierung beinhaltet die Bestimmung des Hebelarms und der Rotationswinkel zwischen der georeferenzierenden und der objekterfassenden Sensorik. Diese Informationen müssen im körperfesten Koordinatensystem des UAVs bestimmt und je nach Orientierung des UAVs im übergeordneten Koordinatensystem angebracht werden. Da die objekterfassende Sensorik aufgrund einer möglichst guten Sichtbarkeit des zu vermessenden Objektes meist exzentrisch zur georeferenzierenden Sensorik montiert wird, ist die räumliche Kalibrierung zwingend zu berücksichtigen, wenn Genauigkeiten im geringen cm-Bereich angestrebt werden.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Varianten zur Bestimmung der räumlichen Kalibrierparameter, wie z. B. die Schätzung der Parameter aus Bildflugdaten über einem Testpunktfeld (siehe z. B. Eling et al. 2015) oder die Messungen mit einem Messarm (siehe z. B. Eling et al. 2014). Auf die verschiedenen Varianten und die genauen Vorgehensweisen soll hier jedoch nicht im Detail eingegangen werden.

3 Vergleich zweier RTK-fähiger UAV-Systeme

Mittlerweile gibt es einige Anbieter auf dem Markt, die UAVs mit RTK-Modulen für die Realisierung einer GNSS-gestützten Aerotriangulation ausstatten. Die Preise für diese Systeme liegen dabei teilweise weit auseinander. In [Abb. 4](#) sind beispielhaft zwei häufig verwendete Systeme dargestellt. Dies sind die DJI Phantom 4 RTK und der Aibot von Leica Geosystems.

Während das in [Abb. 4](#) dargestellte RTK-fähige UAV von DJI, mit der Phantom 4 Plattform, technologisch eher aus dem Freizeitsegment kommt und der Preis für dieses vermessungstaugliche System mit ca. 6000 Euro ohne



Abb. 4: Darstellung zweier häufig verwendeter UAV-Systeme, die mit RTK-Modulen ausgestattet sind. Links: DJI Phantom 4 RTK. Rechts: Leica Geosystems Aibot.

Zusatzequipment (wie z. B. eine GNSS-Referenzstation) vergleichsweise gering ausfällt, wird mit dem Aibot von Leica Geosystems ein reines Vermessungssystem angeboten. Dieses System ist zwar mit gewohnter Leica RTK-GNSS-Technologie und einem vollständigen Auswerte-Workflow ausgestattet, weist dafür aber auch einen stolzen Preis von über 20.000 Euro auf.

Bei DJI werden die RTK-fähigen UAVs, wie beispielsweise die Phantom 4 und die Matrice 210 mit DJI-eigenen Kameras (z. B. Zenmuse X4S) angeboten, wohingegen beim Leica Aibot zwei Sony-Kameras (Sony α6300, Sony α7RII) einsetzbar sind (Leica 2019). Die UAV-Plattform des Leica Aibot, die übrigens auch aus dem Hause DJI stammt (DJI Matrice 600 Pro), weist mit über 11 kg ein deutlich höheres Gewicht als die DJI Phantom 4 RTK auf, bietet mit einem max. Payload von 4,3 kg aber auch mehr Flexibilität beim Einsatz weiterer Sensoren.

Für die Flugplanung werden in beiden Fällen eigene vom Hersteller entwickelte Apps zur Verfügung gestellt. Die photogrammetrische Auswertung, der während eines Fluges gesammelten Daten, können beim Leica Aibot mit einer Leica-eigenen Software (Leica Infinity) ausgewertet werden, wobei hier auch die direkte Integration weiterer Daten, wie z. B. terrestrischer Messungen, möglich ist. DJI bietet derzeit keine eigene Auswertesoftware an, demnach muss unter Nutzung der DJI Phantom 4 RTK auf eines der mittlerweile etablierten Softwarepakete wie z. B. Agisoft Metashape (www.agisoft.com) oder Pix4D (www.pix4d.com) zurückgegriffen werden.

4 Praxisbeispiel: RTK-GPS-gestützte Aerotriangulation

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, sind die Preisunterschiede zwischen verschiedenen RTK-fähigen UAV-Systemen sehr groß. Eine Frage, die sich in Anbetracht dieser Preisunterschiede stellt, ist, ob eine vergleichsweise günstige Variante dieser UAVs geodätischen Ansprüchen genügt und cm-Genauigkeiten in den Messergebnissen von UAV-Befliegungen liefert, auch wenn dabei keine Passpunkte zum Einsatz kommen.

Um diese Frage zu beantworten, wurde das UAV-System DJI Phantom 4 RTK von der Markscheiderei der RWE Power AG im Rahmen des Rückbaus einer ehemaligen Tiefbaugrube im Tagebau Hambach im Rheinischen Braunkohlenrevier getestet. Ziel der UAV-Aufmäße waren dabei im Wesentlichen Massenermittlungen, die nach mehreren Rückbauschritten zur Abrechnung fremdvergebener Arbeiten benötigt wurden.

Die Schachtanlage Union 103 ist ein ehemaliges Braunkohlenbergwerk bei Morschenich im Kreis Düren, das zwischen 1950 und 1955 bestand. In mehr als 300 m Tiefe wurde dort für wenige Jahre Braunkohle abgebaut, bevor der Betrieb aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit wieder eingestellt werden musste.

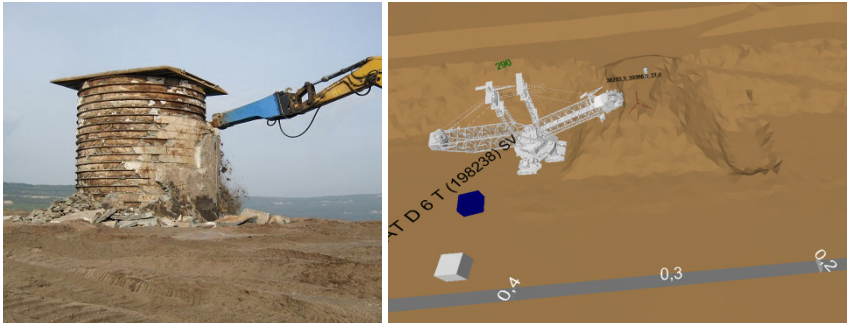


Abb. 5: Rückbau der Schachtanlage Union 103 im Tagebau Hambach. Links: Abrissarbeiten mit einem Hilfsgerät. Rechts: Schaubild zur Aufnahme der umliegenden Erdmassen mit einem Schaufelradbagger.

Heute liegt die ehemalige Schachtanlage im Abbaufeld des Tagebaus Hambach. Dort müssen die Schächte mit dem fortschreitenden Tagebaubetrieb Stück für Stück rückgebaut werden, um die Materialien getrennt nach Beton, Stahl und Holz zu entsorgen.

Der Rückbau der vertikalen Schachtanlagen steht jeweils dann an, wenn eine Tagebausohle auf einen der Schächte aufläuft. Zu Beginn des Rückbaus legt ein Schaufelradbagger die Schächte dann zunächst möglichst gut frei (**Abb. 5**). Anschließend werden die Schächte von kleineren Hilfsgeräten entsprechend ihrer Reichweite sukzessive bis auf die darunterliegende Tagebausohle zurückgebaut. Zwischendurch müssen die einzelnen Rückbauabschnitte des Schachtes dabei immer wieder freigelegt werden. Dies wird durch Kettenraupen realisiert, die die umliegenden Erdmassen in Richtung der Tagebauböschung schieben (**Abb. 6**). Die abgeschobenen Erdmassen werden dann vom Schaufelradbagger aufgenommen. Ziel der UAV-Befliegungen ist es unter anderem, die während des Rückbauprozesses durch eine Fremdfirma bewegten Volumen, zu ermitteln.

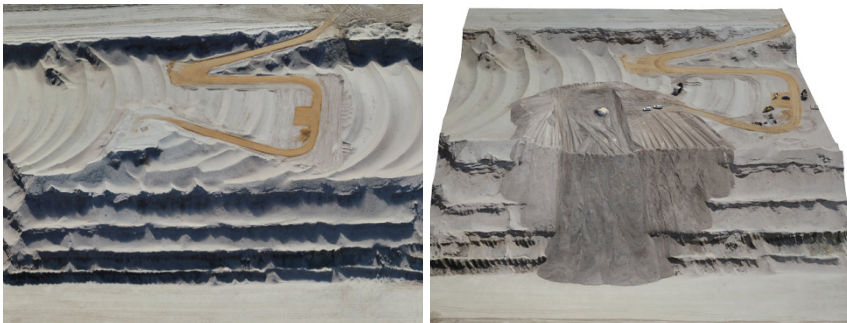


Abb. 6: 3D-Modelle, resultierend aus UAV-Befliegungen, die den Rückbaufortschritt zeigen.

Das hier vorliegende Beispiel eignet sich hervorragend für die Motivation des Einsatzes eines RTK-fähigen UAVs. Grund dafür ist, dass der zu vermessende Bereich mit mehreren Tagebausohlen und den dazwischen liegende Böschungen sehr groß ist. Sowohl im Falle einer terrestrischen Vermessung als auch bei der Realisierung einer indirekten Georeferenzierung, wäre hier mit einem sehr hohen Aufwand zu rechnen. Die Geländestruktur ist nur schwer zugänglich und kaum einsehbar. Die Böschungsbereiche dürfen aus Arbeitssicherheitsgründen zudem nicht betreten werden. Des Weiteren muss die Vermessung je nach Einsatzplanung des Schaufelradbaggers auf Abruf sehr schnell erfolgen, so dass in der Regel nur wenig Zeit für Vorbereitungen besteht. Durch die Nutzung eines RTK-fähigen UAVs, kann der Vermessungsprozess demnach sowohl zur Reduzierung des Aufwandes bei der Passpunktbestimmung als auch aus Gründen des Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsgewinns deutlich verbessert werden.

4.1 Messablauf

Da die Vermessungsarbeiten an der Schachtanlage Union 103 wiederkehrende Tätigkeiten sind, wurde der Einsatz eines RTK-fähigen UAVs hier zunächst getestet, um eine Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen zu schaffen. Die Flüge wurden dabei alle mit der DJI Phantom 4 RTK durchgeführt, wobei zusätzlich Passpunkte als Backup, vor allem aber zur Prüfung der erreichbaren Genauigkeiten ausgelegt und eingemessen wurden.

Insgesamt wurden 8 Befliegungen durchgeführt, jeweils 4 vor dem Rückbaubeginn und 4 vor den Einsätzen des Schaufelradbaggers (4 Volumenberechnungen). Als Flughöhe wurde maximal mit ca. 100 m über dem tiefsten Punkt gearbeitet. Dies entspricht unter Nutzung der Phantom 4 RTK mit integrierter Kamera einer Bodenauflösung von ca. 2,9 cm/px. Als Korrekturdienst zur Realisierung der RTK-Fähigkeit des UAVs wurde SAPOS NRW (www.sapos.nrw.de) als hochpräzise Echtzeitanwendung verwendet. Pro Befliegung wurden zwischen 684 und 2121 Bilder aufgenommen. Dabei wurden folgende Fluganordnungen berücksichtigt:

- Hohe Längs- und Querüberdeckung (mind. 80 % Längs- und 60 % Querüberdeckung)
- Flug in mind. zwei verschiedenen Ebenen (Flughöhen über Grund)
- Bildaufnahme im Kreuzverbund
- Zusätzliche Aufnahme von Schrägbildern (Oblique), mit einer Kameraneigung von ca. 30° relativ zur Nadir-Richtung

Zur Evaluierung der mit dem RTK-UAV erreichbaren Genauigkeiten wurden für die erste Befliegung 9 und für die weiteren Befliegungen anschließend 8 und

7 Punkte am Boden signalisiert und eingemessen. In der Auswertung dienten diese Punkte dann als Kontrollpunkte. Dies bedeutet, dass die terrestrisch gemessenen Koordinaten der signalisierten Punkte nicht in die UAV-Auswertung mit eingeflossen sind, sondern lediglich als Vergleichswerte herangezogen wurden. Die Auswertung der mit dem UAV aufgenommenen Daten, wurde mit der Software Agisoft Metashape im ETRS89-Koordinatensystem vorgenommen.

4.2 Messergebnisse

In Abb. 7 sind die Verteilung der Passpunkte und die jeweiligen Differenzen zwischen den Koordinaten der UAV-Befliegung und des terrestrischen Aufmaßes über dem aufgenommenen Gelände zu sehen. Ohne dabei auf die Größenordnung der Abweichungen einzugehen, wird deutlich, dass die maximalen Abweichungen am Punkt 3 liegen und es eine ganz leichte Systematik in Richtung der Punkte 1, 2 und 3 gibt. Aufgrund der geringen Größenordnung ist diese Systematik allerdings zu vernachlässigen.

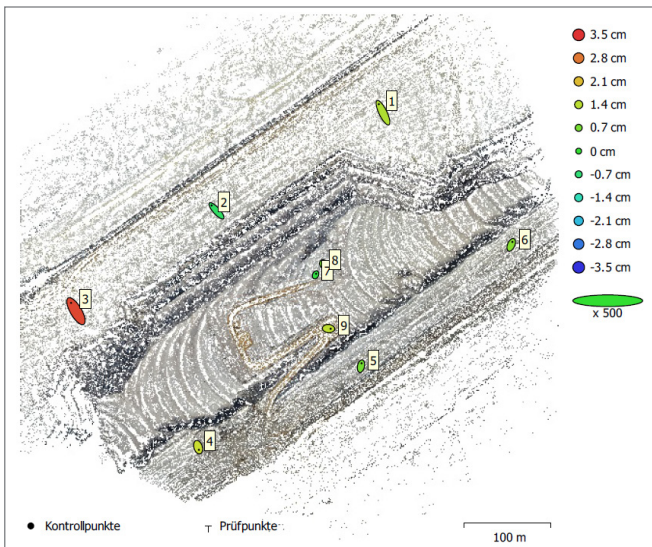


Abb. 7:
Abweichungen zwischen den terrestrisch und mit dem UAV gemessenen Koordinaten der Kontrollpunkte

Die genauen Abweichungen der einzelnen Kontrollpunkte sind in Tab. 1 dargestellt. Die maximale Abweichung liegt hier, wie auch in Abb. 7 erkenntlich, am Punkt 3 vor. Dabei handelt es sich um eine Gesamtabweichung von 5,5 cm, die sich auf die Lage- und Höhenkomponenten nahezu gleichmäßig verteilt. Insgesamt liegt die mittlere Abweichung an den Kontrollpunkten bei 2,9 cm.

Tab. 1: Darstellung der einzelnen Abweichungen an den Kontrollpunkten nach Auswertung der Daten des ersten Fluges mit Agisoft Metashape

Name	Fehler X (cm)	Fehler Y (cm)	Fehler Z (cm)	Gesamt (cm)	Bild (pix)
1	-1.91647	3.94616	1.28324	4.57075	0.354 (88)
2	-2.2261	2.46808	-0.502708	3.36149	0.373 (103)
3	-2.24746	3.82886	3.27927	5.5195	0.417 (62)
4	0.363095	-1.21653	1.54509	1.99977	0.470 (36)
5	0.282317	1.33177	0.668337	1.51657	0.774 (44)
6	0.563273	1.32497	0.852333	1.67311	0.750 (32)
7	0.229163	0.508274	-0.17079	0.583119	0.640 (129)
8	-0.104044	0.362263	0.755565	0.844356	0.478 (99)
9	0.970747	-0.0774456	1.43506	1.73428	0.466 (102)
Gesamt	1.30017	2.15325	1.4481	2.9024	0.517

X – Länge, Y – Breite, Z – Höhe

Tab. 2: Zusammenfassung der Abweichungen an den Kontrollpunkten für vier UAV-Befliegungen im April und Mai 2019

Datum	Kontrollpunkte	Mittel (cm)	Max. (cm)	Flughöhe (m)	Anzahl Bilder
18.04.	9	2,9	5,5	100	1197
14.05.	8	2,4	3,6	64	1224
16.05.	8	2,1	4,1	65	2121
24.05.	7	2,8	3,9	50	684

Auch die Zusammenfassung der Ergebnisse von vier durchgeführten Befliegungen (Tab. 2) zeigt ein ähnliches Bild wie im oben dargestellten Flug. In allen vier Flügen liegen die maximalen Abweichungen unter 5,5 cm. Die mittlere Abweichung streut in einem Bereich zwischen 2,1 bis 2,9 cm, unabhängig von der Flughöhe und der Anzahl der aufgenommenen Bilder. Dies genügt vollkommen den hier geforderten Genauigkeiten und ist damit ein voller Erfolg.

5 Zusammenfassung

Nach einer Erläuterung und Zusammenfassung der wichtigsten Voraussetzungen für die Realisierung einer direkten Georeferenzierung leichter UAVs, lag der weitere Fokus dieses Beitrags auf der Evaluierung eines kostengünstigen RTK-fähigen UAV-Systems im Praxiseinsatz.

Anhand eines umfangreichen Beispiels wurden die Praxistauglichkeit und die erreichbaren Genauigkeiten des Systems DJI Phantom 4 RTK geprüft. Dabei hat sich gezeigt, dass die gewünschten Genauigkeiten von wenigen Zentimetern an signalisierten Kontrollpunkten erreichbar sind, wenn folgende Vorgehensweise beachtet wird:

- Hohe Längs- und Querüberdeckung in der Bildaufnahme
- Kreuzbefliegung in mind. zwei Flugebenen
- Aufnahme von Senkrecht- und Schrägbildern
- Verwendung von mind. einem Kontrollpunkt

Insbesondere die zusätzliche Verwendung von Kontrollpunkten ist stets zu berücksichtigen, um die Qualität der Ergebnisse im Sinne der Zuverlässigkeit auch dann prüfen zu können, wenn keine Passpunkte genutzt werden sollen. Die Erfahrungen der bisher durchgeführten Tests haben zudem gezeigt, dass die Ergänzung der üblichen Senkrechtaufnahmen mit Schrägbildern zwingend erforderlich ist, um in der Bildauswertung auch ohne die Verwendung von Passpunkten eine zuverlässige Trennung der geschätzten Kamerakonstante von der Höhenkomponenten zu ermöglichen.

Insgesamt ist der Einsatz des DJI Phantom 4 RTK Systems bei der RWE Power AG bisher als ein voller Erfolg zu werten. Neben der Reduktion des Aufwandes, der durch eine Passpunkterstellung sonst anfallen würde, ist durch die Nutzung der onboard RTK-Positionen auch eine Steigerung in der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erkennen. Des Weiteren sind mit dem RTK-fähigen UAV nun auch Befliegungen von Bereichen möglich, die aus sicherheitsrelevanten Gründen nicht betreten werden dürfen.

Literatur

- Bäumker, M., Przybilla, H.-J., Zurhorst, A. (2013): Enhancements in UAV Flight Control and Sensor Orientation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W2, 33–38. DOI: [10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-33-2013](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-33-2013).
- Cramer, M. (2001): Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie. Dissertation, Universität Stuttgart. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 537, München.
- DJI (2019): Phantom 4 RTK. www.dji.com/de/phantom-4-rtk, letzter Zugriff 12/2019.

- Eisenbeiss, H., Lambers, K., Sauerbier, M. (2005): Photogrammetric recording of the archaeological site of pinchango alto (palpa, peru) using a mini helicopter (UAV). The World is in your eyes – Proceedings of the 33rd CAA Conference, 175–184.
- Eling, C. (2016): Entwicklung einer direkten Georeferenzierungseinheit zur Positions- und Orientierungsbestimmung leichter UAVs in Echtzeit. Dissertation, Universität Bonn. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 788, München.
- Eling, C., Klingbeil, L., Wieland, M., Kuhlmann, H. (2014): Direct georeferencing of micro aerial vehicles – system design, calibration and first evaluation tests. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (4), 227–237.
- Eling, C., Wieland, M., Hess, C., Klingbeil, L. (2015): Development and evaluation of a UAV-based mobile mapping system for remote sensing and surveying applications. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-1/W4, 233–239. DOI: [10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-233-2015](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-233-2015).
- El-Sheimy, N. (2005): An overview of mobile mapping systems. FIG Working Week 2005 and GSDI-8. Kairo, Ägypten. <https://pdfs.semanticscholar.org/9c42/64840c4038e5e17a27140b54aa98af19aa43.pdf>, letzter Zugriff 01/2020.
- El-Sheimy, N., Niu, X. (2007): The promise of MEMS to the navigation community. Inside GNSS, March/April Issue, 45–56.
- Gaisecker, T. (2015): Hochpräzises Laserscanning für UAS/RPAS Anwendungen. Internationale Geodätische Woche 2015, Obergurgl, VDE Verlag, Berlin, 239–249.
- Klingbeil, L., Nieuwenhuisen, M., Schneider, J., Eling, C., Droschel, D., Holz, D., Läbe, T., Förstner, W., Behnke, S., Kuhlmann, H. (2014): Towards autonomous navigation of an UAV-based mobile mapping system. 4th International Conference on Machine Control & Guidance, Braunschweig, 136–148.
- Leica (2019): Leica Aibot – Plattform zur Erfassung von Luftbilddaten. <https://leica-geosystems.com/de-de/products/uav-systems/copter>, letzter Zugriff 12/2019.
- Przybilla, H.-J., Wester-Ebbinghaus, W. (1979): Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. Bildmessung und Luftbildwesen 47, 137–142.
- Rehak, M., Mabillard, R., Skaloud, J. (2014): A micro aerial vehicle with precise position and attitude sensors. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (4), 239–251.
- Schwarz, K.-P., Chapman, M., Cannon, M., Gong, P. (1993): An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 59(11), 1667–1674.
- Yoo, C. S., Ahn, I. K. (2003): Low-cost GPS/INS sensor fusion system for UAV navigation. 22nd Digital Avionics Systems Conference, Vol. 2, 8.A.1-1 – 8.A.1-9.

Kontakt

Christian Eling | Günter Münstermann
RWE Power AG
Zum Gut Bohlendorf, 50126 Bergheim
christian.eling@rwe.com | guenter.muenstermann@rwe.com

SFM & DIM: Alles schon erfunden?

Norbert Haala

1 Einleitung

Photogrammetrisch Messverfahren blicken auf eine sehr lange Historie zurück. Die Ursprünge der Photogrammetrie liegen in der Mitte des 19. Jahrhunderts, das Verfahren der Aerotriangulation existiert seit den 1950er Jahren und die Nutzung direkt gemessener Kamerastandpunkte für die integrierte Bündelblockausgleichung setzte sich bereits bald nach dem Aufkommen von GPS durch. Während lange Zeit vor allem die Auswertung von Luftbildern im Vordergrund stand, hat sich die photogrammetrische Datenerfassung in großer Breite jedoch erst mit der Verfügbarkeit der robusten Verfahren des Structure-from-Motion und der dichten Mehrbild-Stereo-Zuordnung (Dense Image Matching, DIM) durchgesetzt. Mit dem nahezu zeitgleichen Aufkommen von UAV als preiswerte und einfach zu nutzende Flugplattformen lassen sich Digitale Oberflächenmodelle und darauf aufbauend digitale Orthophotos „auf Knopfdruck“ auch für kleinere Bereiche kostengünstig erstellen. Als zusätzliches Produkt lassen sich dichte, dreidimensionale Punktwolken mittels SfM und DIM bildbasiert und damit in der Regel erheblich flexibler und kostengünstiger als mittels LiDAR erfasst werden. Ausgehend von der Frage, ob mit dieser dichten, genauen und zuverlässigen Erfassung der Objektgeometrie alle Ziele der photogrammetrischen Datenerfassung gelöst sind, gibt dieser Beitrag zunächst einen kurzen Überblick zur Georeferenzierung bildbasierten Sensoren mittels Structure-from-Motion und stellt dann die Vor- und Nachteile der dichten geometrischen bildbasierten Datenerfassung mittel Multi-View-Stereo der LiDAR-basierten Erfassung gegenüber.

Dabei zeigt sich das Potenzial einer integrierten Erfassung mittels Kamera und LiDAR-Sensor für die Erfassung qualitativ sehr hochwertiger Punktwolken. Diese integrierte Datenerfassung erfordert jedoch eine pixelgenaue Koregistrierung und bedingt somit eine relativ anspruchsvolle Orientierung der einzelnen Sensoren. Zusätzlich zur geometrischen Datenerfassung sind integrierte Punktwolken auch von Vorteil bei einer semantischen Analyse bei der beispielsweise eine Unterteilung in verschiedene Klassen erfolgt. Dies wird beispielhaft im abschließenden Kapitel vorgestellt.

2 Structure-from-Motion zur Luftbildauswertung

Ausgehend von sich überdeckenden Bildern berechnet Structure-from-Motion (SfM) die Parameter der inneren und äußeren Orientierung für die jeweiligen Aufnahmen (Schönberger und Frahm 2016). Zusätzlich werden die 3D-Koordinaten identischer Punkte bestimmt, die als Beobachtungsgrößen zur Berechnung dieser Parameter dienen. SfM kann in die drei Schritte: erstens Suche nach Korrespondenzen, zweitens Näherungswertberechnung für Kameraparameter und Objektpunktkoordinaten und drittens Bündelblockausgleichung zur Bestimmung des globalen Optimums unterteilt werden. Eng verknüpft mit dem Erfolg von SfM ist auch die Erfindung der SIFT-Punktextraktion und Zuordnung (Lowe 2004), die in der Regel eine sehr robuste Bestimmung von Verknüpfungspunkten ermöglicht.



Abb. 1: Automatisch bestimmte Verknüpfungspunkte für unterschiedliche Landnutzungsarten

Wie [Abb. 1](#) zeigt, berechnet das Verfahren lediglich auf Wasserflächen keine Verknüpfungspunkte – aufgrund der Oberflächenbewegung ist dort grundsätzlich keine Bildzuordnung für unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte möglich. Jedoch werden auch für „schwierige“ Oberflächen wie Feldfrüchte, bei denen die sich wiederholenden Strukturen eine eindeutige Zuordnung erschweren, Punkte in ausreichender Zahl und Qualität zugeordnet. Ohne größere Probleme erfolgt auch die Bereitstellung von Verknüpfungspunkten in bebauten Gebieten. Basierend auf solche Verknüpfungspunkten kann somit die Rekonstruktion der Aufnahmeparameter in einer Genauigkeit erfolgen, die anschließend eine (sub-)pixelgenaue photogrammetrische Punktbestimmung ermöglicht. Probleme können trotz der großen Robustheit der SIFT-Punktzuordnung gegenüber radiometrischen und geometrischen Veränderungen bei der Verknüpfung von Schrägbildaufnahmen auftreten (Gerke et al. 2016, Rupnik et al. 2014).



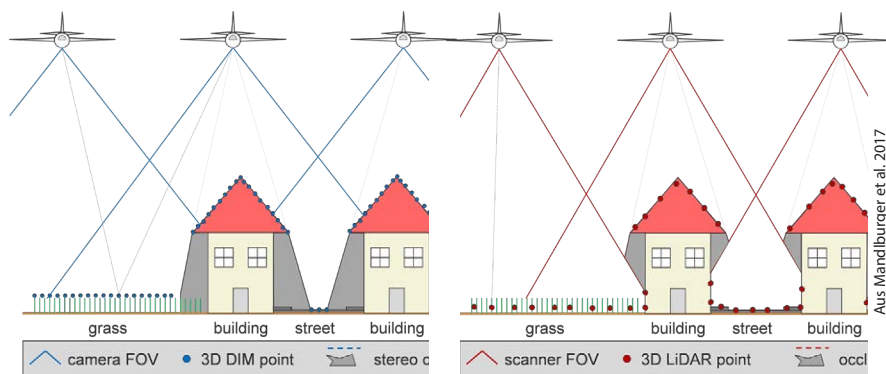
Abb. 2: Bildausschnitt Nadir- und Oblique-Aufnahme

Die automatische Bestimmung von Verknüpfungspunkten insbesondere zwischen unterschiedlichen Blickrichtungen ist erheblich komplexer als in Nadir-Luftbildblöcken wie Abb. 2 exemplarisch zeigt. Zwar sind Punkte auf senkrechten Flächen gut sichtbar, deren Zuordnung erfordert jedoch die Berücksichtigung von Verzeichnungen und Verdeckungen. Eine Möglichkeit, trotz starker Blickrichtungsunterschiede dennoch eine Zuordnung zu ermöglichen ist die Entzerrung der Bilder auf eine gemeinsame Ebene (Hüttel 2017).

3 Dichte 3D-Punktwolken aus LiDAR und MVS

Orientierungsparameter, wie sie mittels SfM bereitgestellt werden dienen insbesondere als Eingangsgrößen zur dichten Mehrbild-Stereozuordnung für die Erfassung dichter 3D-Punktwolken. Dreidimensionale Punktwolken haben sich zu einem Standardprodukt der photogrammetrischen Datenerfassung entwickelt. Obwohl die bildbasierte 3D-Rekonstruktion eine klassische Aufgabe der photogrammetrischen Computer Vision darstellt, stehen ausgereifte, auf pixelweiser Mehrbild-Stereozuordnung basierende Softwarewerkzeuge erst seit wenigen Jahren zur Verfügung (Hirschmüller 2008, Rothermel et al. 2012). Eine solche dichte Mehrbild-Stereozuordnung (Multi-View-Stereo, MVS) verknüpft alle Pixel eines Bildes mit den korrespondierenden Pixeln seiner Nachbarbilder. Steht ein Bildblock mit einer genügenden Anzahl überlappender Bilder zur Verfügung, kann pro Pixel eine redundante Entfernung bzw. zugehörige 3D-Koordinate berechnet werden. Für typische Überdeckungen eines Bildflugs von bis zu 80 bis 90 % ist eine pixelgenaue 3D-Punktbestimmung möglich. Prinzipiell sind bei entsprechender Aufnahmekonfigurationen Genauigkeiten im Bereich von einigen Millimetern erreichbar.

Wie Abb. 3 schematisch zeigt ergeben sich Probleme bei der bildbasierten Oberflächenrekonstruktion vor allem durch Verdeckungen. Diese verhindern,



Aus Mandlbürger et al. 2017

Abb. 3: Grundprinzip der Erfassung von Punktwolken. Links: MVS. Rechts: LiDAR

dass Objektpunkte in mehreren Bildern sichtbar sind und treten beispielsweise in dicht bebauten Gebieten auf. Schwierigkeiten bereiten auch Objekte, deren Erscheinungsbild stark von der Blickrichtung abhängt. Dies sind beispielsweise sehr kleine und damit semi-transparenten Strukturen wie Vegetation aber auch Kräne auf Baustellen. Problematisch kann auch geringe Bildtextur im Bereich homogener Oberflächen sein. Dies erschwert die Zuordnung und mindert potenziell die erzielbare Genauigkeit. Darüber hinaus lassen sich dynamische Objekte wie Fahrzeuge oder Fußgänger nicht mittels Stereobildzuordnung dreidimensional rekonstruieren, wenn wie bei der flugzeuggestützten Erfassung üblich Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemacht werden. Aus diesen Gründen ist das polare Messprinzip von LiDAR Sensoren, das nur einen Messstrahl zur Erfassung eines Objektpunktes benötigt insbesondere dann von Vorteil, wenn sich das Erscheinungsbild der zu rekonstruierenden Objektoberflächen sehr stark für unterschiedliche Aufnahmerrichtungen unterscheidet. Zusätzlich werden wie in Abb. 3 (rechts) dargestellt im Vergleich zur bildbasierten Rekonstruktion Probleme durch Verdeckungen verringert und Vegetation zumindest teilweise durchdrungen. Dies ist auch in Abb. 4 (links) ersichtlich, welche die 3D-LiDAR-Punktwolke zeigt bei der die Farbkodierung basiert auf der Reflektivität der jeweils beleuchteten Fläche. Die Daten wurden im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) initiierten Projekts erfasst (Cramer et al. 2018), bei dem ein Gebiet nahezu zeitgleich mit einem photogrammetrischen Kamerasystem und einem LiDAR-System befliegen wurden.

Existierende LiDAR-Systeme kombinieren teilweise bereits den Laserscanner mit einem RGB-Kamerasystem. Ziel ist dabei häufig die Anreicherung des Laser-Echos mit der Farbinformation aus den zeitgleich erfassten Bildern. Dies zeigt Abb. 4 (rechts), in der die Texturierung des LiDAR-Oberflächenmodells mit zeitgleich erfassten Schrägluftbildern erfolgte.

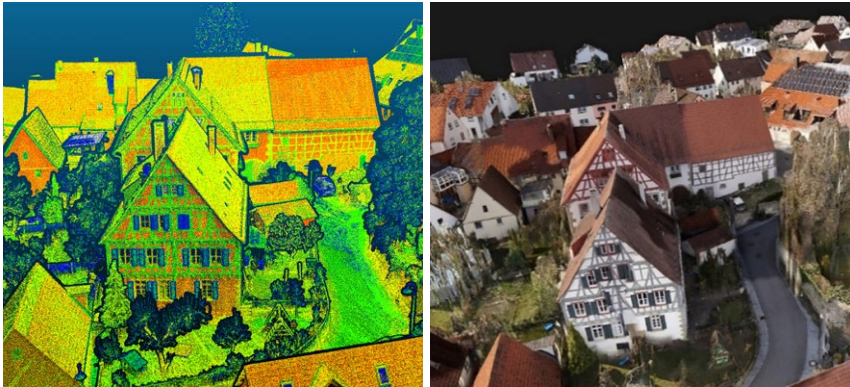


Abb. 4: Dichte LiDAR-Punktwolke aus Messung mit UAV-Plattform (links). Daraus abgeleitetes Oberflächenmodell, texturiert mit zeitgleich zu LiDAR-Messung erfassten Bildern in geneigter Aufnahmerrichtung (rechts)

Flugzeuggestütztes LiDAR ist ein aktives Messsystem, das Entfernungen durch Laufzeitmessung kurzer Laserpulse bestimmt. Moderne Systeme digitalisieren und analysieren hierzu die gesamte Wellenform des reflektierten LiDAR-Signals (Pfeifer et al. 2016). Eine spezifische Stärke der LiDAR Technologie ist damit die Möglichkeit, für einen Laserpuls mehrere Ziele aufzulösen. Mehrzielsituationen entstehen, wenn der Laserstrahl in unterschiedlicher Entfernung auf Ziele trifft, deren räumliche Ausdehnung kleiner als der jeweils beleuchtete Fußpunkt ist. Dieses betrifft beispielsweise Geäst und kleine Zweige. Somit können LiDAR Messungen Vegetation durchdringen und beispielsweise auch Objekte wie Fassadenelemente unter Baumkronen erfassen. Möglich ist aber auch die Erfassung sehr kleiner Objekte wie Stromleitungen. Dies zeigt der Vergleich von Punktwolken von Punktwolken aus LiDAR und MVS in Abb. 5. Auf der linken Seite ist eine Punktwolke aus LiDAR-Messungen in einer höhenkodierten Einfärbung überlagert mit einer MVS-Punktwolke in den zugehörigen RGB-Farben. Abb. 5 (rechts) zeigt beispielhaft das Profil einer Punktwolke aus der LiDAR-Messung in blau beziehungsweise aus der Mehrbildstereozuordnung in Rot. Die bessere Erfassung der Geometrie des Baumes durch LiDAR ist offensichtlich. Sichtbar ist aber auch, dass die pixelweise Erfassung mittels MVS sehr hohe Punktdichten ermöglicht. Der vergrößerte Ausschnitt im Bereich des Dachgiebels zeigt aber auch die deutlich höhere geometrische Auflösung der Punktwolke aus MVS. Hier wird durch die bildbasierte Erfassung die Rekonstruktion einzelner Dachziegel problemlos realisiert.

Dies zeigt exemplarisch Abb. 6 für ein aus den 3D-Punkten abgeleitetes Digitales Oberflächenmodell aus MVS (links) und LiDAR (rechts). Darin ist die

Schummerung des DOM aus dichter Bildzuordnung mit Rasterweite 5 mm (links) und LiDAR mit Rasterweite 2,5 cm (rechts) gegenüberstellt.

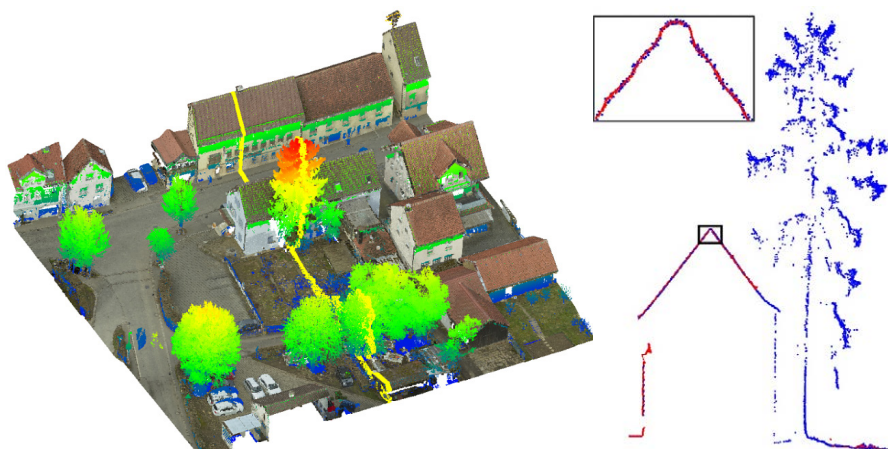


Abb. 5: LiDAR-Punktwolken (links) und MVS mit extrahierten Profilen (rechts)



Abb. 6: Schummerung des DOM aus MVS mit Rasterweite 5 mm (links) und LiDAR mit Rasterweite 2,5 cm (rechts)

4 Interpretation von 3D-Daten

Verfahren wie SfM und MVS haben in den letzten Jahren zu ganz erheblichen Fortschritten bei der automatischen photogrammetrischen Auswertung geführt. Dieser Schub führt zu einer auch weiter anhaltenden Qualitätssteigerung der flächendeckenden Erfassung von 3D-Punktwolken mittels flugzeug-, UAV- oder fahrzeuggestützten Systemen. Neben der weiteren Verbesserung der Genauigkeit, Dichte und Zuverlässigkeit der Erfassung beispielsweise durch integrierte Kamera- und LiDAR-Systeme rückt die semantische Analyse solcher Punktwolken durch eine automatische Interpretation immer mehr in den Fokus. Verfahren des Deep Learnings, insbesondere Convolutional Neural Networks (CNN), d.h. faltende neuronale Netzwerke haben im Bereich der automatischen Bildanalyse zu erheblichen Fortschritten geführt. Mittlerweile existieren entsprechende Verfahren auch zur Analyse von Punktwolken, wie das bekannte Beispiel PointNet++ zeigt (Qi et al. 2017).

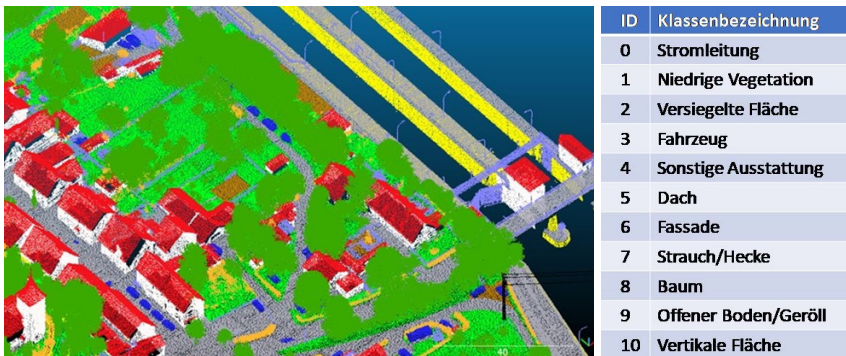


Abb. 7: Ausschnitt der gelabelten LiDAR-Punktwolke mit Objektklassen

Eine wichtige Anwendung bei der semantischen Analyse von 3D-Punktwolken ist deren Unterteilung in verschiedene Klassen. Grundvoraussetzung für ein solches Klassifizierungsverfahren ist die Bereitstellung von Referenzdaten, die üblicherweise manuell erfasst werden. Ein Beispiel hierfür zeigt Abb. 7. Dabei wurden die bereits im vorigen Abschnitt genutzten 3D-Punktwolken manuell in unterschiedliche Klassen unterteilt. Die Unterteilung erfolgte in: 0 = Stromleitung, 1 = Niedrige Vegetation, 2 = Versiegelte Fläche, 3 = Fahrzeug, 4 = Sonstige Ausstattung, 5 = Dach, 6 = Fassade, 7 = Strauch/Hecke, 8 = Baum, 9 = Offener Boden/Geröll, 10 = Vertikale Fläche. Eine Möglichkeit zur automatischen Klassifikation der Punktwolken bietet der klassische Random-Forest-Klassifikators (RF) auf Basis geometrischer und radiometrischer Merkmale (Kölle et al. 2019).

Grundvoraussetzung hierfür ist zunächst die Ableitung geeigneter Merkmale für die jeweiligen Punktelemente aus ihrer jeweiligen Nachbarschaft. Ein Beispiel dafür gibt Abb. 8, bei der die lokale Neigungswinkel einer umgebenden ausgleichenden Ebene und deren lokale Standardabweichung dargestellt ist.

Abb. 9 zeigt dann das Ergebnis der automatischen Klassifizierung der Punktwolke. Dabei wird ein Overall Accuracy (OA) von 86,80 % erreicht. Für eine detaillierte Diskussion sei wiederum auf Kölle et al. (2019) verwiesen.

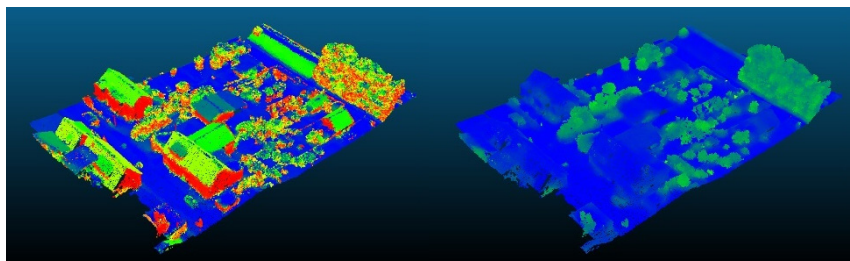


Abb. 8: Verteilung der geometrischen Merkmale Neigungswinkel θ und robusten Standardabweichung σ_{MAD}

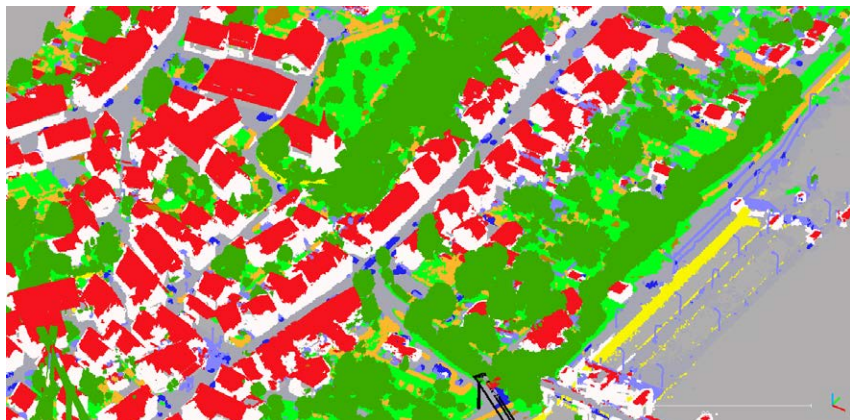


Abb. 9: Ausschnitt einer klassifizierten Punktwolke

5 Zusammenfassung

Die photogrammetrische Datenerfassung mittels UAV hat zweifelsohne erheblich von der Verfügbarkeit von Verfahren wie Structure-from-Motion und Dense Image Matching profitiert. Eingebunden in kommerzielle Softwareprodukte ist damit in der Regel eine problemlose Erzeugung von Standardprodukten wie

DOM und Orthophotos möglich. Zusätzlich sind dreidimensionale Punktwolken ein Produkt mit sehr großem Anwendungspotenzial, insbesondere dann wenn eine weitere Qualifizierung beispielsweise durch eine automatische Klassifikation durchgeführt wird. Rein „photogrammetrische“ Aufgabenstellungen ergeben sich in diesem Zusammenhang unter anderem im Rahmen der Entwicklung integrierter Kamera-LiDAR-Systeme zur weiteren qualitativen Verbesserung erfasster Punktwolken. Mit der „Erfindung“ von SFM und DIM hat das Anwendungsspektrum der Photogrammetrie definitiv einen massiven Sprung nach vorne gemacht, ein Ende dieser Entwicklung ist jedoch immer noch nicht absehbar.

Literatur

- Cramer, M., Haala, N., Laupheimer, D., Mandlbürger, G., Havel, P. (2018): Ultra-High Precision UAV-based LiDAR and Dense Image Matching. *Int. Arch. Photogr. Rem. Sens. Spat. Inf. Sci.*, XLII-1, 115–120.
- Gerke, M., Nex, F., Remondino, F., Jacobsen, K., Kremer, J., Karel, W., Hu, H., Ostrowski, W. (2016): Orientation of oblique airborne image sets – experiences from the ISPRS/EuroSDR benchmark on multi-platform photogrammetry. *Int. Arch. Photogr. Rem. Sens. Spat. Inf. Sci.*, XLI-B1, 185–191.
- Hirschmüller, H. (2008): Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), 328–341. DOI: [10.1109/TPAMI.2007.1166](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1166).
- Hüttl, P. (2017) Structure from Motion for Oblique Aerial Imagery. Masterarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie.
- Kölle, M., Laupheimer, D., Haala, N. (2019): Klassifikation hochaufgelöster LiDAR- und MVS-Punktwolken zu Monitoringzwecken. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 28, 692–701.
- Lowe, D. G. (2004): Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International journal of computer vision* 60 (2), 91–110.
- Mandlbürger, G., Wenzel, K., Spitzer, A., Haala, N., Glira, P., Pfeifer, N. (2017): Improved topographic models via concurrent airborne LiDAR and Dense Image Matching. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2/W4, 259–266.
- Pfeifer, N., Mandlbürger, G., Glira, P. (2016): Laserscanning. In: *Handbuch der Geodäsie: 5 Bände, Photogrammetrie und Fernerkundung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1–51.
- Qi, C., Yi, L., Su, H., Guibas, L. (2017): PointNet++: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17), 5105–5114.
- Rothermel, M., Wenzel, K., Fritsch, D., Haala, N. (2012): SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. 2nd Workshop LowCost 3D: Sensors, Algorithms, Applications, Berlin. <https://pdfs.semanticscholar.org/c310/f004966de855c35b5a710c7b149c1ad51d2e.pdf>, letzter Zugriff 01/2020.

- Rupnik, E., Nex, F., Remondino, F. (2014): Oblique multi-camera systems – orientation and dense matching issues. *Int. Arch. Photogr. Rem. Sens. Spat. Inf. Sci.*, XL-3/W1, 107–114. DOI: [10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-107-2014](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-107-2014).
- Schönberger, J., Frahm, J.-M. (2016): Structure-from-Motion Revisited. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4104–4113, 10.1109/CVPR.2016.445.

Kontakt

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

Session 3:

Daten und Qualität

Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagenternetzes am Beispiel des UAV-Testfelds Zeche Zollern

Manfred Bäumker

1 Einleitung

Seit 2013 werden auf dem Gelände der Zeche Zollern in Dortmund Befliegungen mit UAVs durchgeführt. Im Rahmen dieser Befliegungen wurde sukzessive ein 3D-Passpunktfeld zur Georeferenzierung der Bilddaten bzw. zur Kontrolle und Genauigkeitsanalyse der verschiedenen photogrammetrischen Auswerteverfahren mit UAVs angelegt. Zur Bestimmung der 3D-Koordinaten wurden hierzu unterschiedliche Messverfahren und Instrumente (Tachymeter, GNSS-statisch, GNSS-RTK, Nivellement) eingesetzt. Aufgrund der redundanten Messungen und der Wiederholungsmessungen ist es möglich, die mit den verschiedenen Messverfahren und die mit den UAVs erreichbare Genauigkeit zu beurteilen.

Für die Auswertung der UAV-Bilddaten werden UTM-Koordinaten im System ETRS89 sowie NHN-Höhen (Normalhöhen) benötigt. Im September 2013 wurde hierzu ein RTK-GNSS-System von Leica unter Nutzung des Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS® HEPS (Hochpräziser Echtzeitpositionierungsservice mit einer virtuellen Referenzstation (VRS)) in NRW eingesetzt. Die 11 über das Gelände der Zeche Zollern verteilten Passpunkte wurden mit diesem Verfahren bei einer Beobachtungszeit von 30 s bis 60 s zweifach bestimmt und gemittelt. Die Lage dieser Passpunkte stellt die Minimalkonfiguration für die Auswertung der Bilddaten dar. Für die Befliegungen im Mai 2014 wurde das Passpunktfeld um 35 weitere Punkte, die ebenfalls zusammen mit den bereits 11 existierenden Passpunkten mittels GNSS-RTK bestimmt wurden, verdichtet.

Die Analyse der RTK-GNSS-Messungen zeigte, dass mit diesem Messverfahren die Passpunkte in der Lage – abhängig von der Horizontfreiheit der Punkte – mit einer Genauigkeit von 5 mm bis 15 mm in der Lage und von 10 mm bis 40 mm in der Höhe bestimmt werden können. Der Vorteil dieses Messverfahrens liegt in der Schnelligkeit und der einfachen Durchführung der Messungen. Für die damaligen UAV-Befliegungen und Auswertung der Bilddaten reichte diese Genauigkeit völlig aus. Seitdem ist jedoch eine rasante Entwicklung der UAVs und der eingesetzten Kameras und daraus resultierenden Genauigkeitssteigerung festzustellen. Für die Georeferenzierung der Bilddaten und für die

Beurteilung der mit diesen Systemen erreichbaren Genauigkeit reicht die mit dem RTK-Verfahren erreichbare Genauigkeit daher teilweise nicht mehr aus.

Deshalb werden seit 2016 zusätzlich zu den RTK-Messungen auch aufwendige statische GNSS-Messungen unter Nutzung des SAPOS®-Dienstes GPPS (Geodätischer Postprocessing Positionierungs-Service, Riecken und Ruf 2013) und tachymetrische Messungen sowie Feinnivellements zur hochgenauen Bestimmung von 3D-Koordinaten durchgeführt. Nachfolgend wird über die Möglichkeiten und die gemeinsame Ausgleichung dieser Messungen zur hochgenauen 3D-Koordinatenbestimmung von Pass- und Kontrollpunkten im System ETRS89 (UTM) und DHHN 2016 (NHN) berichtet.

2 Grundlagen

Für die Auswertung und Georeferenzierung der Bilddaten sowie die Genauigkeitsanalyse werden die 3D-Koordinaten einer ausreichenden Anzahl von Pass- und Kontrollpunkten, die zumindest die Randgebiete des Befliegungsgebietes abdecken sollten, benötigt. In dem Fall der Zeche Zollern müssen hierzu UTM-Koordinaten (East, North) im System ETRS89 (UTM32) sowie ellipsoidische Höhen bzw. Normalhöhen (NHN-Höhen) im System DHHN92 bzw. DHHN2016 bestimmt werden.

Da keine Anschlusskoordinaten in ausreichender Anzahl und Genauigkeit in diesem Gebiet im System ETRS89 vorlagen, wurden diese Datumsinformationen mittels GNSS-Messungen unter Nutzung der SAPOS®-Dienste HEPS und GPPS (Trimble R8, Leica Viva GS10, GS15, GS16) bestimmt. Da diese Messungen primär geozentrische Koordinaten X, Y, Z im System ETRS89 liefern, müssen diese in UTM-Koordinaten und NHN-Höhen transformiert werden.

Für die Berechnung der NHN-Normalhöhen (H^N) aus den ellipsoidischen Höhen (h) werden zusätzlich Quasigeoidhöhen (ζ) benötigt. Die Normalhöhen ergeben sich dann wie folgt:

$$H^N = h - \zeta$$

Die Quasigeoidhöhen ζ stehen in direktem Zusammenhang mit den Normalhöhen, die sich aktuell auf das neue Höhensystem DHHN2016 beziehen. Seit der Wiedervereinigung wurden erstmals auch für die alten Bundesländer Normalhöhen, die zusammen mit den Nivellementsmessungen der neuen Bundesländer einer gemeinsamen Ausgleichung entstammen, eingeführt. Für die Berechnung der Quasigeoidhöhen für das Gebiet der Bundesrepublik stellt das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) Programme und Daten zur Berechnung der Quasigeoidhöhen bereit. Zusammen mit der Einführung des neuen

Höhensystems DHHN2016 wurde im November 2017 das German Combined Geoid GCG2016 eingeführt. Die Normalhöhen des DHHN2016, die sich auf den Amsterdamer Pegel beziehen, haben sich für das Gebiet der Zeche Zollern gegenüber dem System DHHN92 um ca. +10 mm verändert. Auch die Quasigeoidhöhen des GCG2016 haben sich gegenüber denen der Vorgängermodelle GCG2005 und GCG2011 für dieses Gebiet um ca. +5 mm bzw. +6 mm verändert und variieren zwischen 45.637 m und 45.650 m. Diese Veränderungen liegen somit deutlich über der Messgenauigkeit und müssen beim Vergleich mit älteren Berechnungen aus den Vorjahren unbedingt berücksichtigt werden.

3 Eingesetzte Messsysteme und Auswerteverfahren

Ab 2016 wurden die Koordinaten der Pass- und Kontrollpunkte nicht nur mittels RTK-GNSS (Trimble R8, Leica GS15, GS16, [Abb. 1](#)) unter Nutzung des SAPOS®-Dienstes HEPS sondern primär tachymetrisch mit Strecken-,



Abb. 1: RTK-GNSS-Messungen mit Trimble R8, Leica GS15, GS16

Horizontalrichtungs- und Zenitdistanzmessungen (Leica TS1202, Leica TS15) sowie mittels Präzisionsnivelements mit einem Leica DNA03 und kodierten 2 m-Invarbandlatten bestimmt (Abb. 2 und Abb. 3). Hierzu wurden geodätische 3D-Netze mit temporären Tachymeterstandpunkten, die sich den ständig verändernden und schwierigen Sichtbedingungen anpassen mussten, angelegt. Auch die auf dem Gelände der Zeche Zollern vermarkten Pass- und Kontrollpunkte wurden immer wieder durch Baumaßnahmen zerstört und mussten teilweise neu angelegt werden. Auch für die Signalisierung dieser Punkte wurden unterschiedliche Markierungen getestet.



← Abb. 2:
Netzmes-
sungen mit
Leica TS15

↓ Abb. 3:
Präzisions-
nivelement
mit Leica
DNA03





Abb. 4: Tachymeterstandpunkte und Kontroll- und Passpunkte (30.9.2019)

Abb. 4 zeigt in dem Orthophoto aus der Befliegung vom 30.9.2019 die Lage der temporären Tachymeterstandpunkte und der Pass- und Kontrollpunkte. Gegenüber den Vorjahren wurden auch jeweils zwei Punkte auf den beiden Fördertürmen angelegt (Punkt 800 bis 803).

Die Netzmessungen von den temporär angelegten Tachymeterstandpunkten erfolgten in Zwangszentrierung in zwei Vollsätzen mit automatischer Zielerfassung (ATR). Im ersten Schritt wurden zunächst nur die Netzmessungen der Standpunkte in einem nordorientierten lokalen dreidimensionalen Koordinatensystem mit dem Programmsystem JAG3D (Lösler 2012) ausgeglichen. Als Datumspunkte dienten die transformierten geozentrischen X-, Y-, Z-Koordinaten aus den auf den Standpunkten ausgeführten statischen GNSS-Messungen und/oder die auf den Pass- und Kontrollpunkten ausgeführten RTK-GNSS-Messungen.

Die Auswertung der auf den Tachymeterstandpunkten ausgeführten statischen GNSS-Messungen und die Berechnung der geozentrischen Koordinaten im System ETRS89 erfolgte mit dem Programmsystem ViGO (Virtuelle Auswertungen mit einer grafischen Oberfläche, Bezirksregierung Köln 2013, Wanninger 2000) unter Nutzung der Daten des SAPOS®-Dienstes GPPS. Die Auswertung erfolgte mit zwei Verfahren (Abb. 5):

- Mit den RINEX-Daten der 4 Referenzstationen der nächsten umliegenden SAPOS®-Referenzstationen (Essen 2582, Hagen2 2585, Haltern 2601, Hamm2 2616)
- Mit einer virtuellen SAPOS®-Referenzstation, deren Daten die für einen Punkt in der Mitte des Gebietes vom SAPOS®-Dienst berechnet wurden (X = 3944602.1033 m, Y = 507749.9683 m, Z = 4969684.4540 m)

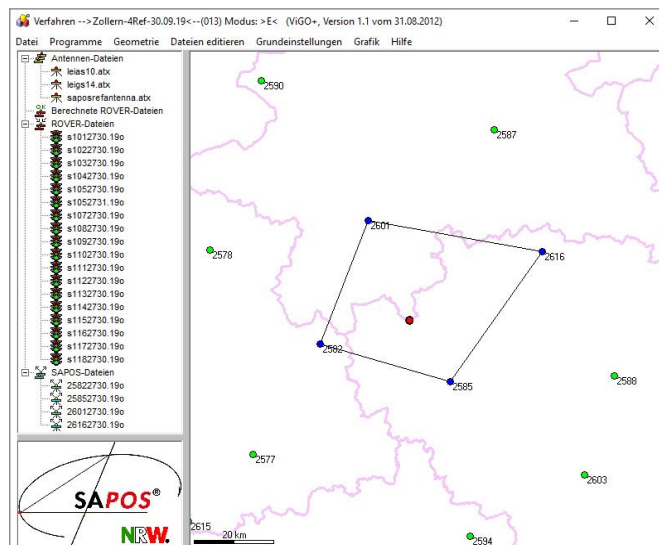
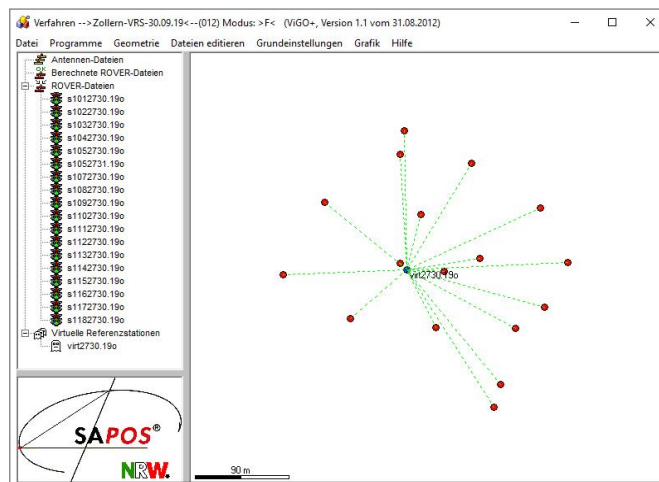


Abb. 5:
Auswertung
der statischen
GNSS-Messungen mit VIGO
(Verfahren mit
4 Referenzstationen (oben) und
mit einer VRS
(unten))



Die aus beiden Verfahren gemittelten geozentrischen Koordinaten wurden anschließend in ein tangentiales lokales dreidimensionales nordorientiertes Koordinatensystem mit dem Ursprung in der Mitte des Messgebietes transformiert. Für die Transformation wurden folgender Nullpunkt und folgende Orientierung des tangentiaien nordorientierten Koordinatensystems im System ETRS89 festgelegt:

X_0, Y_0, Z_0 :	3944619.3886 m	507774.7319 m	4969757.5588 m
$\varphi_0, \lambda_0, h_0$:	51.518226820°	7.335113853°	169.8622 m

Für den so festgelegten Nullpunkt lässt sich nun folgende Drehmatrix zwischen dem erdfesten geozentrischen Koordinatensystem (e-System) und dem lokalen Koordinatensystem (L-System) aufstellen (Torge und Müller 2012):

$$\mathbf{C}_e^L = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 & -\sin \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \\ -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix}$$

Mittels dieser Drehmatrix lassen sich die geozentrischen Koordinatendifferenzen zwischen dem festgelegten Nullpunkt und den zu transformierenden Punkte in das lokale nordorientierte Koordinatensystem wie folgt transformieren:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ H \end{bmatrix}_i = \mathbf{C}_e^L \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ H_0 \end{bmatrix}$$

Der Nullpunkt des lokalen Koordinatensystems wurde hier mit ($x_0 = 0$ m, $y_0 = 0$ m, $H_0 = 0$ m) festgelegt. Die Ausgleichung der 3D-Netzmessungen erfolgte in diesem lokalen Koordinatensystem. Nach der Ausgleichung wurden die ausgeglichenen Koordinaten des lokalen Koordinatensystems (L-System) mit der inversen Transformation in das geozentrische Koordinatensystem (e-System) über den zuvor festgelegten Nullpunkt wie folgt zurücktransformiert:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = (\mathbf{C}_e^L)^T \cdot \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ H \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ H_0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

mit

$$\left(\mathbf{C}_e^L\right)^{-1} = \left(\mathbf{C}_e^L\right)^T = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 & -\sin \lambda_0 & \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 \\ -\sin \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & \cos \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 \\ \cos \varphi_0 & 0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix}$$

Der Vorteil dieses lokalen Koordinatensystems ist, dass im Nullpunkt keine Meridiankonvergenz auftritt und keine Abbildungsverzerrungen zu berücksichtigen sind, da der Maßstab 1.00000000 ist und die gemessenen Schrägstrecken ohne Streckenreduktionen in der Netzausgleichung verwendet werden können. Für die Berechnung der Höhen aus den Strecken und Zenitdistanzen sind ggf. noch die Erdkrümmung und die Refraktion zu berücksichtigen. Für das Messgebiet mit einer Ausdehnung von ca. ± 150 m beträgt die Erdkrümmungskorrektur maximal 1,8 mm. Wenn die Höhen zusätzlich mittels eines Präzisionsnivelements bestimmt wurden, können diese auch später nach der Rücktransformation in das System ETRS89 und das DHHN 2016 zusätzlich genutzt werden.

Die aus den GNSS-Messungen berechneten lokalen Koordinaten dienen in der 3D-Netzausgleichung als Datumspunkte und zur zwangsfreien Lagerung des 3D-Netzes. Bei den Netzmessungen 2017 wurden nur RTK-GNSS-Messungen auf allen Pass- und Kontrollpunkten durchgeführt und als Datumspunkte (45 Datumspunkte) eingeführt. 2018 und 2019 wurden erstmalig zur Datumsfestlegung auch auf den Tachymeterstandpunkten – soweit eine ausreichende Horizontfreiheit gewährleistet war – statische GNSS-Messungen in Zwangs-



Abb. 6: Statische GNSS-Messungen auf den Standpunkten mit Zwangszentrierung

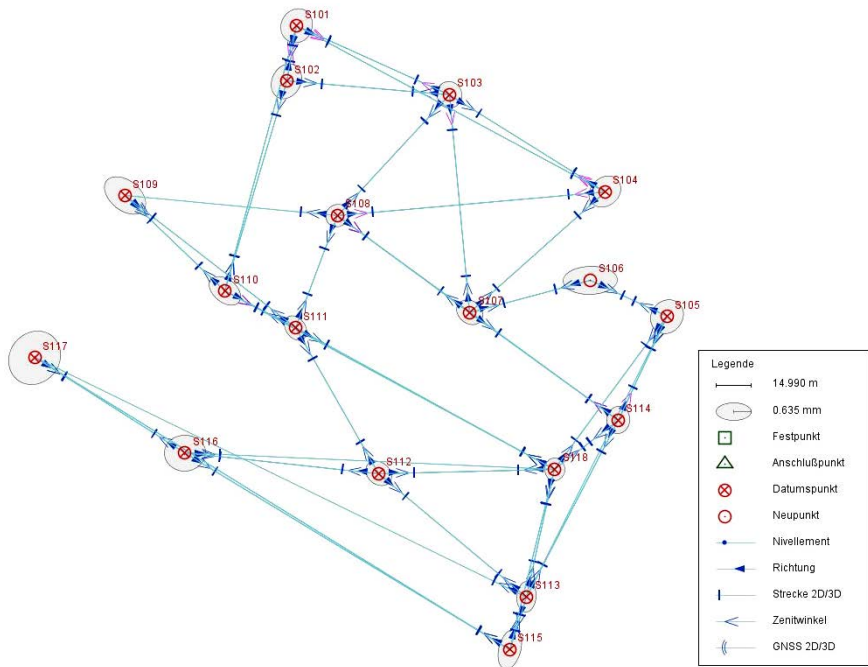


Abb. 7: Datums- und Tachymeterstandpunkte der Netzmessungen vom 30.9.2019 sowie die Konfidenzellipsen aus der 3D-Netzausgleichung

zentrierung mit einer Mindestbeobachtungsdauer von 30 Minuten ausgeführt (Abb. 6). Die mit dem Programmsystem ViGO berechneten geozentrischen Koordinaten wurden anschließend in das lokale nordorientierte Koordinatensystem transformiert und als Datumspunkte (jeweils 17 bzw. 18 Datumspunkte) in die 3D-Netzausgleichung mit dem Ausgleichungsprogramm JAG3D eingeführt.

Die zusätzlich ausgeführten RTK-GNSS-Messungen dienten dabei auch zur Beurteilung der Genauigkeit der RTK-GNSS-Messungen und zur Aufdeckung evtl. systematischer Differenzen zwischen den unabhängigen RTK- und den statischen GNSS-Messungen. Abb. 7 zeigt die Datums- und Standpunkte der Netzausgleichung der 226 Messungen (74 Richtungen, 76 Raumstrecken, 76 Zenitdistanzen) vom 30.9.2019 und deren Konfidenzellipsen (99 % Sicherheitswahrscheinlichkeit).

4 Ergebnisse und Genauigkeitsanalyse

Obwohl das Programmsystem JAG3D auch Zweilagennmessungen auswerten kann, wurden die Richtungs-, Zenitdistanz- und Streckenmessungen, die in zwei Vollsätzen durchgeführt wurden, vorab ausgewertet und die Standardabweichungen der gemittelten Beobachtungen berechnet. An Hand dieser Standardabweichungen sowie der berechneten Zielachs- und Höhenindexfehler konnten bereits grobe Fehler in den Beobachtungen im Vorfeld detektiert und eliminiert werden. So konnten z. B. mehrfach fehlerhafte Anzielungen der ATR aufgrund der Ausrichtung auf ein anderes Prisma, das zufällig im Sichtbereich der ATR lag, in allen Fällen aufgedeckt werden. Ohne diese redundanten Messungen wäre die Aufdeckung dieser Fehler unmöglich gewesen.

Im ersten Schritt wurden zunächst nur die Messungen der Standpunkte und die 3D-Koordinaten der Datumpunkte in der 3D-Ausgleichung verwendet. Die lokalen Koordinaten der 18 Standpunkte und deren empirische Standardabweichungen der im ersten Schritt durchgeführten 3D-Netzausgleichung mit den Netzmessungen vom 30.9.2019 sind in [Tab. 1](#) aufgeführt. Standpunkt S106 konnte aufgrund eingeschränkter Horizontfreiheit nicht mit GNSS gemessen werden und musste daher als Neupunkt in die Ausgleichung eingeführt werden.

Tab. 1: Lokale 3D-Koordinaten der Standpunkte und deren Standardabweichungen (lokales nordorientiertes 3D-Koordinatensystem, x = Nord, y = Ost, z = Höhe)

Punkt	y-lokal [m]	x-lokal [m]	z-lokal [m]	Sy [mm]	Sx [mm]	Sz [mm]	s2D [mm]	s3D [mm]
S101	-29,0826	104,7533	5,4820	0,97	1,05	0,48	1,43	1,50
S102	-33,4431	81,1512	3,3694	0,92	1,06	0,50	1,41	1,49
S103	36,2363	75,3177	4,6388	0,76	0,83	0,41	1,12	1,19
S104	102,9646	33,8622	3,9846	0,98	0,96	0,47	1,37	1,45
S105	129,5623	-19,6125	2,6184	1,02	1,04	0,45	1,46	1,53
S107	45,1254	-17,8916	1,3103	0,81	0,75	0,39	1,10	1,17
S108	-11,6718	23,6988	1,0124	0,70	0,69	0,36	0,98	1,05
S109	-102,7133	32,1492	0,9990	1,25	1,15	0,52	1,70	1,78
S110	-59,7474	-8,6910	0,5944	0,96	0,89	0,40	1,31	1,37
S111	-29,6236	-24,5445	0,7048	0,68	0,76	0,35	1,02	1,08
S112	5,9690	-86,8197	0,7327	0,79	0,73	0,41	1,07	1,15
S113	69,4490	-139,6416	1,1560	0,59	0,94	0,39	1,11	1,18
S114	108,7171	-63,9677	0,9930	0,72	0,82	0,37	1,10	1,16
S115	62,2534	-162,1403	0,7172	0,74	1,20	0,48	1,41	1,49
S116	-77,0620	-78,1436	0,4715	1,25	1,11	0,57	1,67	1,76
S117	-141,4262	-37,3177	0,3650	1,59	1,62	0,74	2,27	2,39
S118	81,4181	-85,0498	1,2223	0,61	0,69	0,32	0,92	0,97
S106	96,7747	-4,1615	3,1534	1,64	0,87	0,56	1,86	1,94

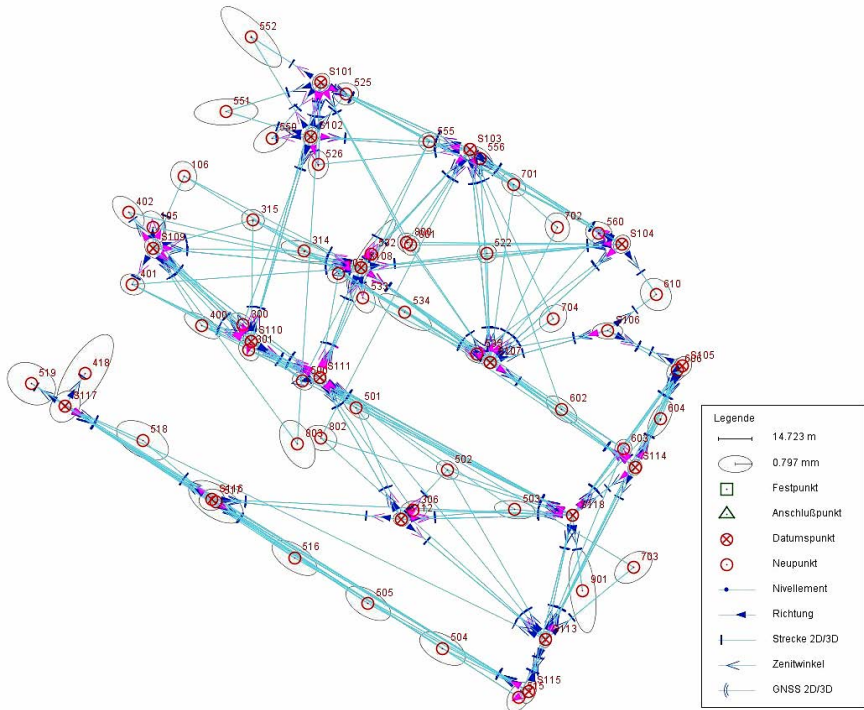


Abb. 8: Konfidenzellipsen der 3D-Gesamtausgleichung der Netzmessungen vom 30.9.2019

Sämtliche Standardabweichungen der Koordinaten der Standpunkte liegen im Bereich von 0,5 mm bis 1,6 mm. Die zugehörigen Konfidenzellipsen (99 %) sind bereits zuvor in [Abb. 7](#) dargestellt.

Im nächsten Schritt wurden dann sämtliche Messungen (239 Richtungen, 240 Raumstrecken, 240 Zenitdistanzen = 719 Messungen) und die Pass- und Kontrollpunkte als Neupunkte (zusammen mit Standpunkt S106, insgesamt 50 Neupunkte und 17 Datumspunkte) in die Gesamtausgleichung eingeführt. In [Abb. 8](#) sind das Gesamtnetz, die Beobachtungen und die Konfidenzellipsen der ausgeglichenen Koordinaten des lokalen Koordinatensystems dargestellt. Anschließend wurden die ausgeglichenen Koordinaten in das globale ETRS89-Koordinatensystem zurück transformiert und mittels weiterer Transformationen in UTM-Koordinaten (System UTM32) und mit den Quasigeoidhöhen des GCG2016 in Normalhöhen überführt. Die Quasigeoidhöhen der Netzpunkte des GCG2016 variieren von 45.637 m (nördlichster Punkt 552) und 45.650 m (südlichster Punkt 515) sind in [Abb. 9](#) dargestellt. Für den Fall, dass zusätzlich Nivellementsmessungen durchgeführt werden, können diese Höhen als

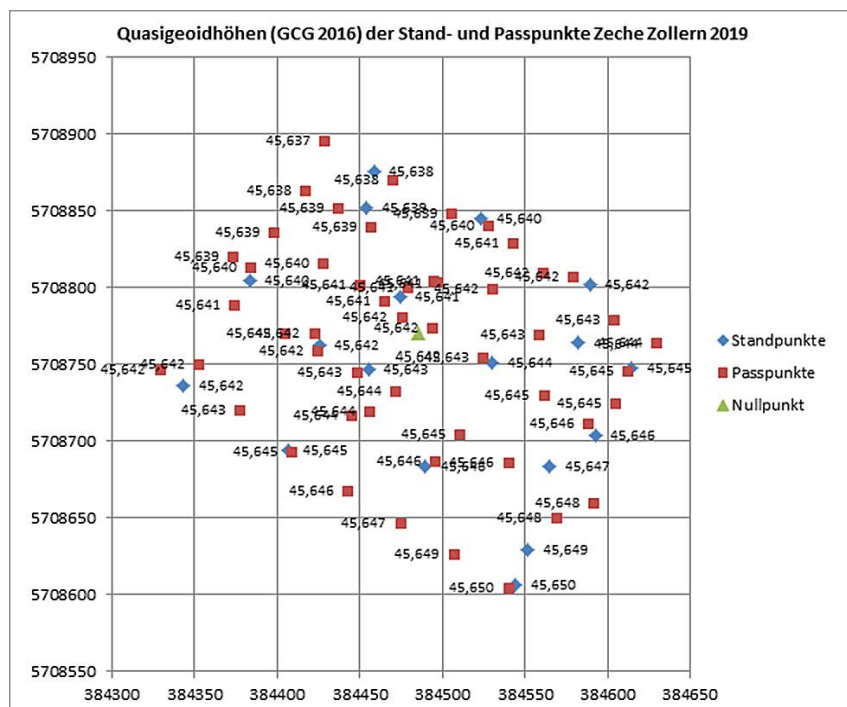


Abb. 9: Quasigeoidhöhen [m] (GCG2016) der Netzpunkte (System UTM32)

Datumspunkte in eine 1D-Netzausgleichung eingeführt und mit den Nivellementsmessungen neu ausgeglichen werden.

Da bei den Netzmessungen 2019 keine zusätzlichen Feinnivellements durchgeführt wurden, wurde zur Beurteilung der tachymetrisch bestimmten Normalhöhen auf die Messungen der Feinnivellements aus 2017 zurückgegriffen. Insgesamt wurden vier Schleifen zur Bestimmung der Normalhöhen der damaligen Pass- und Kontrollpunkte gemessen. Die Originalmessungen dieser Schleifennivellements wurden jetzt in einer 1D-Netzausgleichung mit dem Programm JAG3D neu ausgeglichen. Als 1D-Datumspunkte wurden in die neue Ausgleichung die tachymetrisch bestimmten Normalhöhen der Punkte, deren Lage und Höhe als unverändert gegenüber 2017 betrachtet werden können, eingeführt. Insgesamt konnten von den damaligen Pass- und Kontrollpunkten die Höhen von 14 Punkten aus der 3D-Netzausgleichung vom 30.9.2019 als Datumspunkte in die neue 1D-Ausgleichung eingeführt werden. Aus den Zuschlägen zu den Höhen der Datumspunkte, die zusammen mit den ausgeglichenen Höhen und deren Standardabweichungen in Tab. 2 aufgeführt sind, berechnet sich eine Standardabweichung von 1,2 mm der tachymetrisch bestimmten Normalhöhen.

Tab. 2: Ausgegliche Normalhöhen H^N der Datumpunkte und deren Standardabweichungen und Zuschläge zu den tachymetrisch bestimmten Normalhöhen H_0^N aus der 3D-Netzausgleichung

Punkt-Nr.	Ausgegl. Höhe H^N [m]	s_{HN} [mm]	$H^N - H_0^N$ [mm]
105	123,5445	0,10	1,48
107	123,6078	0,08	-1,81
314	123,6016	0,10	-1,57
315	123,6617	0,08	2,26
400	123,0116	0,11	-0,57
401	123,2766	0,10	-0,64
402	123,3858	0,10	0,18
518	123,2242	0,15	1,75
533	123,5713	0,10	-0,32
535	123,9088	0,10	1,16
602	124,1495	0,11	-1,48
703	123,6771	0,09	-0,07
604	124,2821	0,10	-0,14
606	125,0382	0,13	-0,23

Zusätzlich zu den tachymetrisch bestimmten Koordinaten aus der 3D-Netzausgleichung wurden 2019 auch RTK-GNSS-Messungen unter Nutzung des SAPOS®-Dienstes HEPS durchgeführt. Insgesamt wurden am 23.9.2019 und am 7.10.2019 die 3D-Koordinaten (UTM 32 und ell. Höhen) sämtlicher Pass- und Kontrollpunkte zweifach zu unterschiedlichen Zeiten gemessen. Obwohl die mittels der RTK-GNSS-Methode bestimmten Koordinaten nicht mit der Genauigkeit und der Qualität der Koordinaten aus der 3D-Netzausgleichung konkurrieren können, können diese 3D-Koordinaten sehr gut genutzt werden, um evtl. systematische Differenzen zwischen den statischen Auswerteverfahren mit dem SAPOS®-Dienst GPPS und dem Echtzeitdienst SAPOS® HEPS aufzudecken, da hierzu völlig unterschiedliche Programme und Daten genutzt werden:

- SAPOS®-HEPS: Berechnung einer virtuellen Referenzstation (VRS) in Echtzeit vom SAPOS®-Server und Verwendung der VRS-Echtzeitdaten im GNSS-Empfänger für eine Echtzeit-RTK-Lösung
- SAPOS®-Dienst GPPS: Verwendung der Daten der SAPOS®-Referenzstationen im Postprocessingprogramm (hier ViGO mit 4 Referenzstationen oder einer vom SAPOS®-Server erzeugten virtuellen Referenzstation (VRS))

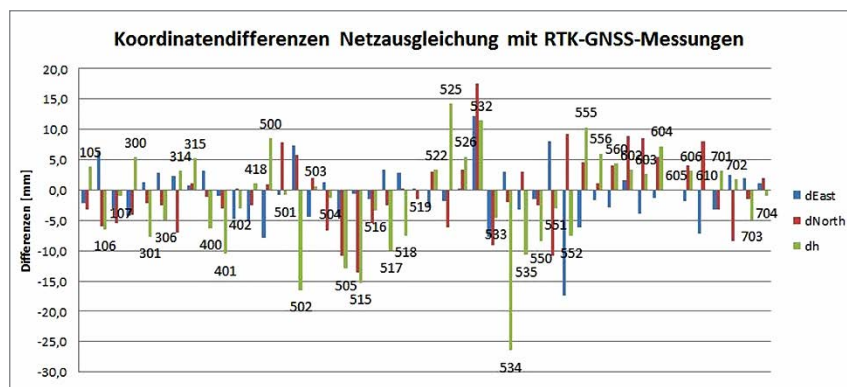


Abb. 10: Koordinatendifferenzen aus 3D-Netzausgleichung und RTK-GNSS

Auf sämtlichen Pass- und Kontrollpunkten konnten am 23.9. und am 7.10.2019 zusätzlich doppelte RTK-GNSS-Messungen zu unterschiedlichen Beobachtungszeiten von mindestens 30 Sekunden Dauer durchgeführt werden. Die aus den vier Messungen berechneten Mittelwerte (UTM32-Koordinaten und ell. Höhe) wurden mit den 46 Koordinaten aus der 3D-Netzausgleichung verglichen.

Die UTM-Koordinaten und Höhen der aus der 3D-Netzausgleichung sowie die Differenzen zu den gemittelten RTK-Messungen und die daraus abgeleiteten Standardabweichungen sind in Tab. 3 aufgeführt und zeigen erstaunlicherweise keine systematischen Differenzen zwischen den beiden Messverfahren. In Abb. 10 sind die Differenzen zusammen mit den Punktnummern grafisch dargestellt. Die größten Differenzen treten bei den Punkten mit einer stark eingeschränkten Horizontfreiheit auf. Die Auswertung der RTK-Messungen zeigt, dass bei ausreichender Horizontfreiheit Standardabweichungen in der Lage von 7 mm und in der Höhe sogar von 8 mm bei vier Wiederholungsmessungen erreichbar sind. An Stelle der aufwendigen statischen Messungen würde es daher ausreichen, kontrollierte RTK-Messungen zur Überführung der ausgeglichenen lokalen Koordinaten in das amtliche Koordinatensystem ETRS89 (UTM und DHHN2016) durchzuführen.

Für einen Großteil der Pass- und Kontrollpunkte wurden bereits in 2017 und 2018 UTM-Koordinaten und Höhen in DHHN2016 bestimmt, sodass sich der Vergleich der Koordinaten und Höhen aus 2019 mit denen der Vorjahre für eine weitere Genauigkeitsanalyse anbietet. Aus den Koordinaten- und Höhendifferenzen d_i lässt sich eine empirische Standardabweichung s für eine Koordinaten bzw. Höhe (East, North, H^N) nach

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{2n}}$$

Tab. 3: Vergleich der ausgeglichenen Koordinaten der Pass- und Kontrollpunkte mit den gemittelten RTK-GNSS-Koordinaten aus vier Messungen

Punkt	East [m]	North [m]	ell. Höhe [m]	dEast [mm]	dNorth [mm]	dh [mm]
105	384383,4559	5708813,7991	169,1852	-2,2	-3,3	3,8
106	384397,6381	5708835,9475	169,4587	6,4	-5,9	-6,5
107	384464,5254	5708791,5805	169,2475	-3,0	-5,5	-1,0
300	384422,0947	5708770,0551	168,6821	-4,3	-4,0	5,4
301	384424,3356	5708758,9053	168,7193	1,3	-2,2	-7,7
306	384495,0267	5708687,0924	168,9319	2,7	-2,6	-5,0
314	384449,7826	5708801,7762	169,2410	2,3	-7,1	3,2
315	384427,6290	5708815,9069	169,3041	0,8	1,1	5,2
400	384404,1144	5708770,1107	168,6523	3,2	-1,2	-6,3
401	384374,0150	5708788,8932	168,9164	-1,1	-3,1	-10,5
402	384372,9547	5708820,6028	169,0256	-4,8	0,3	-3,0
418	384352,2713	5708750,3060	168,8552	-5,2	-2,6	1,1
500	384447,7232	5708744,8676	168,7415	-8,0	0,9	8,5
501	384470,9711	5708732,7955	168,9525	-0,7	7,9	-0,8
502	384510,3363	5708704,3938	168,8893	7,4	5,8	-16,5
503	384539,5280	5708686,4456	169,4344	-4,4	2,0	0,7
504	384506,3945	5708626,2468	168,7997	1,2	-6,7	-1,2
505	384474,1559	5708646,7844	168,8252	-4,2	-10,8	-13,0
515	384539,4765	5708604,2410	168,8265	-0,7	-13,5	-15,3
516	384442,3541	5708667,4400	168,9093	-1,5	-5,4	-3,3
517	384408,5423	5708692,9026	168,8173	3,4	-2,6	-10,0
518	384376,9490	5708720,5084	168,8696	2,8	0,3	-7,5
519	384328,7081	5708746,4161	168,6606	0,1	-1,5	-0,1
522	384529,7804	5708798,9921	170,6407	-2,8	3,0	3,4
525	384469,5936	5708870,3426	170,7552	-1,9	-6,2	14,2
526	384456,7260	5708839,5226	169,8609	0,1	3,4	5,5
532	384478,8699	5708799,9789	169,3389	12,2	17,5	11,4
533	384475,0164	5708780,8999	169,2128	-7,7	-9,1	-4,5
534	384493,2931	5708774,1252	169,4196	3,1	-2,0	-26,5
535	384524,4877	5708754,8557	169,5538	-3,2	3,1	-10,7
550	384436,6172	5708851,5727	169,7021	-1,4	-2,5	-8,4
551	384416,7560	5708863,6655	169,7330	8,0	-10,9	-3,0
552	384428,6350	5708896,1075	170,5255	-17,4	9,2	-7,6
555	384505,5343	5708848,4629	171,1580	-6,1	4,6	10,3
556	384527,7560	5708840,6795	173,0991	-1,7	1,1	6,0
560	384579,0781	5708806,8434	172,1998	-2,8	4,1	4,3
602	384561,0078	5708729,8462	169,7930	1,7	8,9	3,4
603	384587,6479	5708711,8448	169,4171	-3,9	8,6	2,7
604	384604,1482	5708724,6406	169,9276	-1,3	5,5	7,2
605	mit Tachymeter nicht messbar					
606	384612,0074	5708746,0075	170,6825	-1,8	4,1	3,2
610	384603,5851	5708779,2600	171,3287	-7,2	8,0	0,0
701	384542,1488	5708828,7832	172,1842	-3,3	-3,2	3,2
702	384560,8873	5708809,8242	171,3586	2,4	-8,4	1,7
703	384590,9051	5708659,9083	169,3250	2,0	-1,6	-4,9
704	384558,2366	5708769,6998	170,3344	1,1	2,0	-1,0
Mittel				-0,9	-0,4	-1,5
Anz.	46			4,8	6,1	8,0

berechnen. Bei dem Vergleich mussten allerdings einige Punkte ausgeschlossen werden, da sich deren UTM-Koordinaten bzw. Höhen signifikant verändert hatten. Das sind im Wesentlichen die Punkte mit Rohrvermarkungen in den Grünflächen und in dem Schotterbett. Diese Punkte wurden daher bei den Vergleichen ausgeschlossen. Da der Vergleich mit den UTM-Koordinaten und den Normalhöhen erfolgte, beinhalten die Standardabweichungen auch die Standardabweichungen der in die Netzausgleichung eingeführten Datumpunkte, die aus den unabhängigen GNSS-Messungen der beiden Epochen mittels der SAPOS®-Dienste HEPS und GPPS stammen. In Tab. 4 sind die berechneten Standardabweichungen aus den Vergleichen mit den Koordinaten und Höhen von 2017 und 2018 aufgeführt. Die Standardabweichungen der UTM-Koordinaten liegen bei 3 mm und die der Höhen bei 4 mm bis 5 mm.

Tab. 4: Vergleich der UTM-Koordinaten und Höhen aus 2019 mit denen aus 2018 und 2017

Vergleich	<i>n</i>	<i>s_{East}</i> [mm]	<i>s_{North}</i> [mm]	<i>s_{2D}</i> [mm]	<i>n</i>	<i>s_H</i> [mm]
2019–2018	42	2,7	2,8	3,9	35	4,6
2019–2017	39	3,4	2,2	4,0	33	4,8

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in den letzten Jahren zu beobachtende rasante Entwicklung von UAVs zur Bestimmung von dreidimensionalen Punktwolken inklusive der direkten Georeferenzierung mittels in den UAVs implementierter RTK-Systeme und den darin eingesetzten Kameras erfordern für die Analyse der mit diesen Systemen erreichbaren Genauigkeit unabhängige Verfahren. In den meisten Fällen ist auch heute noch eine Georeferenzierung der Punktwolke notwendig. Eine effektive Methode zur Überprüfung der mit diesen Systemen und Auswerteprogrammen erreichbaren Genauigkeit ist die Anlegung eines Pass- und Kontrollpunktfeldes mit einer 3D-Genauigkeit im 1 mm-Bereich. Die Hochschule Bochum hat hierzu in den vergangenen Jahren ein Pass- und Kontrollpunktfeld auf dem Gebiet der Zeche Zollern etabliert und seitdem dort zahlreiche Befliegungen mit verschiedenen UAVs durchgeführt.

Die kontinuierliche Steigerung der Genauigkeiten in der Positionsbestimmung und der Flugführung bei den UAVs und den eingesetzten Kameras erforderte auch eine entsprechende Steigerung der Genauigkeit bei der Bestimmung der 3D-Koordinaten der Pass- und Kontrollpunkte. Für diese Zwecke wurden in den letzten Jahren auf dem Gebiet der Zeche Zollern in Dortmund

Pass- und Kontrollpunkte für die direkte Georeferenzierung von Luftbildern aus UAV-Befliegungen angelegt und kontinuierlich verbessert. Die Bestimmung der Referenzkoordinaten im amtlichen Koordinatensystem ETRS89 (UTM32) und DHHN2016 mit einer Genauigkeit im 1 mm-Bereich stellt hohe Anforderungen an die hybriden Messverfahren, die im Laufe der letzten Jahren weiter entwickelt und kontinuierlich verbessert wurden. Die Messungen und Netzausgleichungen der letzten Kampagne im September/Oktober 2019 zeigen, dass diese hohen Anforderungen erfüllt werden konnten.

Die aktuellen Messverfahren mit Tachymeter, Präzisionsnivellieren und GNSS zeigen, dass es die 3D-Koordinaten der Pass- und Kontrollpunkte mit einer absoluten Genauigkeit im System ETRS89 und DHHN von 3 bis 4 mm zu bestimmt und quasi als fehlerfrei in die Auswertprogramme der Bilddaten von UAVs verwendet werden können. Die relative Genauigkeit der 3D-Koordinaten liegt dabei sogar im 1- bis 2 mm-Bereich. Diese Ergebnisse werden durch den Vergleich mit den Koordinaten der Vorjahre bestätigt.

Bei den eingesetzten hybriden Messverfahren zur Bestimmung der 3D-Koordinaten im aktuellen amtlichen Koordinatensystem ETRS89/DHHN2016 mittels Tachymeter, Nivellement und GNSS wurde für die 3D-Netzausgleichungen ein lokales tangentiales nordorientiertes Koordinatensystem verwendet. In diesem maßstabsfreien Koordinatensystem können die Richtungs-, Zenitdistanz- und Streckenmessungen ohne Reduktionen eingeführt werden. Von Vorteil war auch, dass die Richtungs-, Zenitdistanz- und Streckenmessungen in zwei Vollsätzen ausgeführt wurden. Dadurch konnten mehrere grobe Fehler, z. B. bei der automatischen Messung mit der ATR, im Vorfeld eliminiert werden.

Die Verwendung eines lokalen nordorientierten dreidimensionalen Koordinatensystems bietet bei der Ausgleichung der Netzmessungen besondere Vorteile, da die Netzmessungen ohne jegliche Reduktionen dreidimensional ausgeglichen werden können. Die in der Rücktransformation berechneten UTM-Koordinaten und ellipsoidischen Höhen können anschließend mit den Quasigeoidhöhen des GCG2016 in Normalhöhen überführt werden.

Für den Fall, dass auch Feinnivellements zur Bestimmung der DHHN-Höhen durchgeführt werden, können die Höhen der 3D-Netzausgleichung als Datumshöhenpunkte in der 1D-Netzausgleichung verwendet werden.

Wenn es aufgrund des enormen Aufwandes nicht möglich ist, eine tachymetrische und/oder nivellitische Bestimmung der 3D-Koordinaten der Pass- und Kontrollpunkte durchzuführen, bietet sich die RTK-GNSS-Methode in Echtzeit an. Die Analyse der Ergebnisse der Netzmessungen aus den vergangenen Jahren zeigt, dass bei den Pass- und Kontrollpunkten mit einer hinreichenden Horizontfreiheit eine Genauigkeit in der Lage von 10 mm und in der Höhe von 15 mm mit der RTK-GNSS-Methode in Echtzeit erreichbar ist. Für höhere Genauigkeiten sind unbedingt statische GNSS-Messungen und tachymetrische

Messungen erforderlich. Die Analyse der statischen GNSS-Messungen mit RTK-GNSS-Messungen hat bei diesen Untersuchungen gezeigt, dass keine systematischen Differenzen zwischen den RTK-Messungen und den statische Auswertungen festgestellt werden konnten.

Danksagung

Dank gilt der Bezirksregierung Köln (Abteilung 7, GEObasis.nrw) für die Nutzung der Daten der SAPOS®-Dienste HEPS und GPPS.

Literatur

- Bezirksregierung Köln (2013): ViGO+ (Virtuelle Auswertungen mittels grafischer Oberfläche). www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/raumbezug/fachprogramme/lageauswertung/vigoplus/index.html, letzter Zugriff 01/2020.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2016): Quasigeoid der Bundesrepublik Deutschland. Die Höhenreferenzfläche der Arbeitsgemeinschaft der Länder GCG2016. Stand der Dokumentation 28.10.2016.
- Lösler, M. (2012): JAG3D – Ein kostenfreies Programm zur Netzausgleichung und Deformationsanalyse. tech12 – Aktuelle Trends der Messdatenauswertung in Kataster- und Ingenieurvermessung, Neitzel, F. (Hrsg.), 19./20. April, Berlin.
- Riecken, J., Ruf, B. (2013): Die Integration von GLONASS in SAPOS® – Eine Blaupause für Galileo. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2013, 138 Jg., 385–390.
- Torge, W., Müller, J. (2012): Geodesy. 4. Aufl., de Gruyter, Berlin/Boston, ISBN 3110207184.
- Wanninger, L. (2000): Präzise Positionierung in regionalen Referenzstationsnetzen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 508.

Kontakt

Manfred Bäumker
Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie
Lennershofstraße 140, 44801 Bochum
manfred.baeumker@hs-bochum.de

Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern – Die Ergebnisse verschiedener UAV-Systeme und zweier Softwarepakete im Vergleich

Thomas P. Kersten | Frederic S. Schlömer | Heinz-Jürgen Przybilla

1 Einführung

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) haben sich als unbemannte Flugsysteme mit Kameras und anderen Sensoren ausgestattet wegen des flexiblen Einsatzes seit vielen Jahren für unterschiedliche geodätische Aufgaben 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 und verschiedene günstige bis hochwertige digitale Kameras als „fliegendes Stativ“ transportieren. Eine Marktübersicht über Kameras für UAVs ist in Przybilla (2017) zusammengestellt. Für die Bestimmung der Bildorientierungen und der Kamerakalibrierung werden digitale Aerotriangulationen mit Bündelblockausgleichungen durchgeführt, wenn die Orientierungsparameter der Bilder durch entsprechende hochwertige Sensorik nicht direkt während des Bildfluges bestimmt werden können.

Erste Bildflüge mit einer digitalen Still Video Kamera Kodak DCS200 wurden bereits Mitte der 1990er Jahre in Australien (Fraser und Shortis 1995) und in der Schweiz (Kersten 1996) durchgeführt. Dabei wurde für einen Luftbildverband von 50 Bildern in Urmein (Schweiz) bei einem Bildmaßstab 1:20.000 und einer Längs- und Querüberdeckung von 60 % eine praktische Genauigkeit von $s_{xy} = 2 \text{ cm}$ und $s_z = 4 \text{ cm}$ für 30 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 eines Luftbildverbandes mit mehr als 6000 gescannten Bildern einer kalibrierten analogen Luftbildkamera über die gesamte Schweiz vor, in der der Datenfluss und die Qualitätskontrolle durch zusätzliche Softwareentwicklungen weitestgehend automatisiert wurden.

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/innen verschiedener Universitäten mit unterschiedlichen Messprogrammen, 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.

In diesem Beitrag werden die geometrische Genauigkeit von Bildflügen aktueller und am Markt erhältlicher UAV-Systeme im 3D-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund untersucht. Dazu werden die Abweichungen zu signalisierten Kontrollpunkten durch Aerotriangulation und Bündelblockausgleichung bei Verwendung unterschiedlicher Passpunktkonfigurationen bestimmt. Im Folgenden werden das UAV-Testfeld Zeche Zollern, die untersuchten UAV-Systeme und die Ergebnisse der Aerotriangulationen vorgestellt und diskutiert.

2 Das UAV-Testfeld Zeche Zollern

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 2019). 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. 1 oben). Das Testfeld besteht aus 45 signalisierten Passpunkten am Boden (Abb. 1 oben rechts), die rasterförmig über das Areal angeordnet sind (Abb. 1 unten).

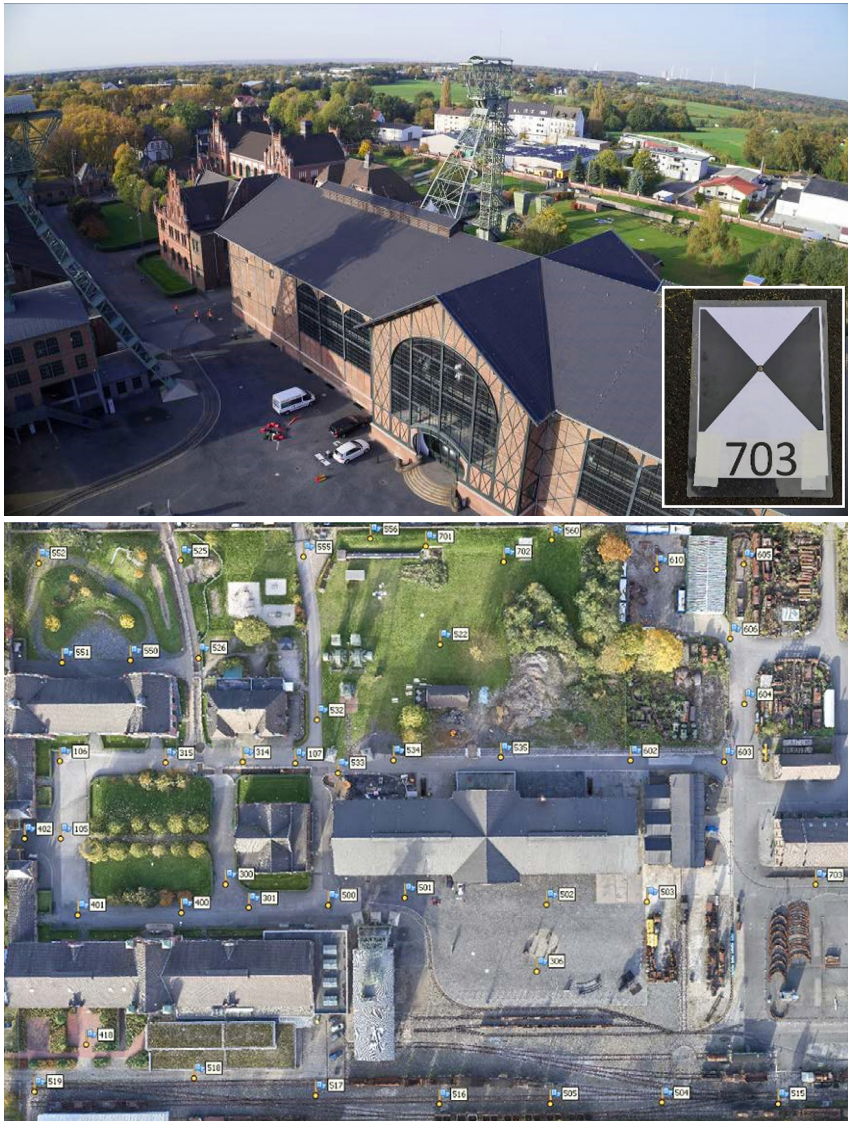


Abb. 1: Zeche Zollern – Blick auf die Fördertürme mit dem Maschinenhaus im Vordergrund (oben) und Konfiguration der signalisierten Passpunkte (unten) sowie signalisierter Passpunkt am Boden (oben rechts)

Die Passpunkte wurden durch geodätische Netzmessungen mit Tachymetern, Präzisionsnivellier und ein RTK-GNSS-System jeweils am Tag der Befliegungen (16.10.2017 und 5.11.2018) bestimmt. Eine ausführliche Beschreibung der geodätischen Messungen und der Netzausgleichung ist in Przybilla et al. (2018) und in Bäumker (2020) publiziert. Die Genauigkeiten für die Passpunkte werden für die photogrammetrischen Triangulationen der verschiedenen Bildverbände mit 5 mm in Lage und Höhe angenommen.

3 Die untersuchten UAV-Systeme

Für die Bildflüge und Untersuchungen im UAV-Testfeld standen folgende Systeme für die Kampagnen im Oktober 2017 und November 2018 zur Verfügung (Abb. 2): vier Multikopter von DJI (Phantom 4 Pro, Zenmuse X5S, Zenmuse X5S (modifizierte Optik), Inspire 2 Zenmuse X4S) und der Starr- bzw. Flächenflügler senseFly ebee (S.O.D.A. Kamera) Die wichtigen technischen Daten der UAV-Systeme und der dazugehörigen wichtigsten Bildflugparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst.

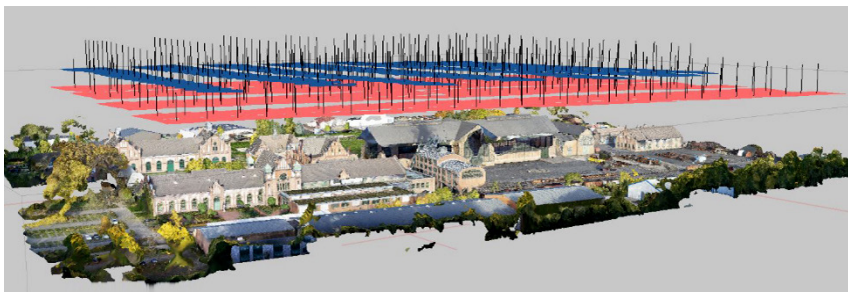


Abb. 2: Untersuchte UAV-Systeme: Oben: senseFly ebee mit S.O.D.A. (links), DJI Phantom 4 Pro mit Zenmuse X4S (rechts). Unten (v. l. n. r.): DJI Inspire 2 mit Zenmuse X4S, mit Zenmuse X5S und mit Zenmuse X5S (modifizierte Optik)

Um eine Vergleichbarkeit der UAV-Systeme im Testszenario zu gewährleisten, wurde vorab für alle Systeme eine einheitliche Bodenauflösung (GSD) von 1,36 cm festgelegt (Fluganordnung: Regular/R als Parallelflug, Abb. 3 rot). Daraus resultierend ergaben sich unterschiedliche Flughöhen für die Plattformen (Tab. 1), da sie entsprechend der jeweiligen Brennweite angepasst wurden. Weiterhin wurden Flüge in einer Kreuzanordnung (Cross/C, höhere Flughöhe quer zum 1. Flug, Abb. 3 blau) geplant, wobei die Flughöhe jeweils um 20 % von den Normalanordnungen abweicht. Die Durchführung der Kreuzbefliegung

Tab. 1: Technische Daten der eingesetzten UAV-Systeme und wichtige Parameter der Bildflüge

Plattform	senseFly ebee	DJI Inspire 2			DJI Phantom 4 Pro
Kamera	S.O.D.A.	Zenmuse X4S	Zenmuse X5S_mod	Zenmuse X5S	Zenmuse X4S
Objektiv	Integriert 10.6/2.8	Integriert 8.8/2.8	Schneider Apo-Xenoplan 24/2.0	DJI MFT ASPH 15/1.7	Integriert 8.8/2.8
Sensor	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS
Shutter	Global	Global	Rolling	Rolling	Global
Auflösung [MPx]	20	20	20,8	20,8	20
Sensor [mm]	13.1 × 8.8	13.2 × 8.8	17.3 × 13.0	17.3 × 13.0	13.2 × 8.8
Anzahl Pixel	5472 × 3648	5472 × 3648	5280 × 3956	5280 × 3956	5472 × 3648
Pixelgröße [µm]	2,4	2,4	3,28	3,28	2,4
Brennweite [mm]	10,6	8,8	24	15	8,8
Flugdatum	05.11.2018	05.11.2018	16.10.2017	16.10.2017	16.10.2017
Flughöhe Regular [m] / (# Fotos)	80 / (134)	50 / (253)	96 / (210)	60 / (203)	50 / (235)
Flughöhe Cross [m] / (# Fotos)	100 / (118)	60 / (179)	115 / (155)	72 / (154)	60 / (142)
Datenformat	JPG	JPG	RAW	RAW	RAW
GSD [mm]	19°	14°	14°	14°	14°


Abb. 3: Konfiguration der Bildflüge Regular (rot: 50 m) und Cross (blau: 60 m) mit der DJI Phantom 4 Pro über dem UAV-Testfeld

als separate Flüge hat ihren wesentlichen Grund in der Tatsache, dass die verfügbaren Bildflug-Planungstools (z. B. Map Pilot, Pix4DCapture) eine Kreuzbefliegung mit variierender Flughöhe nicht zulassen. Bis auf das System senseFly S.O.D.A. wurden bei den Bildflügen gleiche GSD-Werte erreicht, die minimal kleiner sind als die vorgegebene GSD (Tab. 1).

Die Bildspeicherung erfolgte bei den Bildflügen im Jahr 2017 für die drei eingesetzten Systeme 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 2019) generiert. Beim Speichern der RAW-Daten auf dem SD-Datenträger wird vorrangig bei den DJI-Systemen ein um den Faktor 3 höherer Zeitbedarf benötigt. 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 von typischerweise 10 m/sec bis auf ca. 3,3 m/sec bei Speicherung von RAW-Daten. Daraus folgt, dass für die Betriebsdauer einer Akkuladung auch nur ein Drittel der Fotos erzeugt werden kann. 2018 wurden die Bilddaten für die Systeme senseFly ebear S.O.D.A. und DJI Inspire 2 Zenmuse X4S standardmäßig im Format JPG gespeichert.

Die beiden untersuchten UAV-Systeme mit der Kamera Zenmuse X5S 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 ($1/\text{Bildfrequenz}$) 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 ausgelesene Bildzeile besitzt somit eine eigene äußere Orientierung. Die Bildauslesezeit bei einer Phantom 4 beträgt 33 Millisekunden (Pix4D 2019). 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 Bildauslesezeit hat sich die Phantom 4 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 Mehrbildauswertungen im Nahbereich (Rofalski und Luhmann 2017) und für die 3D-Punktbestimmung mit Bilddaten von

UAV-Systemen (Vautherin et al. 2016, Lindstaedt und Kersten 2018) untersucht und dokumentiert.

4 Die photogrammetrischen Softwarepakete

Für die Durchführung der Aerotriangulation wurden die marktgängigsten Softwarepakete Agisoft PhotoScan 1.4.4 und Pix4Dmapper 4.2.27 eingesetzt. PhotoScan ist eine preiswerte 3D-Rekonstruktionssoftware von der Firma Agisoft LLC (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 Bildaufnahmebedingungen. Die aktuelle Version ist 1.5.5. (November 2019) und wird unter dem Namen Agisoft Metashape vertrieben. 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 tangentielle 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.

Pix4Dmapper ist wie PhotoScan/Metashape eine führende Photogrammetrie-Software für das professionelle UAV-Mapping. Die Firma Pix4D ist ein Schweizer Unternehmen, das im Jahr 2011 als Spin-off des Computer Vision Lab der École Polytechnique Fédérale de Lausanne in der Schweiz gegründet wurde. Sie entwickelt eine Reihe von Softwareprodukten, die Photogrammetrie und Computer Vision Algorithmen verwenden, um aus DSLR-, Fischaugen-, RGB-, Wärme- und Multispektralbilder texturierte 3D-Karten bzw. 3D-Modelle zu generieren. Für die Kamerakalibrierung verwendet Pix4Dmapper die folgenden Parameter zur Kompensation der systematischen Bildfehler: Bildhauptpunkt, Kamerakonstante, drei radial-symmetrische und zwei tangentielle Verzeichnungsparameter.

5 Ergebnisse der Aerotriangulationen

5.1 Bildflugkonfigurationen und Passpunktversionen im Vergleich

Die Bildpunktmessungen der Verknüpfungspunkte erfolgten in beiden Softwarepaketen automatisch, während alle Passpunkte manuell gemessen wurden. Für die Generierung der jeweiligen dünnen Punktwolke wurde in Agisoft PhotoScan die Einstellung „hoch Genauigkeit“ und in Pix4Dmapper „volle Bildgröße“ als empfohlene Parameter verwendet, wodurch in beiden Softwares nur die halbe Bildgröße zur Punktmessung verwendet wurde. Die Ausgleichungen der Messungen wurde mit verschiedenen Passpunktkonfigurationen durchgeführt: 45 Passpunkte (Version 1), 22 Passpunkte und 23 Kontrollpunkte (Version 2), 12 Passpunkte und 33 Kontrollpunkte (Version 3) sowie 5 Passpunkte und 40 Kontrollpunkte (Version 4). In diesem Beitrag wurden nur die Ergebnisse der beiden Versionen 2 und 3 für die fünf untersuchten UAV-Systeme zusammengestellt, da sie realistische Szenarien mit einer genügenden Anzahl von gut verteilten Passpunkten und einer hohen Anzahl an Kontrollpunkten darstellen. Zusätzlich wurde für die im Jahr 2017 erfolgten Bildflüge der Einfluss des Bildformates TIFF und JPG auf das Ergebnis der Aerotriangulation untersucht. Zudem konnte der Einfluss der Aufnahmekonfigurationen (Regulärer Bildflug und Kreuzbefliegung) auf das Ergebnis der Aerotriangulation analysiert werden. In den Bündelblockausgleichungen der Kreuzbefliegungen wurde jeweils für die beiden Bildflüge immer eine gemeinsame Kamerakalibrierung durchgeführt. Im Kapitel 5.2. werden die Ergebnisse gemeinsamer und separater Kamerakalibrierung im Vergleich gegenübergestellt, um die Auswirkungen auf das Ergebnis aufzuzeigen. Erste detaillierte Ergebnisse über reguläre Bildflüge und den entsprechenden Kreuzbefliegungen verschiedener UAV-Systeme im Vergleich sind bereits in Przybilla (2019) veröffentlicht. Die Auswirkungen von unterschiedlichen Passpunktkonfigurationen auf die Ergebnisse von Aerotriangulationen und abgeleiteter Produkte (z. B. Oberflächenmodelle) sind in Lindstaedt und Kersten (2018) publiziert.

In den [Abb. 5](#) und [Abb. 6](#) werden die durchschnittlichen Abweichungen an den Kontrollpunkten (für X, Y und Z sowie für den Raumvektor) nach der Ausgleichung in PhotoScan bzw. Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) von dem UAV-System senseFly S.O.D.A. vorgestellt.

Aus den beiden Grafiken der [Abb. 4](#) und [Abb. 5](#) ist ersichtlich, dass die Abweichungen an den Kontrollpunkten in PhotoScan generell etwas besser sind als in Pix4Dmapper. Das trifft insbesondere auf die Z-Koordinate zu. Die Abweichungen in der Lage sind in PhotoScan für beide Bildflug- und Passpunktkonfigurationen mit 3 bis 4 mm sehr gut. Das wird in Pix4Dmapper nur annähernd in der Kreuzbefliegung erreicht, während der reguläre Bildflug mit Lageabwei-

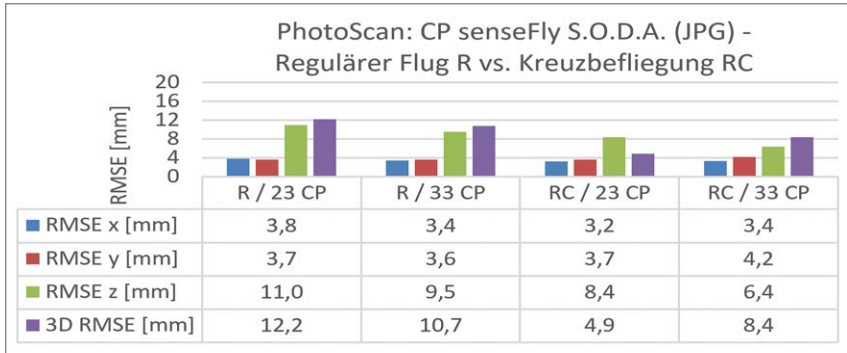


Abb. 4: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) der senseFly S.O.D.A.

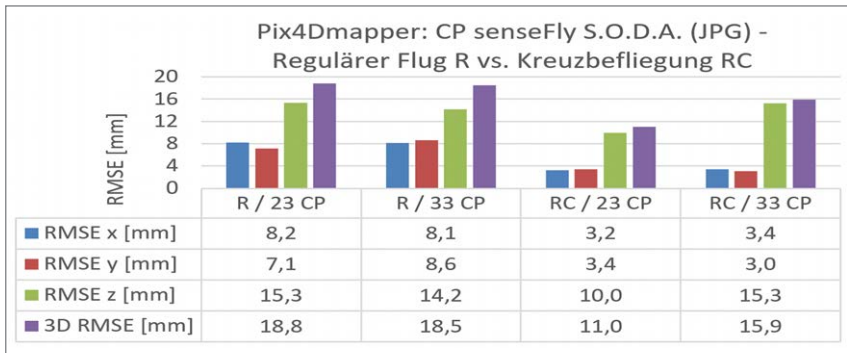


Abb. 5: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) von der senseFly ebee S.O.D.A.

chungen von 7 bis 9 mm deutlich schlechter abschneidet. Bei den Ergebnissen der senseFly zeigt sich, dass die Kreuzbefliegung insbesondere in Pix4Dmapper ein signifikant besseres Resultat liefert.

Die Ergebnisse der Aerotriangulationen für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X4S sind in den [Abb. 6](#) und [Abb. 7](#) zusammengefasst. Auch hier zeigt sich, dass einerseits die Kreuzbefliegung in beiden Softwarepaketen bessere Ergebnisse bzw. geringe Abweichungen an den Kontrollpunkten liefert, und dass andererseits mit PhotoScan insgesamt bessere Ergebnisse in den Lage- und Höhenabweichungen der Kontrollpunkte erreicht werden. Die Ergebnisse der DJI Inspire 2 X4S liegen in dem Genauigkeitsniveau der senseFly S.O.D.A.

In den [Abb. 8](#) und [Abb. 9](#) sind die Ergebnisse der Aerotriangulationen für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X5S mit dem modifizierten Objektiv, das mit 24 mm eine längere Brennweite aufweist, zusammengefasst. Durch die lange

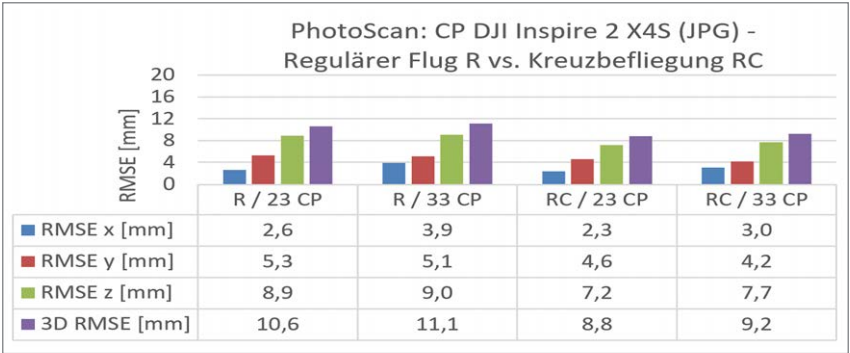


Abb. 6: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) von der DJI Inspire 2 X4S

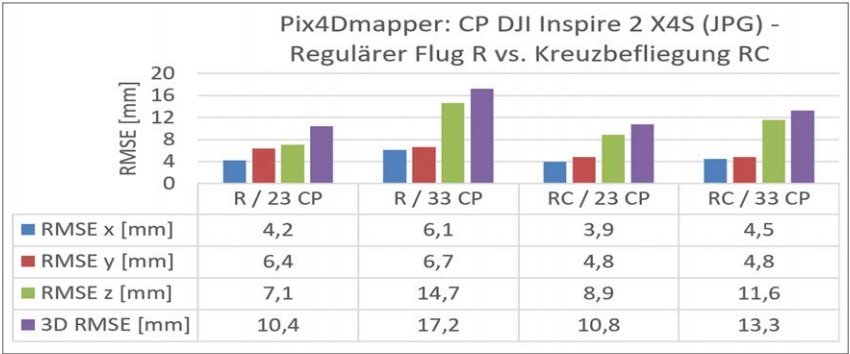


Abb. 7: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X4S

Brennweite – verglichen mit den anderen Systemen – wird wegen der größeren Flughöhe eine geringe Genauigkeit in der Höhe erwartet. Die Höhengengenauigkeit wird mit $\sigma_z = 0,1 \text{ ‰ } h_g$ (= Flughöhe über Grund) für dieses UAV-System von $\sigma_z = 1 - 1,2 \text{ cm}$ abgeschätzt. Die Ergebnisse in den Abb. 9 und Abb. 10 zeigen jedoch, dass die theoretische Höhengengenauigkeit bei weitem nicht erreicht wurde. Insbesondere das Ergebnis des regulären Fluges weist in Pix4Dmapper unerklärlich hohe Abweichungen an den Kontrollpunkten in Lage und Höhe auf. Erst durch die Kreuzbefliegung werden diese Abweichungen signifikant reduziert, allerdings nur in der Lage. Die Abweichungen in der Höhe sind zwar deutlich geringer geworden, doch immer noch um den Faktor 4 bis 5 höher als die Lage, was vermutlich auf Probleme bei der Kalibrierung der Kamerakonstante aufgrund der Instabilität des Sensors und des Objektivs zurückzuführen ist.

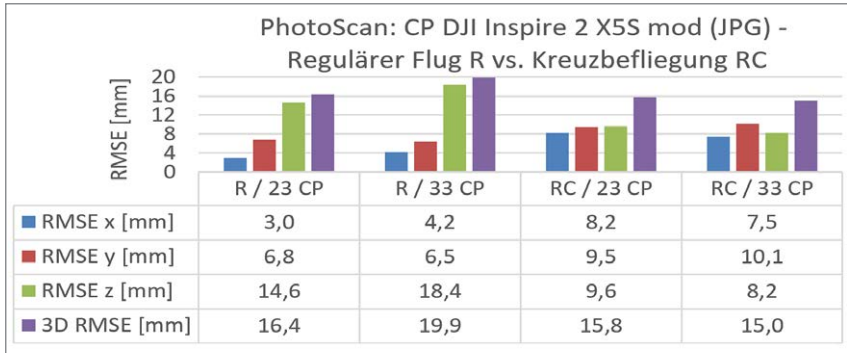


Abb. 8: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) von der DJI Inspire 2 X5S_mod

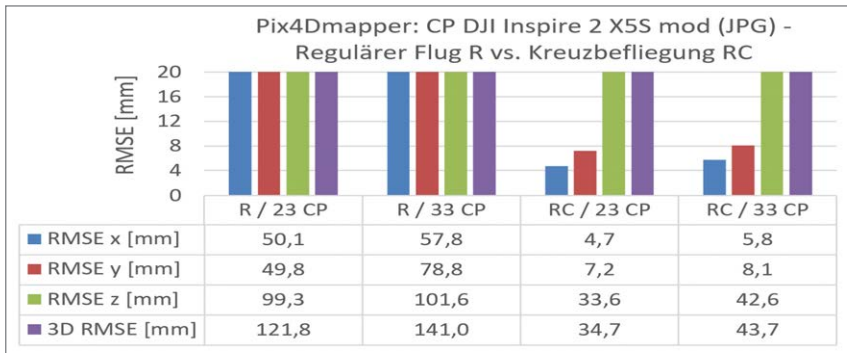


Abb. 9: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X5S_mod

Ein ähnliches Verhalten zeigt auch die DJI Inspire 2 X5S mit dem herstellereigenen Objektiv mit einer Brennweite von 15 mm. Die Ergebnisse für dieses UAV-System sind in den [Abb. 10](#) und [Abb. 11](#) zusammengefasst. Auch hier zeigen sich unerklärlich hohe Abweichungen für den regulären Flug bei der Auswertung mit Pix4Dmapper, während die Abweichungen an den Kontrollpunkten für die Kreuzbefliegung signifikant geringer sind und somit ein akzeptables Resultat im Vergleich zu anderen Systemen darstellen. Bei diesem System werden die Lageabweichungen für die Kreuzbefliegung in PhotoScan sogar deutlich größer, während die Höhenabweichungen signifikant geringer werden. Insgesamt lassen die Ergebnisse der DJI Inspire 2 X5S mit beiden eingesetzten Objektiven eine instabile Kamera vermuten, da die anderen UAV-Systeme deutlich bessere und stabilere Ergebnisse bei den Abweichungen an den Kontrollpunkten zeigen.

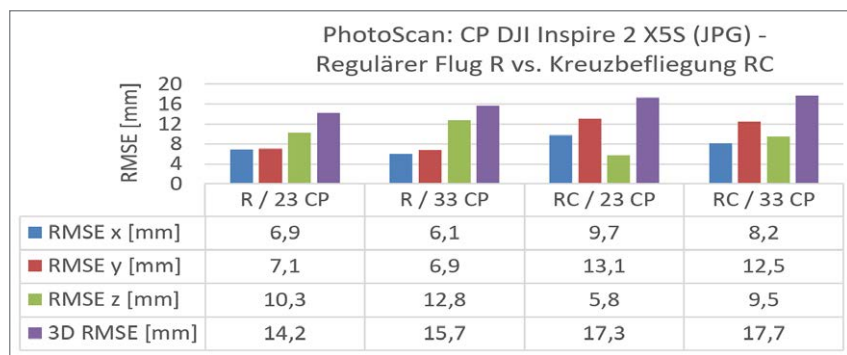


Abb. 10: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) von der DJI Inspire 2 X5S

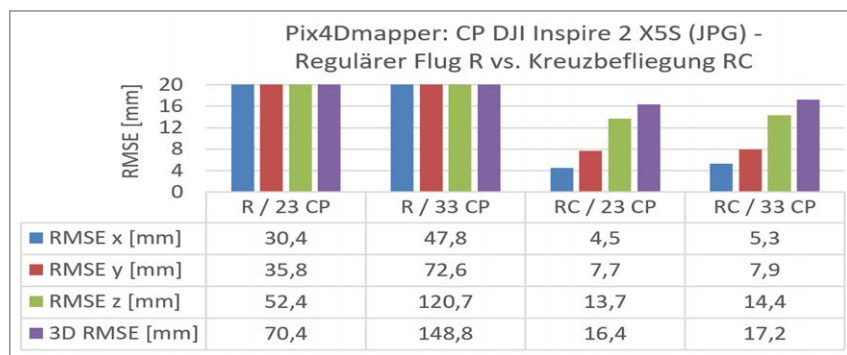


Abb. 11: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X5S

Die besten Ergebnisse in den Aerotriangulationen werden mit der DJI Phantom 4 Pro für beide eingesetzten Softwarepakete erreicht (Abb. 12 und Abb. 13). Für die Kreuzbefliegung erzielen PhotoScan und Pix4Dmapper mit Abweichungen von 3 mm in der Lage und 5 bis 6 mm in der Höhe sehr ähnliche Resultate, die den Erwartungen bzw. den a-priori-Abschätzungen entsprechen. Bei einem Bildmaßstab von 1:6800 und einer Bildmessgenauigkeit von $\frac{1}{4}$ Pixel sollte für die Phantom 4 Pro eine Lagegenauigkeit von 4 mm zu erreichen sein, die durch die Ergebnisse in Abb. 13 und Abb. 14 bestätigt wird. Die insgesamt homogenen und sehr guten Ergebnisse in beiden Softwarepaketen lassen auf eine stabile Kamera in der DJI Phantom 4 Pro schließen.

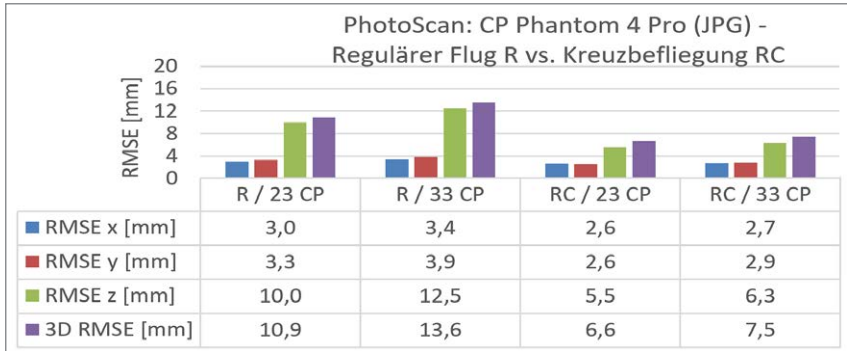


Abb. 12: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) von der DJI Phantom 4 Pro

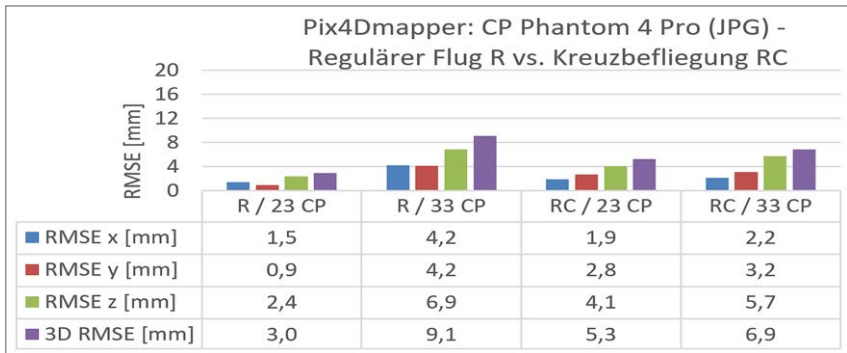


Abb. 13: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) der DJI Phantom 4 Pro

5.2 Auswirkungen auf die Kamerakalibrierungsparameter

Um die Auswirkungen der verschiedenen Passpunktkonfigurationen und der zwei Bildflugkonfigurationen (Regulär vs. Kreuzbefliegung) auf die Berechnung der Kamerakalibrierungsparameter beurteilen zu können, sind in [Abb. 14](#) und [Abb. 15](#) die Veränderungen der Parameter der inneren Orientierung für die beiden Softwarepakete zusammengestellt worden. Als Beurteilungskriterien wurden die Abweichungen der berechneten Kamerakonstanten von der nominellen Brennweite ($f = 8,8 \text{ mm}$ bzw. $3636,36 \text{ Pixel}$) und der ausgeglichenen Bildhauptpunktkoordinaten vom Bildmittelpunkt herangezogen. Die grafische Darstellung und die Zahlenwerte in [Abb. 16](#) zeigen, dass die Parameter der inneren Orientierung nur bei den Ergebnissen der Kreuzbefliegung ([Abb. 14](#) rechts)

in PhotoScan stabil bleiben, während beim Flug Regular in PhotoScan und bei beiden Flugkonfigurationen in Pix4Dmapper die Kamerakalibrierungsparameter zwischen einem und 32 Pixel streuen. Das bestätigt einerseits, dass die innere Geometrie der eingesetzten UAV-Kameras nicht sehr stabil ist, aber dass andererseits mit entsprechender Bildflugkonfiguration und Software quasi-stabile Kameraparameter erhalten werden können. Mit den unterschiedlichen Flughöhen in der Kreuzbefliegung wird die Kamerakonstante signifikant bestimmt, was

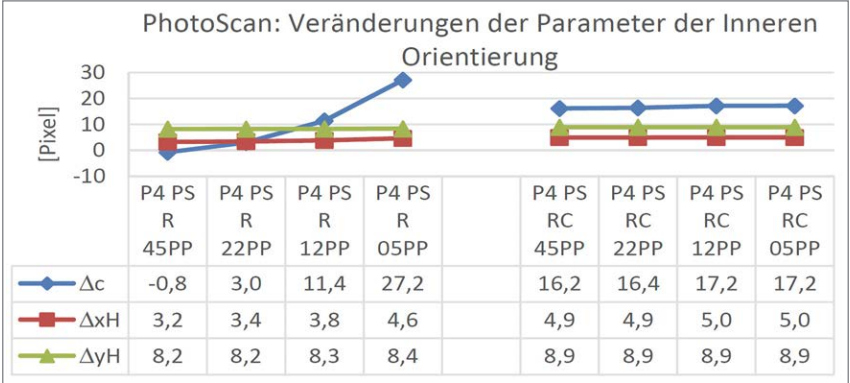


Abb. 14: Veränderungen der inneren Orientierung (Kamerakonstante c , Bildhauptpunkt x_H und y_H) in den verschiedenen Passpunktversionen der Aerotriangulation (45 PP bis 5 PP) für die zwei Bildflugkonfigurationen (regulärer Flug R vs. Kreuzbefliegung RC) mit der DJI Phantom 4 Pro (P4) in PhotoScan

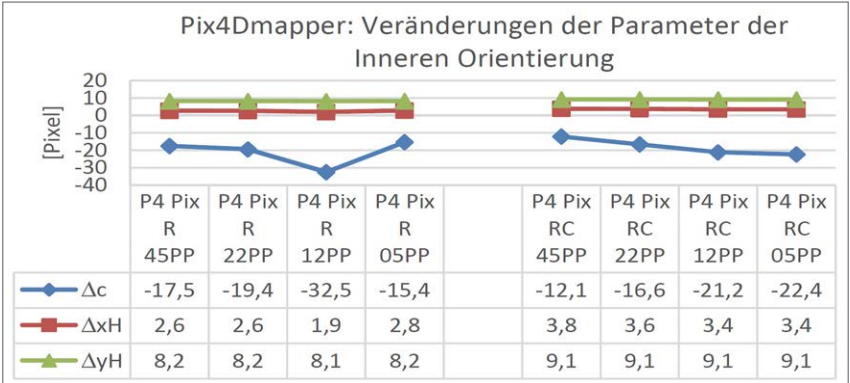


Abb. 15: Veränderungen der inneren Orientierung (Kamerakonstante c , Bildhauptpunkt x_H und y_H) in den verschiedenen Passpunktversionen der Aerotriangulation für die zwei Bildflugkonfigurationen (regulärer Flug R vs. Kreuzbefliegung RC) mit der DJI Phantom 4 Pro in Pix4Dmapper

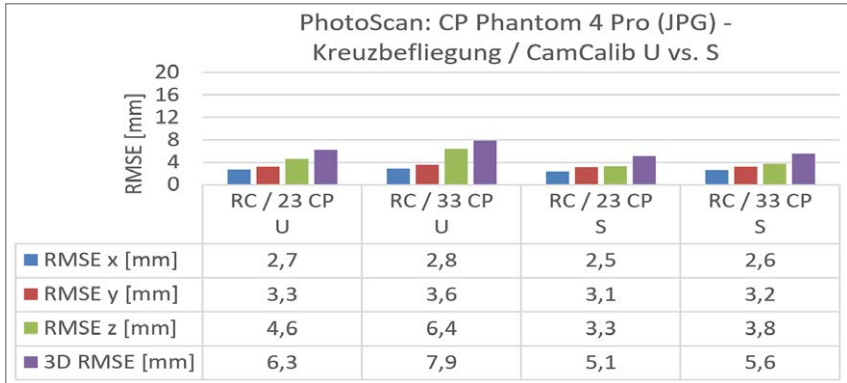


Abb. 16: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten der DJI Phantom 4 Pro (JPG) – Vergleich von gemeinsamer (U = Unified, links) und separater (S = Separate, rechts) Kamerakalibrierung bei der Kreuzbefliegung

durch eine deutlich geringe Standardabweichung (Faktor 2) bestätigt wird. Da der Bildhauptpunkt x_H sehr stark mit der Kamerakonstante korreliert, hat das auch positive Auswirkungen auf die Bestimmung des Bildhauptpunktes.

Eine Kreuzbefliegung hat je nach UAV-System oft zur Folge, dass wegen der geringen Batterieleistung zwei separate Bildflüge durchgeführt werden müssen. Da während des Batteriewechsels das System ab und wieder angestellt wird, entstehen konsequenterweise auch zwei unterschiedliche innere Kamerageometrien, die in der Bündelbockausgleichung entsprechend berücksichtigt werden müssten. In Abb. 16 sind die Ergebnisse beider Varianten (gemeinsame und separate Kamerakalibrierung) für die Kreuzbefliegung mit der DJI Phantom 4 Pro zusammengefasst. Die Abweichungen an den Kontrollpunkten zeigen bei beiden Passpunktversionen eine leichte Verbesserung für die gemeinsame Ausgleichung mit separater Kamerakalibrierung. Das ist wiederum ein weiteres Zeichen, dass die Parameter der inneren Orientierung nicht sehr stabil sind.

5.3 Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes

Um die Auswirkungen des Rolling-Shutter-Effektes auf die Ergebnisse der Aerotriangulation zu zeigen, wurden beispielhaft für die Kreuzbefliegung der DJI Inspire 2 X5S die Abweichungen an den Kontrollpunkten mit der Software PhotoScan berechnet. In Abb. 17 ist dargestellt, dass eine Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes signifikante Verbesserungen in den Ergebnissen bringt.

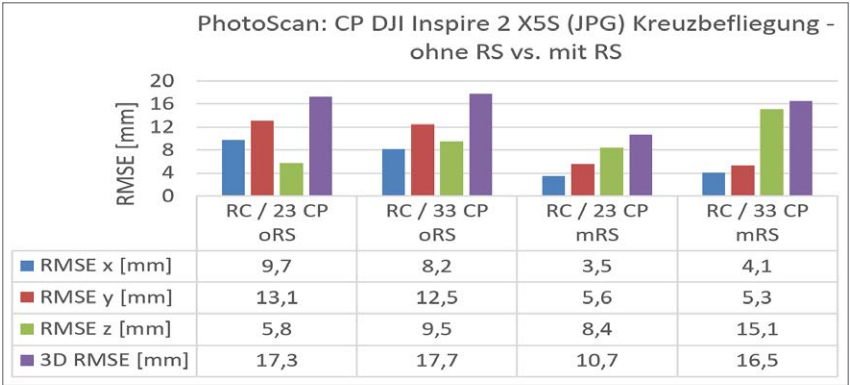


Abb. 17: Auswirkungen des Rolling-Shutter-Effektes für die Kreuzbefliegung der DJI Inspire 2 X5S – ohne Rolling Shutter (oRS) und mit Rolling Shutter (mRS)

Ohne die Kompensation des Effektes erhalten besonders die Abweichungen in der Y-Koordinate der Kontrollpunkte einen hohen Wert, da sich vermutlich u. a. die Richtung einer der beiden Bildflüge in diese Koordinatenachse bewegt. Durch die Berücksichtigung des Rolling-Shutter-Effektes werden die Lagekoordinaten deutlich besser, während die Höhenkoordinaten wie erwartet etwas schlechter werden. Die Anzahl der Passpunkte und deren Verteilung im Aufnahmegebiet scheinen einen Einfluss auf die Kompensation des Effektes zu haben, wie auch bereits in Lindstaedt und Kersten (2018) bestätigt wurde.

5.4 Auswirkungen der Datenkomprimierung

Welche Auswirkungen die Datenkomprimierung auf die Ergebnisse der Aerotriangulationen (Abweichungen an den Kontrollpunkten) hat, ist exemplarisch für die Aerotriangulationen der Bilddaten von der DJI Phantom 4 Pro mit der Software PhotoScan in Abb. 18 dargestellt. Wie bereits oben erwähnt, wurde aus den aufgenommenen RAW-Bilddaten neben dem verlustfreien TIF-Format das JPG-Format (Kompressionsrate 80 %) mit der Software „CaptureOne“ (PhaseOne 2019) generiert. In den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist der Einfluss des Bilddatenformates (TIF vs. JPG) aufgrund der leichten Komprimierungsrate vernachlässigbar gering, was in den fast identischen Abweichungen an den Kontrollpunkten in Abb. 18 ersichtlich wird, d. h. die durch eventuelle Kompressionsverluste zu erwartenden Änderungen der JPG-basierten Aerotriangulationsergebnisse gegenüber denen aus TIFF-Daten sind nicht signifikant. Diese Bewertung wird sowohl durch die Vergleiche der Ergebnisse der anderen UAV-Systeme (Schlömer 2019), als auch bei geometrischen Untersuchungen zur

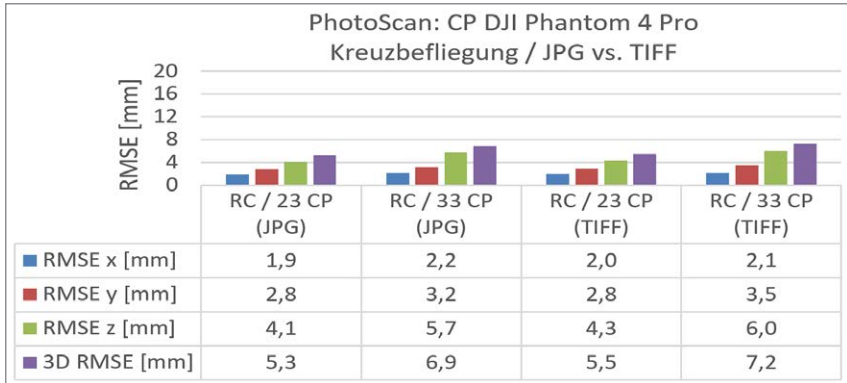


Abb. 18: Vergleich der Aerotriangulationsergebnisse (Abweichungen an den Kontrollpunkten für die Versionen 23 und 33 CPs) für die Kreuzbefliegung der DJI Phantom 4 Pro mit den verschiedenen Datenformaten JPG und TIFF in PhotoScan

Qualität bildbasierter Punktwolken aus UAV-Bildflügen über dem Testfeld bestätigt (Przybilla et al. 2019).

6 Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen fassen die Aerotriangulationsergebnisse von UAV-gestützten Bildflügen mit fünf verschiedenen UAV-Systemen von DJI (Phantom 4 Pro, Zenmuse X5S, Zenmuse X5S_mod, Inspire 2 Zenmuse X4S) und von senseFly S.O.D.A. zusammen. Dabei wurden unterschiedliche Ergebnisse mit den beiden Softwarepaketen je UAV-System erreicht. Insgesamt können aus den dargestellten Ergebnissen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Abweichungen an den Kontrollpunkten liegen für die meisten Systeme in dem erwarteten bzw. abgeschätzten Genauigkeitsniveau von 5 bis 6 mm in der Lage und ca. 1 cm in der Höhe.
- Die Bildflüge der DJI Phantom 4 Pro liefern die besten Ergebnisse mit 2 bis 3 mm in der Lage und 4 bis 6 mm in der Höhe.
- Die Kreuzbefliegung bringt signifikant bessere Ergebnisse als der reguläre Bildflug, da durch die unterschiedliche Flughöhen und den gedrehten Bildern die inneren Orientierungsparameter signifikant bestimmt werden können. Bildflüge mit Kreuzbefliegung (Querstreifen) und mit Aufnahmen aus verschiedenen Höhen und Perspektiven (schräg) unterstützen somit eine zuverlässige Simultankalibrierung der zumeist unkalibrierten UAV-Kameras. Die aus dem bemannten Bildflug generierten Erfahrungen und die daraus ab-

geleitete Expertise der Luftbildphotogrammetrie aus Zeiten vor der direkten Georeferenzierung haben somit heute auch für Bildflüge mit Low-Cost-UAVs noch Gültigkeit und müssen berücksichtigt werden.

- Eine leichte Genauigkeitssteigerung wird erreicht, wenn die Kameras von mehreren Bildflügen separat kalibriert werden, da davon ausgegangen werden kann, dass sich die innere Kamerageometrie nach einem Batteriewechsel und abgeschaltetem System verändert.
- Die unterschiedlichen Ergebnisse derselben Bildflüge in den beiden Softwarepaketen lassen sich auch durch die verschiedenen Parameter der inneren Orientierung erklären. Die hohen Abweichungen an den Kontrollpunkten für die Aerotriangulationen der beiden DJI Inspire 2 X5S lassen eine unzureichende Kamerakalibrierung mit der Software Pix4Dmapper vermuten.
- In den vorgestellten Untersuchungen hat sich wie auch in Lindstaedt und Kersten (2018) 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.

In Zukunft kann die Anzahl der Passpunkte für UAV-basierte Bildflüge signifikant reduziert werden, da zunehmend UAV-Systeme mit RTK-GNSS (mit Zweifrequenz-Empfängern), wie z. B. die DJI Phantom 4 Pro RTK (www.dji.com/de/phantom-4-rtk/info) und die DJI Phantom 4 Pro Klau PPK (<https://klauppk.com/>) auf den Markt drängen. Dann können die Aufnahmepositionen mit Genauigkeiten von besser als 3 cm in Lage und Höhe bestimmt werden. Przybilla et al. (2015) wiesen bereits 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. Grün und Runge (1988) zeigten in Untersuchungen mit zwei filmbasierten Luftbildverbänden, dass die Anzahl der Passpunkte auf das absolute Minimum von einem reduziert werden kann, wenn die Bildorientierungen mit genügender Genauigkeit gemessen werden können.

UAV-basierte Bildflüge mit RTK-GNSS wurden schon auf dem Testfeld der Zeche Zollern Ende September und Anfang Oktober 2019 durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Jahr 2020 veröffentlicht und man darf gespannt sein, wie die Ergebnisse aussehen und welche Herausforderungen noch gemeistert werden müssen.

Dank

Wir bedanken uns bei Prof. Dr.-Ing. Manfred Bäumker (Hochschule Bochum) und den Studierenden der Wahlpflichtveranstaltung „Ingenieurvermessung“ 2017 und 2018 des Studiengangs Vermessung der Hochschule Bochum für die Passpunktbestimmung auf der Zeche Zollern.

Literatur

- Bäumker, M. (2020): Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagenternetzes am Beispiel des UAV-Testfelds Zeche Zollern. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Augsburg, 103–120. (Dieser Tagungsband).
- Fraser, C. S., Shortis, M. R. (1995): Metric exploitation of still video imagery. The Photogrammetric Record, 15(85), 107–122.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (1), 17–30.
- Grün, A., Runge, A. (1988): The accuracy potential of self-calibrating aerial triangulation without control. The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, 27, 245–253.
- Jacobsen, K., Cramer, M., Ladstädter, R., Ressler, C., Spreckels, V. (2010): DGPF-project: evaluation of digital photogrammetric camera systems – geometric performance. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, (2), 83–97.
- Kersten, T. (1996): Aerotriangulation mit einer digitalen Stillvideo Kamera Kodak DCS200. VPK – Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 2, 70–74.
- Kersten, T. (1999): Digitale Aerotriangulation über die ganze Schweiz. VPK – Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 9, 473–478.
- 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., 3–13. DOI: [10.12902/zfv-0145-2016](https://doi.org/10.12902/zfv-0145-2016).
- Lindstaedt, M., Kersten, T. (2018): Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 81–101.
- Luhmann, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Beispiele. 4., neu bearb. u. erw. Aufl., Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 783 S.
- Phase One (2019): Capture One Pro. www.captureone.com/de-DE/products/pro, letzter Zugriff 01/2020.
- Pix4D (2019): Innovation – Improved Accuracy for Rolling Shutter Cameras in Pix4Dmapper. <https://pix4d.com/rolling-shutter-correction/>, letzter Zugriff 11/2019.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Augsburg, 51–66.

- Przybilla, H.-J. (2019): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit aktueller bildgebender UAV-Sensoren. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 28, 483–497.
- Przybilla, H.-J., Kraft, T., Gessner, M., Zurhorst, A. (2017): Untersuchungen und erste Ergebnisse zur geometrischen Qualität marktgängiger Kameras für den UAV-Einsatz. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 235–245.
- Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., Kersten, T. (2019): Untersuchungen zur Qualität bildbasierter Punktwolken aus UAV-Bildflügen. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 236–248.
- 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, 45–54.
- Rofalski, R., Luhmann, T. (2017): Untersuchung und Modellierung des Rolling-Shutter-Effekts für photogrammetrische Einzel- und Mehrbilddauswertungen. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 388–398.
- Schlömer, F. (2019): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen UAV-basierter Bildflüge und Punktwolken. Unveröffentlichte Masterarbeit im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik der HafenCity Universität Hamburg, 137 S.
- 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), 139–146.
- Wikipedia (2019): Industriemuseum Zeche Zollern, Dortmund-Bövinghausen. https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche_Zollern, letzter Zugriff 11/2019.

Kontakt

Thomas P. Kersten

HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning

Überseeallee 16, 20457 Hamburg

thomas.kersten@hcu-hamburg.de

Frederic S. Schlömer

Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung

Neuenfelder Straße 19, 21109 Hamburg

FredericSebastian.Schloemer@gv.hamburg.de

Heinz-Jürgen Przybilla

Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie

Lennerhofstraße 140, 44801 Bochum

heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de

Zur Qualität dichter Punktwolken aus UAV-basierten Bildflügen

Thomas P. Kersten | Maren Lindstaedt

1 Einführung

3D-Punktwolken beeinflussen seit den 1990er Jahren zunehmend den beruflichen Alltag bei geodätischen Aufgaben, wenn es um die 3D-Erfassung und Modellierung von Objekten und der Topographie geht. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) haben sich als unbemannte Flugsysteme mit Kameras und anderen Sensoren ausgestattet wegen des flexiblen Einsatzes seit vielen Jahren für die Erzeugung von bildbasierten Punktwolken etabliert. Daher stellt sich die Frage, welche Qualität kann bei der Erstellung von bildbasierten Punktwolken aus UAV-Bildflügen erzielt werden? Wesentliche Faktoren für die Genauigkeit bei der Generierung von dichten Punktwolken aus Bilddaten sind die eingesetzte Kamera, die Bildorientierung, der Bildmaßstab und die Bildauflösung, die Farbe, die Textur und das Material des Objektes bzw. der Topographie, die Algorithmen der verwendeten Software zur Erstellung von Punktwolken und die gewählte Punktdichte. Fragestellungen zur Qualität bildbasierter Punktwolken wurden in verschiedenen Publikationen erörtert (Kersten und Lindstaedt 2012, Kersten et al. 2016, d'Oleire-Oltmanns und Lackner 2018, Zhang et al. 2018, Haala et al. 2019), während in Przybilla et al. (2019) erste Ergebnisse zur Qualität von Punktwolken aus Bilddaten einer Mittelformatkamera (Phase One) über dem Testfeld Zeche Zollern vorgestellt wurden.

In diesem Beitrag wird die geometrische Qualität von aus UAV-Bildflügen generierten 3D-Punktwolken untersucht und dargestellt. Dazu werden die punkt-, linien- und flächenhaften Abweichungen der Punktwolken zur Referenz von verschiedenen UAV-Systemen in zwei Testgebieten bestimmt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen für die verwendeten Datensätze vorgestellt und diskutiert.

2 Die Untersuchungsgebiete

Für die Untersuchungen von Punktwolken standen Bildflugdaten von verschiedenen UAV-Systemen über der Zeche Zollern in Dortmund sowie der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet, geflogen mit

einer Phantom 4 Pro, zur Verfügung. Die Zeche Zollern wird seit einigen Jahren von der Hochschule Bochum als UAV-Testfeld (Abb. 1 oben) genutzt, welches bereits in Przybilla et al. (2018) und in diesem Tagungsband auf Seite 122 von Kersten et al. (2020) beschrieben wird.

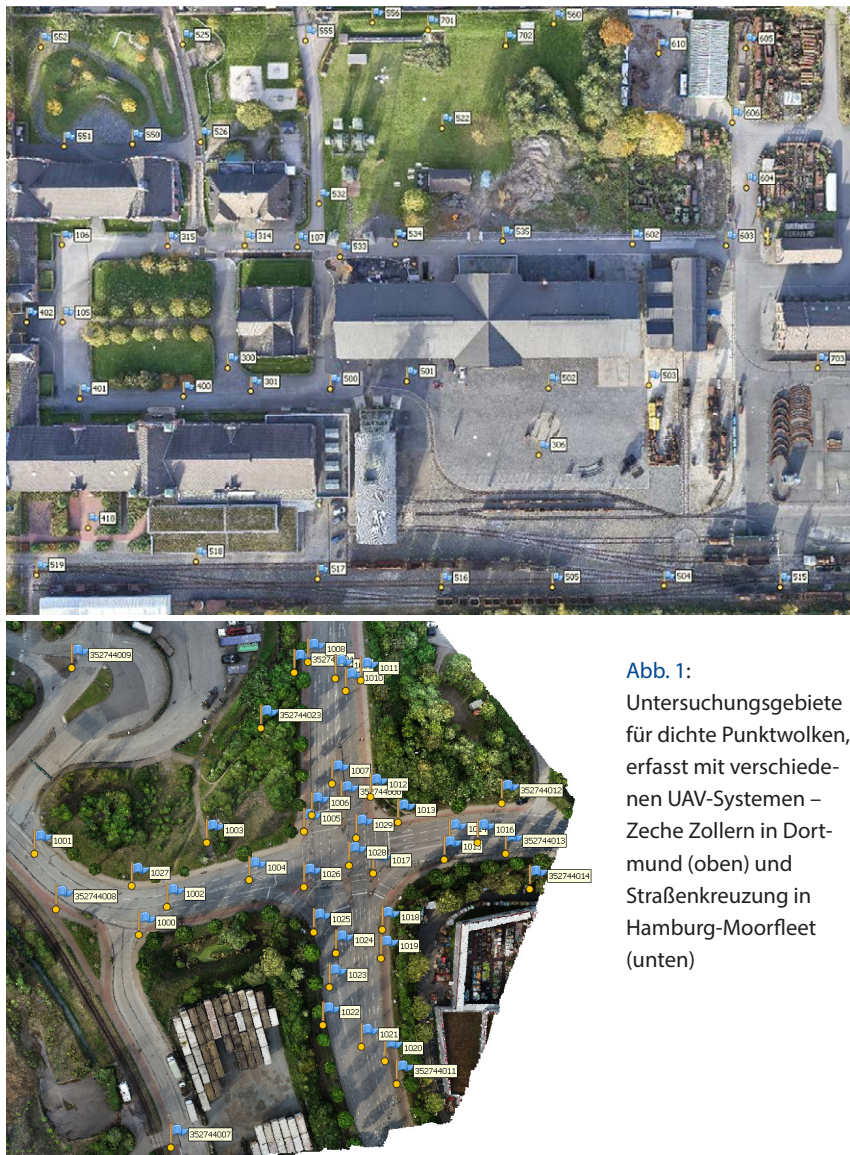


Abb. 1:
Untersuchungsgebiete
für dichte Punktwolken,
erfasst mit verschiedenen
UAV-Systemen –
Zeche Zollern in Dort-
mund (oben) und
Straßenkreuzung in
Hamburg-Moorfleet
(unten)

Die Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet wurde im Jahr 2019 in einem gemeinsamen Projekt des Labors für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg und des Landesbetriebs Geoinformation und Vermessung (LGV) der Freien und Hansestadt Hamburg durch einen UAV-Bildflug erfasst. Die viel befahrene Straßenkreuzung stellt ein eher flaches Gelände mit einer Ausdehnung von $200 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ (ca. 3 ha) dar (Abb. 1 unten).

Die mit weißer Sprühkreide signalisierten Passpunkte ($8 \times 8 \text{ cm}$) der Straßenkreuzung wurden durch geodätische Netzmessungen mit Tachymetern bestimmt. Die durch Netzausgleichung und Feinnivellement bestimmten Passpunkte des LGV liegen einer Genauigkeit von $\sigma_{XYZ} < 10 \text{ mm}$ vor. Zusätzlich wurden weitere Passpunkte mittels freier Stationierung mit einer Genauigkeit von $\sigma_{XYZ} = 2 \text{ mm}$ hinzugefügt. Für die Aerotriangulation wurden die Passpunkte mit einer Standardabweichung von $\sigma_{XYZ} = 5 \text{ mm}$ gewichtet.

3 Die eingesetzten UAV-Systeme

Für die Bildflüge und Untersuchungen der Punktwolken vom UAV-Testfeld wurden folgende Systeme in den Kampagnen im Oktober 2017 und November 2018 eingesetzt (Abb. 3 auf S. 125 in Kersten et al. 2020):

- DJI Phantom 4 Pro mit Zenmuse X4S,
- DJI Inspire 2 mit Zenmuse X5S ($c = 15 \text{ mm}$),
- DJI Inspire 2 mit Zenmuse X5S (modifizierte Optik mit $c = 24 \text{ mm}$),
- DJI Inspire 2 mit Zenmuse X4S) und
- der Starr- bzw. Flächenflügler senseFly ebee (S.O.D.A. Kamera).

Die wichtigen technischen Daten der UAV-Systeme und der dazugehörigen wichtigsten Bildflugparameter sind in Kersten et al. (2020) in der Tab. 1 (S. 125) zusammengefasst. Zusätzlich wurden die mit einer Mittelformatkamera des Herstellers Phase One (IXU 1000) (Phase One 2019) im Oktober 2017 aufgenommenen Daten analysiert. Der Sensor verfügt über 100 MPixel und wurde auf einer Trägerplattform der Firma Coptersystems (2019) eingesetzt. Die technischen Daten der Phase One sind in Przybilla et al. (2019) beschrieben. Alle Bildflüge mit den oben aufgeführten UAV-Systemen wurden in einer Kreuzanordnung mit unterschiedlicher Flughöhe quer zum 1. Flug durchgeführt, wobei die Flughöhe jeweils um 20 % von den Normalanordnungen abweicht. Die Durchführung der Kreuzbefliegung als separate Flüge hat ihren wesentlichen Grund in der Tatsache, dass die verfügbaren Bildflug-Planungstools (z.B. Map Pilot, Pix4DCapture) eine Kreuzbefliegung mit variierender Flughöhe nicht zulassen. Eine ausführliche Beschreibung der geodätischen Passpunktbestimmung ist in

Przybilla et al. (2018) und in Bäumker (2020) publiziert. Die Genauigkeiten für die Passpunkte wurden mit 5 mm in Lage und Höhe angenommen.

Der Bildflug der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet erfolgte am 28.4.2019 mit der DJI Phantom 4 Pro in einer Kreuzbefliegung (ca. 33 m bzw. 50 m über Grund) unter guten Wetter- und Sichtbedingungen. Insgesamt wurden 1013 Fotos trianguliert und für die Erzeugung der Punktwolken verwendet.

4 Die eingesetzten photogrammetrischen Softwarepakete

Für die Durchführung der Aerotriangulationen aller Bildflüge des UAV-Testfeldes und für die Generierung dichter Punktwolken wurden die Softwarepakete Agisoft PhotoScan 1.4.4 und Pix4Dmapper 4.2.27 eingesetzt. Die Straßenkreuzung in Hamburg wurden dagegen mit Agisoft Metashape Professional Version 1.5.1 ausgewertet. Die Software von Agisoft und Pix4D wird in diesem Tagungsband auf Seite 127 in Kersten et al. (2020) kurz vorgestellt.

5 Untersuchungsergebnisse

Die in den Berechnungen erzeugten dichten Punktwolken bilden die Grundlage der Untersuchungen. Die verfügbaren Passpunkte werden als Kontrollpunkte verwendet, um punktuelle Abweichungen zu den dichten Punktwolken zu ermitteln. Nachfolgend werden über Profilverläufe linienhafte Vergleiche der Punktwolken vorgenommen. Abschließend erfolgen Vergleiche der verschiedenen Punktwolken über ausgewählte Flächen der Zeche Zollern, die variierenden Oberflächenstrukturen repräsentieren. Als Referenzdaten wurden hierfür Punktwolken durch terrestrisches Laserscanning erstellt.

5.1 Punktuelle Vergleiche durch Kontrollpunkte

Für die punktuellen Vergleiche wird der kürzeste Abstand (in vertikaler Richtung) zwischen den Kontrollpunkten (CP) und der dichten Punktwolke berechnet. Die Verteilung der Kontrollpunkte ist für beide Untersuchungsgebiete in Abb. 1 dargestellt. Die Tab. 1 fasst die mittleren, maximalen (positiven) und minimalen (negativen) Abweichungen (DZ in mm) in den Punktwolken der verschiedenen UAV-Systeme zu den 45 Kontrollpunkten auf dem Testgebiet der Zeche Zollern zusammen. Die dichten Punktwolken wurde in PhotoScan mit der Auflösung „medium“ und dem Filter „aggressive“ aus den Bilddaten der

Tab. 1: Vertikale Abweichungen (Δz in mm) zwischen den 45 Kontrollpunkten (Zeche Zollern) und dichter Punktwolke (Kreuzbefliegung) der fünf verschiedenen UAV-Systeme

Software	PhotoScan					Pix4Dmapper				
	X5S 15	X5S 24	P4	X4S	SODA	X5S 15	X5S 24	P4	X4S	SODA
Mittelwert	-0,9	1,8	10,4	-3,6	23,9	-3,5	0,7	-2,6	-11,9	3,3
Max	35,4	52,5	34,0	9,6	61,4	29,4	35,5	17,8	16,1	25,7
Min	-64,5	-62,0	-26,8	-22,1	0,8	-24,3	-29,3	-14,7	-32,7	-23,2

Kreuzbefliegung des jeweiligen UAV-Systems erzeugt, während in Pix4Dmapper die Einstellung „half image size“ verwendet wurde. Die Einstellungsmöglichkeiten für die Auflösung und die Filter bei der Berechnung einer dichten Punktwolke mit PhotoScan/Metashape und Pix4Dmapper beschreiben Przybilla et al. (2019) ausführlich.

Beide Softwarepakete PhotoScan und Pix4Dmapper zeigen unterschiedliche Ergebnisse, was auch in den Abb. 2 und in Abb. 3 deutlich wird. Das beste Ergebnis erreicht die DJI Phantom 4 Pro mit der Software Pix4Dmapper, da sowohl der Mittelwert, als auch die beiden Werte Min und Max im Vergleich zu den anderen gering sind. Die hohen Mittelwerte bei der Phantom 4 Pro und senseFly ebee S.O.D.A in PhotoScan und bei der Inspire 2 X4S in Pix4Dmapper deuten auf systematische Abweichungen an den Kontrollpunkten hin, was in der Abb. 2 und Abb. 3 auch bestätigt wird. Interessant ist dabei allerdings, dass diese systematischen Abweichungen jeweils nur mit einem der beiden Softwarepakete auftreten. Weitere Untersuchungsergebnisse zu den punktuellen Vergleichen hinsichtlich Bildflügeanordnung (Regular vs. Regular & Cross) und Bildformat (JPG vs. TIFF) sind in Schlömer (2019) zusammengefasst. Bei den Untersuchungen zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen mit den TIFF- und JPG-Bilddaten, allerdings bringt die Kreuzanordnung bei den Bildflügen eine Verbesserung der Ergebnisse, d. h. die Abweichungen zwischen Punktwolken und Kontrollpunkten sind meistens etwas geringer.

Bei der hochauflösenden Mittelformatkamera Phase One streuen die vertikalen Abweichungen der PhotoScan-Punktwolke etwas mehr als die entsprechenden Abweichungen aus der Pix4Dmapper-Punktwolke für die UAV-Bildflüge über die Zeche Zollern (Abb. 4). Im Mittel liegt sie in PhotoScan bei einem Wert von 0 mm. Die Punktwolke aus den Berechnungen mit Pix4Dmapper zeigt eine systematische negative Abweichung, d. h. die entsprechende Punktwolke liegt im Mittel ca. 10 mm oberhalb des Kontrollpunkthöhenneaus. Dieser Wert entspricht ca. 2/3 der in den Flügen definierten Bodenauflösung (GSD) von 14 mm.

Die Berechnung einer dichten Punktwolke wurde für das gesamte Aufnahmegebiet der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet in Agisoft Metashape mit der Auflösung Medium (Filter: mild) ausgeführt. Für die dichte Punktwolke wurden 63,9 Mio. Punkte berechnet. Das Ergebnis der Abweichungen in der Z-Koordinate (DZ) der Kontrollpunkte zur dichten Punktwolke ist in Abb. 5 dargestellt. Ein Kontrollpunkt wurde wegen seiner hohen Abweichung von 7,1 cm als grober Fehler aussortiert. Die überwiegend

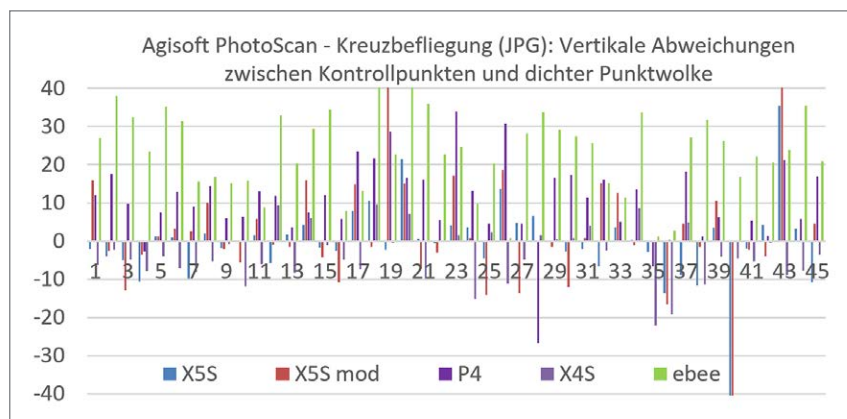


Abb. 2: Vertikale Abweichungen [mm] zwischen den 45 Kontrollpunkten und den dichten Punktwolken aus PhotoScan für die fünf verschiedenen UAV-Systeme

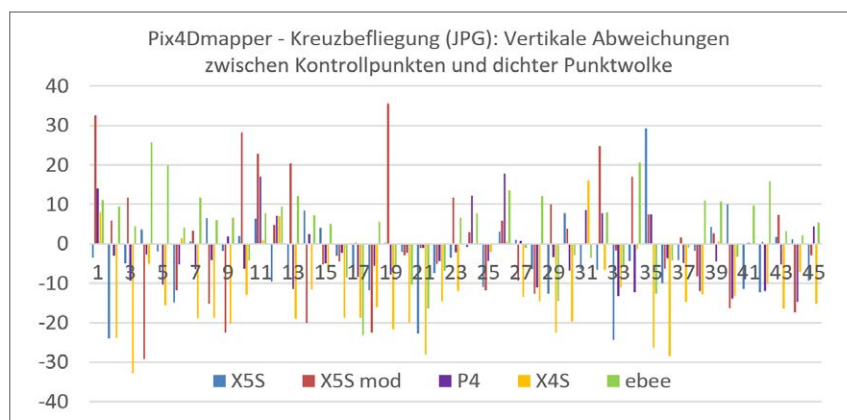


Abb. 3: Vertikale Abweichungen [mm] zwischen den 45 Kontrollpunkten und den dichten Punktwolken aus Pix4Dmapper für die fünf verschiedenen UAV-Systeme

negativen Abweichungen zeigen, dass die dichte Punktwolke im Durchschnitt 5,5 mm und maximal 27,6 mm über den Kontrollpunkten (Referenz) liegt, wobei hier die untersuchten Punkte im offenen, ebenen Gelände liegen. Die Pixelauflösung am Boden (GSD) liegt in den Bilddaten je nach Flughöhe zwischen 9,0 mm und 13,6 mm, so dass der durchschnittliche Wert der Höhenabweichungen an den Kontrollpunkten einer GSD niedriger als 0,5 Pixel entspricht.

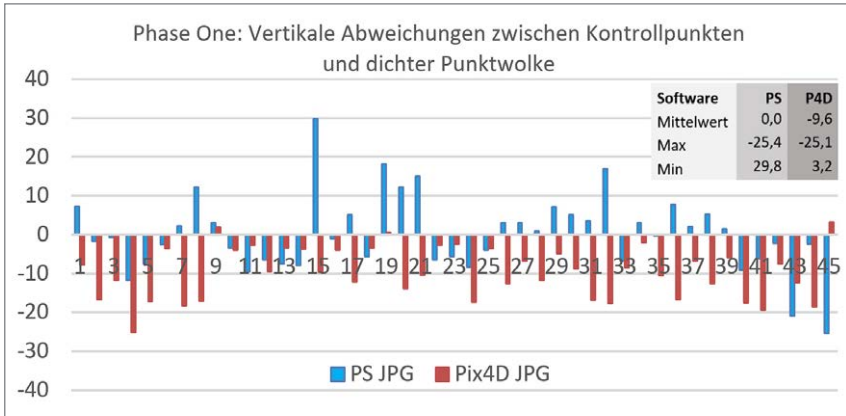


Abb. 4: Abweichungen [mm] in der Z-Koordinate der 45 Kontrollpunkte in den dichten Punktwolken aus PhotoScan (blau) und Pix4Dmapper (rot) für den UAV-Bildflug mit der Phase One

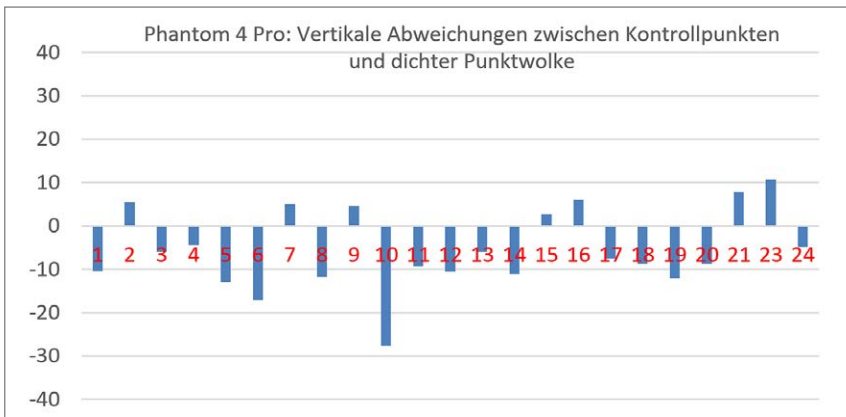


Abb. 5: Abweichungen [mm] in der Z-Koordinate an 23 Kontrollpunkten in der dichten Punktwolke aus Metashape für den UAV-Bildflug über der Straßenkreuzung mit der DJI Phantom 4 Pro

5.2 Linienhafte Vergleiche anhand von Profilen

In den linienhaften Vergleichen zwischen Profilen aus den Punktwolken und TLS-Referenzdaten wurden für die Zeche Zollern Objektbereiche mit charakteristischen Merkmalen einbezogen (Abb. 6), u. a. Gleiskörper, Straßenbordsteine, Treppen und Dachstrukturen. Für die Straßenkreuzung Halskestraße standen nur Referenzdaten der tachymetrischen Auswertung zur Verfügung. Im Folgenden werden die Ergebnisse eines Gleisprofils (Zeche Zollern) und die Straßenprofile (Straßenkreuzung) vorgestellt. Die Ergebnisse aller weiteren Profile der Zeche Zollern (Abb. 6 links) sind in Przybilla et al. (2019) zusammengestellt.

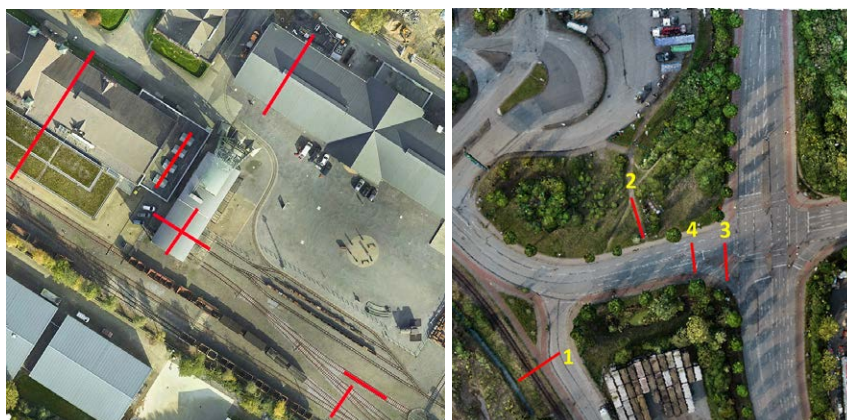


Abb. 6: Verteilung der Profile in der Zeche Zollern (links) und im Testgebiet der Straßenkreuzung (rechts)

Die Qualität der Punktwolken wurde anhand eines Profils quer zu den Gleisen auf der Zeche Zollern visuell analysiert (Abb. 7). Um einen Vergleich der Punktwolken aus beiden Software-Paketen zu ermöglichen, wurden die Qualitätsparameter bei der Erstellung so gewählt, dass sich vergleichbar große Punktwolken ergaben. In Abb. 7 sind die Gleisprofile in der Querrichtung in der Punktwolke von Pix4Dmapper (pink) und PhotoScan (grün) dargestellt. Eine deutliche Glättung des Profils ist in dem grünen Profil (PhotoScan) erkennbar, während im Pix4Dmapper-Profil (in Pink) die Gleisstrukturen signifikanter rekonstruiert wurden.

Die in Abb. 7 und Abb. 8 dargestellten Querprofile zeigen eine deutliche Glättung der PhotoScan-Profile. Die Profile aus Pix4Dmapper sind zwar bezüglich der Schienenstränge grundsätzlich formtreuer, streuen jedoch erkennbar mehr. Auslöser hierfür ist wahrscheinlich der aktivierte Parameter „Multiscale“. Diese Option ist zu deaktivieren, wenn viel Rauschen in der Punktwolke sichtbar ist

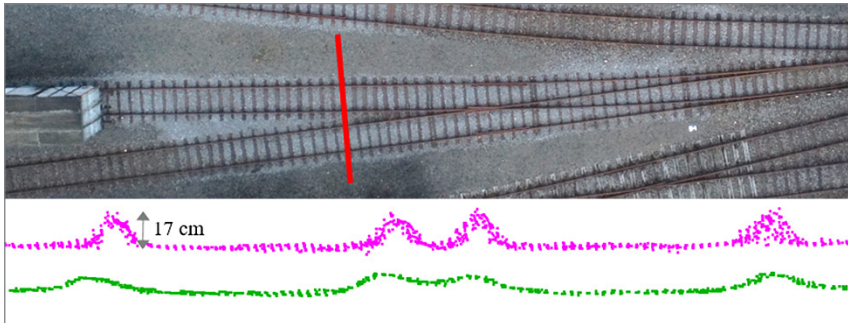


Abb. 7: Darstellung der Profile der beiden Punktwolken quer zur Gleisachse – Profilposition im Foto (oben), Punktwolkenprofile (unten): Pix4Dmapper JPG (pink) und PhotoScan JPG (grün)

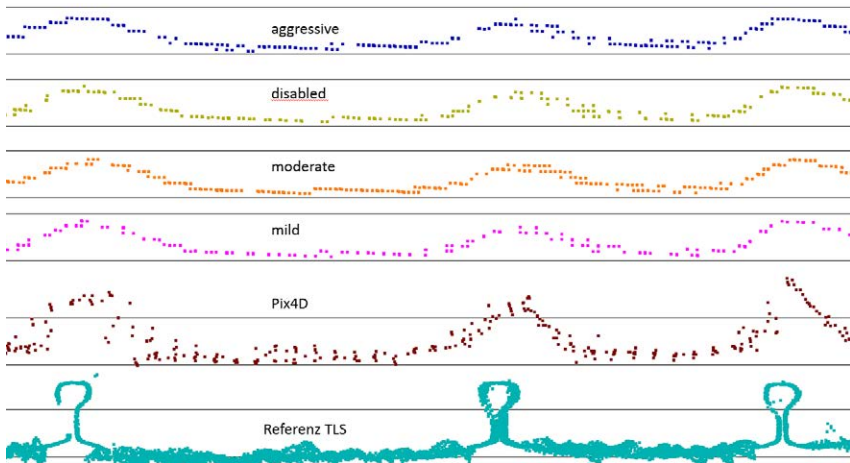


Abb. 8: In PhotoScan erstellte Profile wie in Abb. 7, jedoch unter Verwendung verschiedener Filterfaktoren, im Vergleich zum Profil aus Pix4Dmapper (braun) und zur TLS-Referenz

und Artefakte in 3D-Texturnetzen, dem Oberflächenmodell oder dem Orthomosaik vorhanden sind (Pix4D 2019). Die Angaben des Herstellers zur Wirkungsweise dieses Parameters sind leider wenig konkret.

Das vorliegende Ergebnis wirft die Frage auf, ob in PhotoScan mit anderen Filtereinstellungen der Gleiskörper ähnlich deutlich wie in Pix4D abzubilden ist. Daher wurde ein Gleisabschnitt mit allen vier verfügbaren Filtermöglichkeiten aus PhotoScan mit dem Ergebnis aus Pix4D verglichen. Interessanterweise ergab sich für den Gleiskörper bzw. dessen Oberflächenstruktur keinerlei Unterschied in Abhängigkeit von den verschiedenen Filterstufen (Abb. 8). Daraufhin wurde

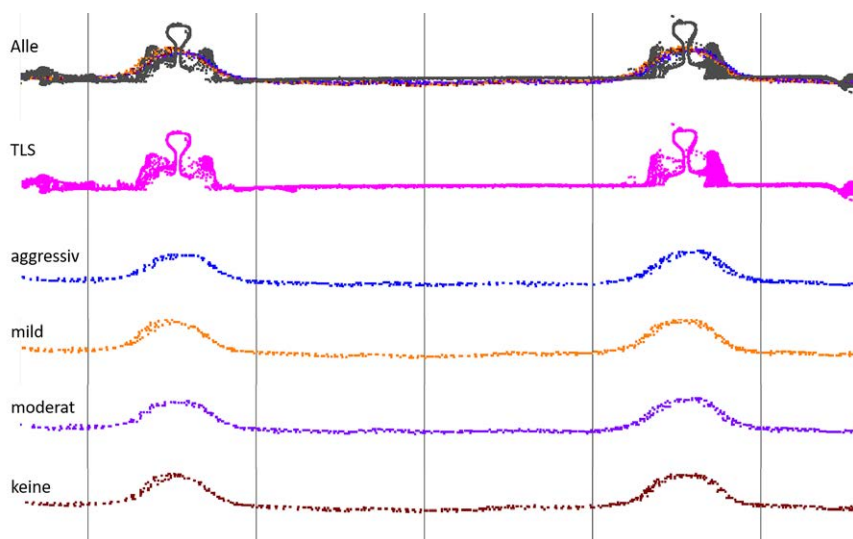


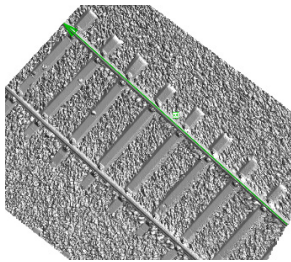
Abb. 9: Aus PhotoScan abgeleitete Querprofile (Phase One, Punktdichte Ultra high) für das Gleis unter Verwendung der verfügbaren Filterfaktoren im Vergleich zur TLS-Referenz (pink)

eine Punktwolke mit der höchstmöglichen Auflösung Ultra high von einem anderen Gleisprofil untersucht, in dem die Ergebnisse der drei höchsten Filterungsstufen (moderat, mild, und aggressiv) gegenübergestellt wurden. Abb. 9 zeigt, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Filterstufen und dem ungefilterten Punktwolkenprofil zu sehen sind. Im Vergleich zur Referenz (Profil in Pink, Abb. 9) sind auch diese Profile deutlich geglättet.

Für die Abweichungen in Tab. 2 wurde die Gleisachse manuell in die Punktwolke gelegt und die Höhe wurde mit der Achse aus der TLS-Punktwolke verglichen. Die Punktwolken wurden in PhotoScan mit den Auflösungen Ultra high und High erstellt, wobei sie zusätzlich den verschiedenen Filterungen von mild bis aggressiv unterzogen wurden. Das Ergebnis zeigt, je stärker die Filterung erfolgt, desto größer ist die Abweichung in der Höhe (DZ) zur Referenz. Ohne Filterung ist die Abweichung der Z-Koordinate in der dichten Punktwolke Ultra high zur TLS-Punktwolke nur bei 2,9 cm, während die Filterung aggressiv eine hohe Abweichung von 12,5 cm verursacht, die auf eine Glättung der Punktwolke durch die Filterung zurückzuführen ist.

Nach den Erfahrungen von Dewez et al. (2016) bietet eine höhere Auflösung der berechneten, dichten Punktwolke eine bessere Kantentreue oder auch einen höheren Detaillierungsgrad. Selbst der signifikant höhere Rechenaufwand wird akzeptiert, da eine Interpretation der Daten und die Messungen in der Punktwolke nur mit einer sehr hohen Auflösung präzise erfolgen können. Doch die

Tab. 2: Vertikale Abweichungen (cm) am Schienenstrang (Zeche Zollern) für die Photo-Scan-Punktwolken *Ultra high* und *High* mit verschiedenen Filtern im Vergleich zur TLS-Referenz



		Gleishöhe [m]	ΔZ [cm]
	TLS-Referenzhöhe	123,285	0,0
Punktwolke Ultra high	Filter Aggressiv	123,160	12,5
	Filter Moderat	123,201	8,4
	Filter Mild	123,250	3,5
	Filter Kein	123,256	2,9
Punktwolke High	Filter Aggressiv	123,175	11,5
	Filter Moderat	123,184	10,1
	Filter Mild	123,204	8,1

in Abb. 10 und Abb. 11 dargestellten Profile, generiert aus den verschiedenen Auflösungen Ultra high, High und Medium (Filtereinstellung jeweils „Aggressiv“), zeigen im Testgebiet Straßenkreuzung im Vergleich zur Referenz (tachymetrische Aufnahme) deutliche Glättungseffekte an Kanten und oftmals systematische Abstände von 1 bis 20 cm. Die Metashape-Punktwolken mit der Auflösung Ultra high passen sich etwas besser an die Topographie an, aber die Verbesserung ist nicht so signifikant, dass die Kanten daraus eindeutig bestimmt werden können. Generell liegen die Punktwolken in der Höhe über den Referenzdaten aus der tachymetrischen Vermessung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Auswertung der tachymetrischen Vermessung zu einer Generalisierung der Geländetopographie geführt hat, so dass die Abweichungen im offenen Gelände zu

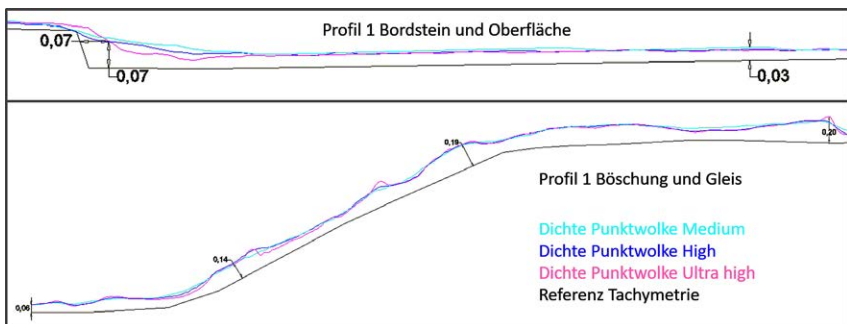


Abb. 10: In Metashape erstelltes Profil 1 aus verschiedenen dichten Punktwolken der Phantom 4 Pro im Testgebiet Straßenkreuzung im Vergleich zur Referenz (schwarz)

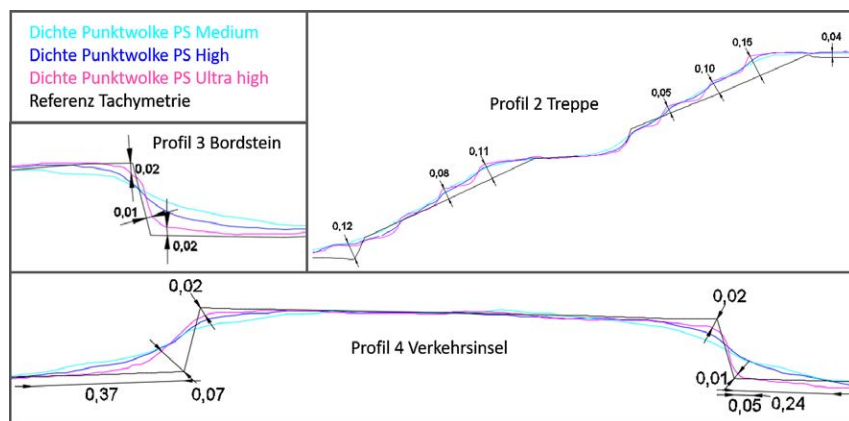


Abb. 11: In Metashape erstellte Profile 2 bis 4 aus verschiedenen dichten Punktwolken der Phantom 4 Pro im Testgebiet Straßenkreuzung im Vergleich zur Referenz (schwarz)

einem Teil darauf zurückzuführen sind. Umfangreiche Untersuchungen mit weiteren Profilen vom Testgebiet Straßenkreuzung beschreibt Grahmann (2019).

5.3 Flächenhafte Vergleiche der Punktwolken mit einer Referenz

Für die flächenhaften Vergleiche verschiedener Punktwolken mit der Referenz wurden nur die UAV-Bilddaten der Zeche Zollern herangezogen, da nur von diesem Gebiet flächenhafte Vergleichsdaten vorlagen. Untersucht wurden die Bildflüge der verschiedenen UAV-Systeme mit der Kreuzbefliegung im JPG-Bildformat. Die dichten Punktwolken wurden sowohl in PhotoScan (Medium) als auch in Pix4Dmapper mit der gleichen Auflösung bzw. Punktdichte erstellt. Die Testobjekte für die flächenhaften 3D-Vergleiche sind in [Abb. 12](#) dargestellt. Die ausgewählten Bereiche repräsentieren Flächen mit variierenden Oberflächenstrukturen: Rampe (Beton), Gleisbett und Pflastersteine. Bei der gepflasterten

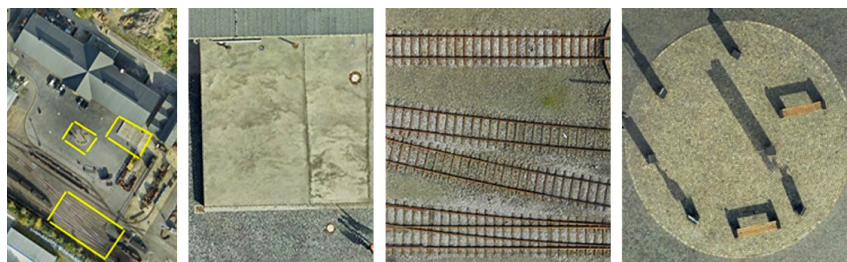


Abb. 12: Flächenhafte Testobjekte der Zeche Zollern im Überblick (links, gelb umrandet) und als Detailansicht (v.l.n.r.): Rampe (Beton) – Gleiskörper – Pflastersteine

Fläche mit dem Übergang zu einer betonierten Fläche wurden Bänke sowie Aufsteller aus der Punktwolke entfernt. Als Referenzdaten stehen für die drei Testgebiete Punktwolken durch terrestrisches Laserscanning mit dem Z+F IMAGER 5010C zur Verfügung.

In den Abb. 13 bis 17 werden die farbkodierten Abweichungen aus dem in Geomagic Control gerechneten 3D-Vergleich zwischen Testdatensatz der jeweiligen UAV-Systeme und Referenz visualisiert. Im oberen Teil jeder Abbildung sind die Ergebnisse von PhotoScan und im unteren Teil die von Pix4Dmapper dargestellt. Die farbkodierte Skala zeigt die Abweichungen im Bereich ± 5 mm grün an, während das positive Maximum mit +35 mm rot und das negative Minimum mit -35 mm blau dargestellt wird. Durch die farbkodierte Visualisierung der Abweichungen lassen sich Systematiken im Ergebnis erkennen.

In Abb. 13 sind die Ergebnisse der 3D-Vergleiche der DJI Inspire 2 X5S (15 mm Objektiv) für die drei Testgebiete dokumentiert. Sieht man in den durch PhotoScan erstellten Punktwolken besonders deutlich die Abweichungen an den Kanten bzw. Gleisen, so erkennt man dagegen in den Pix4Dmapper-Daten starke systematische flächenhafte Abweichungen, da große Teile der Punktwolke im Gleisbereich und beim Pflaster über der Referenz liegen.

Die Ergebnisse der 3D-Vergleiche für das UAV-System Inspire 2 X5S mod sind in Abb. 14 wiedergegeben. Die Abweichungen der mit PhotoScan generierten

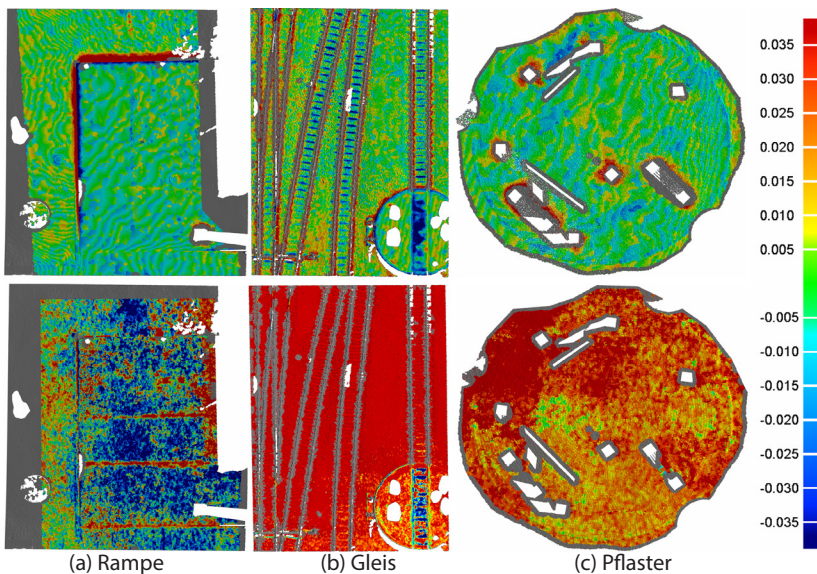


Abb. 13: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems Inspire 2 X5S zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

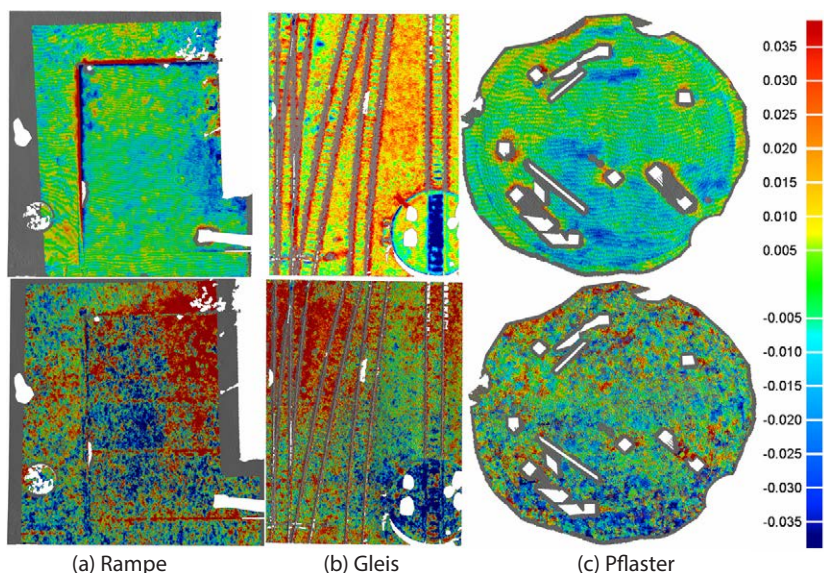


Abb. 14: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems Inspire 2 X5S mod zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

Punktwolken zeigen unterschiedliches Verhalten. Bei der Rampe haben die Kanten erwartungsgemäß die höchsten Abweichungen, während beim Gleis die Punktwolke insgesamt systematisch etwas zu hoch liegt. Die Punktwolken der Inspire 2 X5S mod aus Pix4Dmapper stellen neben den Ergebnissen der X5S die schlechtesten Ergebnisse im Vergleich mit anderen Punktwolken dar. Es gibt keine Verschiebung in eine Richtung, aber die Punktwolke selbst unterliegt einem sehr starken Rauschen. Diese schlechten Ergebnisse können vermutlich auf die jeweils längere Brennweite im Vergleich zu den anderen Systemen und ggf. auf eine unzureichende Kalibrierung der Kamerakonstante in Pix4Dmapper zurückzuführen sein.

Die beiden UAV-Systeme Phantom 4 Pro und Inspire 2, jeweils mit der Kamera Zenmuse X4S, erreichen beim flächenhaften Vergleich mit beiden Softwarepaketen insgesamt die besten Ergebnisse (Abb. 15 und Abb. 16). Die Punktwolken der Phantom 4 Pro sind mit PhotoScan tendenziell eher zu tief, während sie mit Pix4Dmapper leicht zu hoch im Vergleich zur Referenz sind, die Punktwolken aus Pix4Dmapper weisen insgesamt noch etwas geringere Abweichungen auf. Die Punktwolken aus PhotoScan zeigen generell höhere Abweichungen an den Kanten als die aus Pix4Dmapper, nicht nur bei der X4S.

Große systematische Abweichungen liefern die Punktwolken der senseFly S.O.D.A. Sowohl die Punktwolken aus PhotoScan als auch aus Pix4Dmapper

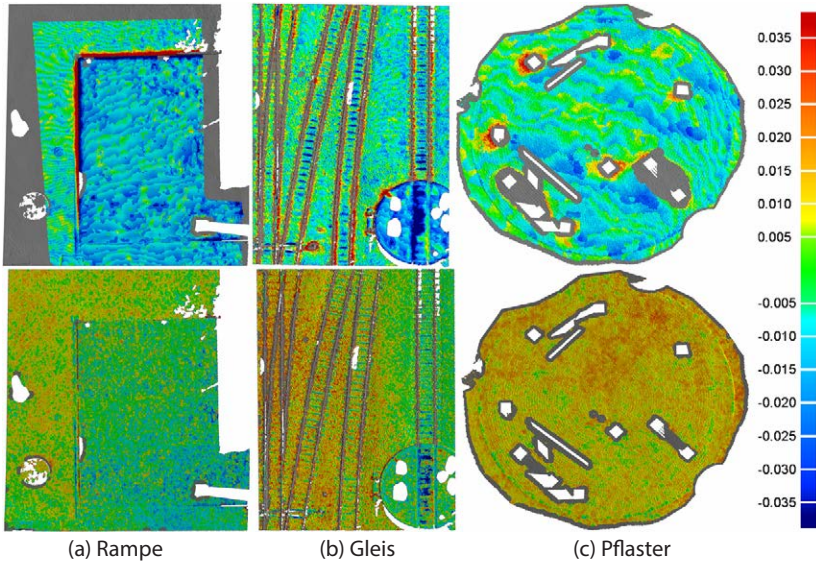


Abb. 15: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems Phantom 4 Pro zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

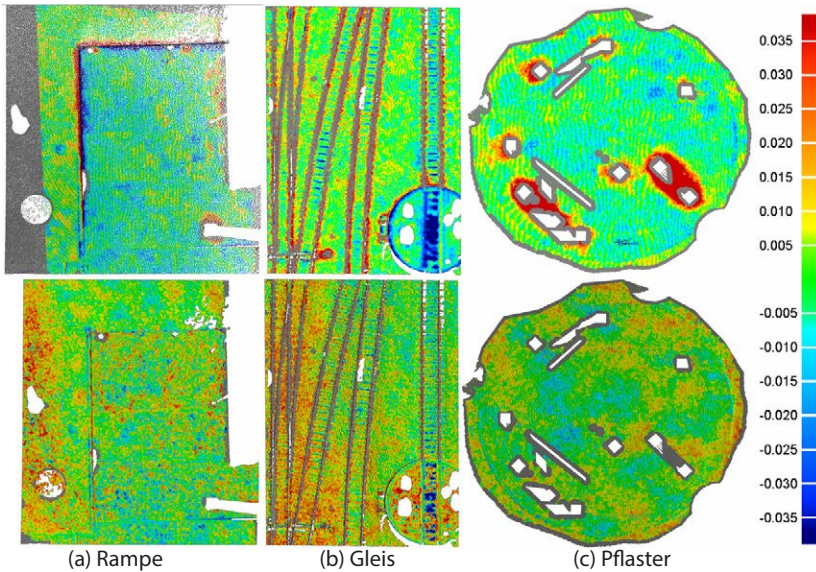


Abb. 16: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems Inspire 2 X4S zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

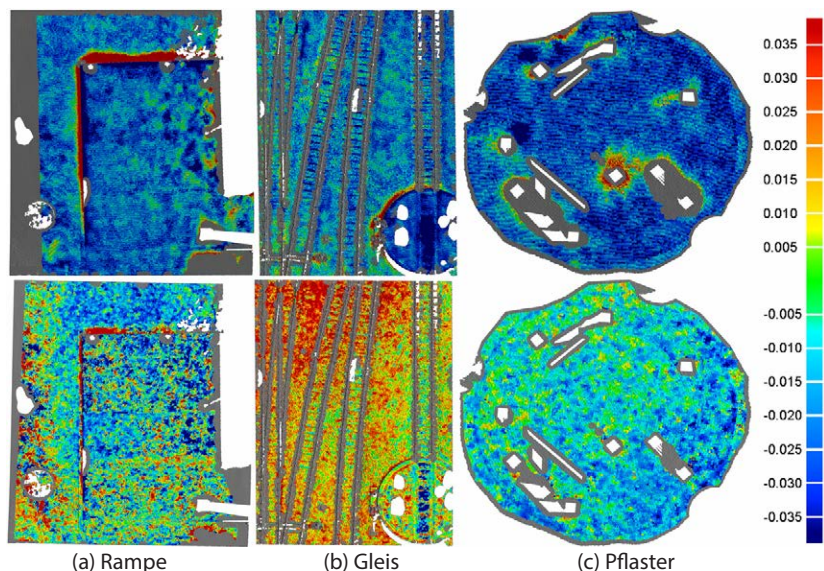


Abb. 17: Vergleich der jeweiligen Punktwolke des UAV-Systems senseFly S.O.D.A. zur Referenz – Agisoft PhotoScan (oben) und Pix4Dmapper (unten)

liegen deutlich zu tief, eine Ausnahme stellt der Gleisbereich aus Pix4Dmapper dar (Abb. 17 unten).

Die Punktwolken der Inspire 2 X5S und X5S_mod weisen im Vergleich zu den anderen Systemen signifikant schlechtere Qualität der Punktwolken in Pix4Dmapper auf, während die Punktwolken mit PhotoScan andererseits im Vergleich zu den UAV-Systemen Phantom 4 Pro und Inspire X4S nicht abfallen. Insgesamt bereitete das Gleisbett den Punktwolken aller UAV-Systeme in beiden Softwarepaketen größere Probleme, da die Abweichungen zur Referenz in diesem Testgebiet im Vergleich zur Rampe und zum Pflaster am größten sind.

In diesem Zusammenhang muss auch die Tab. 3 betrachtet werden. Für diese Tabelle wurden vier Genauigkeitsklassen erstellt, die die prozentualen Anteile der Punkte in den vier Genauigkeitsklassen numerisch zusammenfassen. Zur besseren visuellen Veranschaulichung wurden die prozentualen Anteile der Punkte in den vier Genauigkeitsklassen für die Testgebiete Rampe (oben), Gleis (Mitte) und Pflaster (unten) und den fünf UAV-Systemen in Abb. 18 grafisch dargestellt.

Es konnte aber auch demonstriert werden, dass die signifikant höhere Auflösung der Phase One (100 MPixel) für dieselben Testgebiete der Zeche Zollern bessere Ergebnisse beim 3D-Vergleich nachweist (siehe Abb. 19 und Przybilla et al. 2019). Rechnet man zudem in Geomagic Control einen 3D-Vergleich

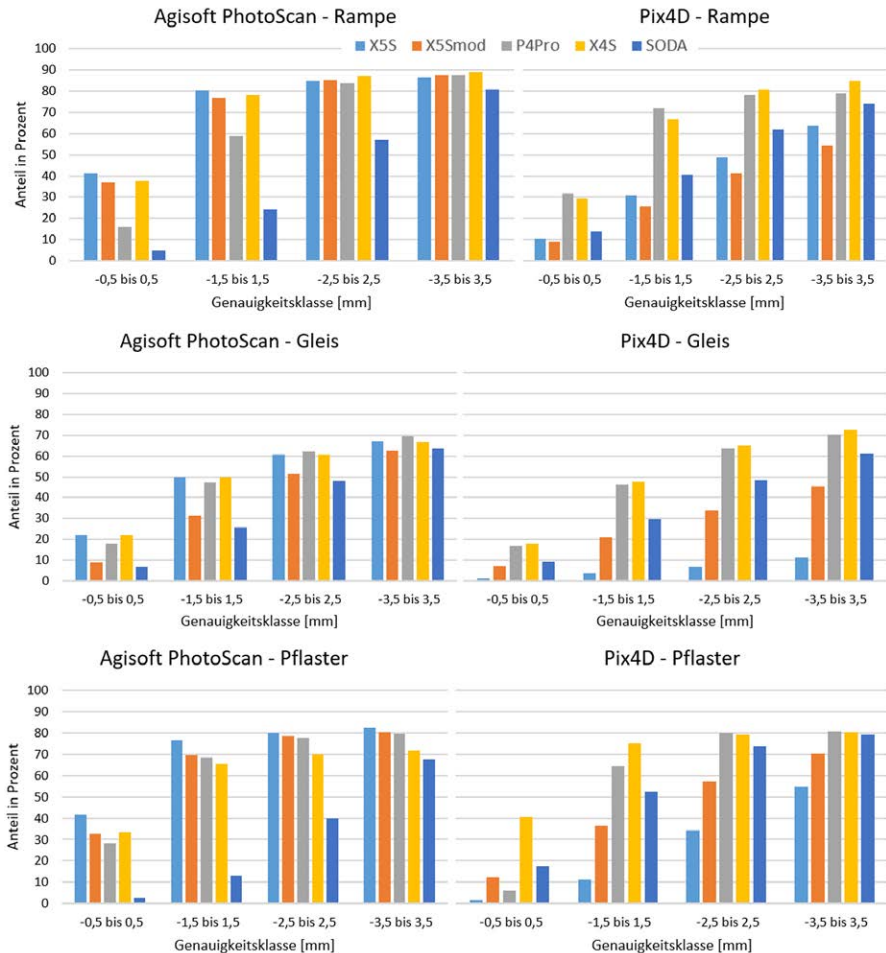


Abb. 18: Anteil [%] der Punkte in einer Genauigkeitsklasse [mm] für die Testgebiete Rampe (oben), Gleis (Mitte) und Pflaster (unten) – Agisoft PhotoScan (links) und Pix4Dmapper (rechts) im Vergleich (Werte aus [Tab. 3](#))

zwischen den in PhotoScan verschiedenen gefilterten Punktwolken in der Auflösung Ultra high und der Referenz TLS, dann liegen die Abweichungen zwischen der jeweiligen Punktwolke und der Referenz für die Rampe aus Beton in der ebenen Fläche im Bereich von ± 5 mm (grün), während die Abweichungen an den Kanten bei allen gefilterten Punktwolken praktisch identisch sind ([Abb. 19](#)). Während die Abweichungen von ± 5 mm in der Fläche zwischen bildbasierter Punktwolke und der Referenz ein gutes Ergebnis darstellt, bleiben die Glättung der Kanten und damit die höheren Abweichungen ein Problem.

Tab. 3: Einteilung der Abweichungen (in %) zur Referenz in vier Genauigkeitsklassen (innerhalb von –3,5 bis +3,5 cm) für die drei Testgebiete Rampe, Gleis und Pflaster – PhotoScan und Pix4Dmapper im Vergleich

Software	Agisoft PhotoScan					Pix4Dmapper				
UAV	X5S	X5S mod	P4Pro	X4S	SODA	X5S	X5S mod	P4Pro	X4S	SODA
Abweichung	Rampe					Rampe				
–0,5 bis 0,5	41,3	37,0	15,9	37,5	4,7	10,5	8,8	31,7	29,3	13,8
–1,5 bis 1,5	80,3	76,5	58,7	78,0	24,2	30,9	25,7	71,8	66,7	40,6
–2,5 bis 2,5	84,8	85,1	83,7	87,1	57,0	48,9	41,2	78,0	80,6	61,7
–3,5 bis 3,5	86,2	87,5	87,3	88,9	80,6	63,8	54,3	79,0	84,9	73,9
	Gleis					Gleis				
–0,5 bis 0,5	22,0	9,0	17,7	22,0	6,8	1,1	7,0	16,8	17,9	9,4
–1,5 bis 1,5	49,7	31,2	47,4	49,7	25,5	3,6	21,0	46,3	47,6	29,7
–2,5 bis 2,5	60,8	51,5	62,2	60,8	47,9	6,6	34,0	63,6	64,9	48,4
–3,5 bis 3,5	66,9	62,6	69,4	66,7	63,5	11,1	45,2	70,1	72,4	61,0
	Pflaster					Pflaster				
–0,5 bis 0,5	41,8	32,9	28,5	33,5	2,8	1,4	12,5	5,9	40,5	17,5
–1,5 bis 1,5	76,5	69,7	68,4	65,4	13,1	11,2	36,5	64,3	75,1	52,5
–2,5 bis 2,5	80,0	78,5	77,6	69,9	39,7	34,1	57,2	80,0	79,4	73,5
–3,5 bis 3,5	82,7	80,4	79,7	71,8	67,9	54,7	70,5	80,9	80,4	79,2

6 Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten geometrischen Untersuchungen fassen die Ergebnisse zur Qualität bildbasierter Punktwolken mit verschiedenen UAV-Systemen in zwei Testgebieten zusammen.

- Im Testfeld Zeche Zollern, Dortmund: vier Multikopter von DJI (Phantom 4 Pro Zenmuse X4S, Inspire 2 Zenmuse X5S (c = 15 mm), Inspire 2 Zenmuse X5S (modifizierte Optik mit c = 24 mm), Inspire 2 Zenmuse X4S), ein Starr- bzw. Flächenflügler senseFly ebee (S.O.D.A. Kamera) und ein Multikopter von Coptersystems mit der Mittelformatkamera Phase One.
- Im Testgebiet der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg-Moorfleet: Multikopter DJI Phantom 4 Pro Zenmuse X4S.

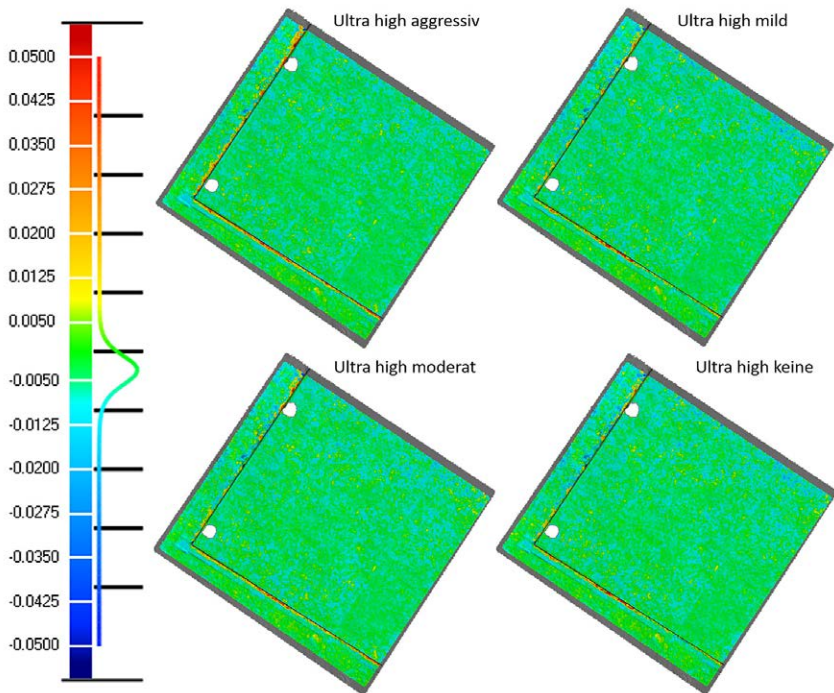


Abb. 19: 3D-Vergleich der verschiedenen Punktwolken (Auflösung Ultra high) der Phase One aus PhotoScan mit der Referenz TLS (Abweichungen farbkodiert mit der Skala: grün ± 5 mm, rot +50 mm und blau -50 mm)

Die Autoren legen Wert darauf, dass die Ergebnisse für die untersuchten einzelnen UAV-Systeme erzielt wurden, die keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit für die jeweilige Produktserie des untersuchten Systems darstellt. Insgesamt können aus den erreichten Ergebnissen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es wurden unterschiedliche Ergebnisse mit den eingesetzten Softwarepaketen Agisoft PhotoScan und Pix4Dmapper je UAV-System erreicht.
- Die verschiedenen Kameras der eingesetzten UAV-Systeme liefern unterschiedliche Ergebnisse. Es zeigt sich, dass Kameras mit längerer Brennweite (X5S) aufgrund der größeren Flughöhe und dem damit verbundenen kleineren Bildmaßstab erwartungsgemäß schlechtere Ergebnisse erreichen.
- Nach Auffassung der Autoren reicht die Qualität der mit unterschiedlicher Software generierten Punktwolken aus, um aus den UAV-Bilddaten qualitativ gute Orthophotos in hoher Auflösung (z. B. hier GSD 1 cm) zu erstellen.

- Erreichen die Punktwolken in der ebenen Fläche akzeptable bis gute Ergebnisse, bereiten jedoch Kanten durch Glättungseffekte in den Punktwolken Probleme bei der präzisen 3D-Digitalisierung. Es sollte daher noch untersucht werden, ob zusätzliche Schrägaufnahmen die Qualität der dichten Punktwolken für die Auswertung von Kanten signifikant verbessern.
- Die automatische Filterung von Punktwolken muss grundsätzlich mit Vorsicht betrachtet werden, da sie einerseits die Ergebnisse signifikant verfälschen kann, aber andererseits bei den hier präsentierten Untersuchungen keine Veränderungen bzw. Verbesserungen, insbesondere mit PhotoScan, gebracht hat.
- Je höher die gewählte Auflösung bzw. Punktdichte bei der Generierung von dichten Punktwolken ist, desto geringer wird der Glättungseffekt bei Kanten. Vermeiden lässt er sich aber auch durch die höchste Auflösung nicht gänzlich. Zudem muss die steigende Rechenzeit für sehr hohe Punktdichten mit berücksichtigt werden, so dass der Anwender für die jeweilige Aufgabenstellung immer den Kompromiss zwischen der Auflösung der dichten Punktwolken und der dafür benötigten Rechenzeit betrachten sollte.
- Die höhere Auflösung des Kamerasensors, wie z.B. der Phase One, bietet eine höhere Chance auf qualitativ bessere Punktwolken als die eingesetzten Standard-UAV-Systeme. Dabei sollte grundsätzlich berücksichtigt werden, ob sich die Anschaffung einer Mittelformatkamera, mit einem um den Faktor 10 bis 20 höheren Preis, für die anstehende Aufgabenstellung rentiert.

Der Einsatz von UAV-Systemen mit RTK-GNSS (mit Zweifrequenz-Empfängern) bei Bildflügen wird die Bildauswertung u. a. durch die integrierte Sensororientierung weiter automatisieren und stabilisieren. Es wird auch erwartet, dass die Auflösung zukünftiger Kamerasysteme für UAV-Systeme zunehmen wird, so dass dadurch auch die Qualität der Punktwolken verbessert werden kann. Allerdings bieten entsprechende Bildflügeanordnungen (z. B. eine Kreuzbefliegung mit zusätzlichen Schrägaufnahmen) in niedrigeren Flughöhen genügend Potenzial, um die Qualität von dichten Punktwolken zu erhöhen. Die damit verbundene erforderliche längere Rechenzeit kann bei einem hohen Grad an Automation akzeptiert werden, zumal zunehmende Leistungsfähigkeit der neuen Generation von Computern die Situation zukünftig verbessern wird.

Dank

Wir bedanken uns bei Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla (Hochschule Bochum) für die Bereitstellung der verschiedenen UAV-Bildflugdaten vom Testfeld Zeche Zollern sowie bei Prof. Dr.-Ing. Manfred Bäumker (Hochschule Bochum) und den Studierenden der Wahlpflichtveranstaltung „Ingenieurvermessung“

2017 und 2018 des Studiengangs Vermessung der Hochschule Bochum für die Passpunktbestimmung auf der Zeche Zollern. Außerdem bedanken wir uns bei Herrn Frederic Schlömer (M.Sc. Geodäsie & Geoinformatik, HCU Hamburg) für die Auswertung der verschiedenen UAV-Bildflugdaten vom Testfeld Zeche Zollern und bei Herrn Björn Grahmann (B.Sc. Geodäsie & Geoinformatik, HCU Hamburg) für die Auswertung der UAV-Bildflugdaten von der Straßenkreuzung Unterer Landweg/Halskestraße in Hamburg.

Literatur

- Bäumker, M. (2020): Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagennetzes am Beispiel des UAV-Testfelds Zeche Zollern. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Augsburg, 103–120. (Dieser Tagungsband). Coptersystems (2019): Multicopter „CS8-MM“. <https://coptersystems.com/produkte/cs8-mm/>, letzter Zugriff 12/2019.
- Dewez, T., Leroux, J., Morelli, S. (2016): Cliff collapse hazard from repeated multicopter UAV acquisitions: return on experience. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 41(B5), 805–811. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLI-B5-805-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-805-2016).
- Grahmann, B. (2019): Bestandsdatenerfassung durch UAV-basierte Bildflüge am Beispiel einer Straßenkreuzung – Potential, Grenzen und Genauigkeit. Unveröffentlichte Bachelorarbeit im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik der HafenCity Universität Hamburg, 48 S.
- Haala, N., Mandlbürger, G., Cramer, M., Laupheimer, D., Kölle, M. (2019): Kombinierte Analyse hochpräziser Punktwolken aus UAV-Photogrammetrie und -Laserscanning im Hinblick auf Setzungsmessungen. In: Hanke, K., Weinold, T. (Hrsg.): 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019, Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 69–78.
- 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., 3–13. DOI: [10.12902/zfv-0145-2016](https://doi.org/10.12902/zfv-0145-2016).
- 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. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 150–161.
- Kersten, T., Schlömer, F., Przybilla, H.-J. (2020): Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern – Die Ergebnisse verschiedener UAV-Systeme und zweier Softwarepakete im Vergleich. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Augsburg, 121–140. (Dieser Tagungsband).
- Lindstaedt, M., Kersten, T. (2018): Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 81–101.
- Luhmann, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Beispiele. 4., neu bearb. u. erw. Aufl., Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 783 S.

- d'Oleire-Oltmanns, S., Lackner, B. (2018): Evaluierung terrestrischer und UAS-basierter photogrammetrischer Datenprodukte. AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik, 4-2018, Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 372–377.
- PhaseOne (2019): iXM-100/iXM-50. https://industrial.phaseone.com/iXM_Camera_Series.aspx, letzter Zugriff 12/2019.
- Pix4D (2019): Pix4Dmapper – Dense Point Cloud Parameter. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557799>, letzter Zugriff 12/2019.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Augsburg, 51–66.
- Przybilla, H.-J. (2019): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit aktueller bildgebender UAV-Sensoren. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 28, 483–497.
- Przybilla, H.-J., Bäumker, M., Vieten, J. (2018): Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 61–79.
- Przybilla, H.-J., Kraft, T., Gessner, M., Zurhorst, A. (2017): Untersuchungen und erste Ergebnisse zur geometrischen Qualität marktgängiger Kameras für den UAV-Einsatz. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 235–245.
- Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., Kersten, T. (2019): Untersuchungen zur Qualität bildbasierter Punktwolken aus UAV-Bildflügen. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 236–248.
- 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, 45–54.
- Schlömer, F. (2019): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen UAV-basierter Bildflüge und Punktwolken. Unveröffentlichte Masterarbeit, Studiengang Geodäsie und Geoinformatik, HafenCity Universität Hamburg, 137 S.
- Wikipedia (2019): Industriemuseum Zeche Zollern, Dortmund-Bövinghausen. https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche_Zollern, letzter Zugriff 12/2019.
- Zhang, Z., Gerke, M., Vosselman, G., Yang, M. Y. (2018): Filtering Photogrammetric Point Clouds Using Standard Lidar Filters Towards DTM Generation. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2, 319–326. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-2-319-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-319-2018).

Kontakt

Thomas P. Kersten | Maren Lindstaedt

HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning

Überseeallee 16, 20457 Hamburg

thomas.kersten@hcu-hamburg.de | maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de

UAV und Monitoring: Widerspruch oder erweiterte Option?

Michael Cramer | Patrick Havel

1 Einführung

Die Ingenieurgeodäsie ist gemäß einer Definition von Kuhlmann et al. (2013) „die Disziplin von der Aufnahme, der Absteckung und dem Monitoring lokaler und regionaler geometriebezogener Phänomene mit besonderer Berücksichtigung von Qualität, Sensorik und Bezugssystemen.“ Je Anwendung und verfügbarer Messsensorik bestimmt die Ingenieurgeodäsie 3D-Objektpunkte mit einer sehr hohen Genauigkeit. Damit ist die Ingenieurgeodäsie das bevorzugte Verfahren für die „Vermessungen im Zusammenhang mit der Projektierung, Ausführung, Abnahme und Überwachung von Bauwerken oder anderen Objekten“ (DIN 2010). Der Begriff (Geo-)Monitoring wird in der Geodäsie „fast selbstverständlich als Synonym für die Überwachung komplexer natürlicher und technischer Vorgänge oder Prozesse mittels geeigneter Beobachtungssysteme genutzt“ (Niemeier und Riedel 2016). Die Überwachung von Bauwerken vor allem auch zur Deformationsmessung ist eine dieser Anwendungen. Zum üblichen Messinstrumentarium gehören klassische geodätische Messsensoren, wie Totalstationen, Nivelliere und GNSS-Verfahren. Diese messen direkt die Deformation in Form von Punktverschiebungen bzw. Koordinatenveränderungen in Lage und/oder Höhe. Ergänzend können auch andere Messsysteme wie Schlauchwaagen, Beschleunigungssensoren oder Neigungsmesser eingesetzt werden, die im Unterschied zu den klassischen Methoden keine direkten Koordinatenänderungen, sondern physikalische Eigenschaften des Objekts messen. „Ureigenes geodätisches Mittel zur Beobachtung eines Objekts ist die Anlage und Auswertung eines Überwachungsnetzes mit dem Zweck, aus wiederholten Messungen auf Verschiebungen der repräsentativ angelegten Netzpunkte zu schließen. Sofern auch Punkte in der Umgebung angelegt sind, können festgestellte Veränderungen in Bezug auf einen äußeren Referenzrahmen und somit georeferenziert und nicht nur relativ angegeben werden. ... Für die einzelnen Punkte des geodätischen Netzes entstehen dabei verdichtet über die Zeit Messreihen, die mit Hilfe der Methoden der Zeitreihenanalyse untersucht werden können. Derartig betriebene Überwachungsnetze erlauben eine verbesserte Betrachtung von Deformationen im Zeitbereich mit der verbleibenden Einschränkung auf zumeist nur wenige zur Verfügung stehende Objektpunkte (Eichhorn et al. 2016).“

Maßgeblich für ein erfolgreiches Monitoring ist eine hinreichend genaue Vorkenntnis des zu erwartenden zeitlichen und räumlichen Ablaufs der Deformationen. Diese definiert die Genauigkeitsanforderungen und vor allem auch die Auslegung des Überwachungsnetzes. 3D-Punktgenauigkeiten im mm-Bereich und ggf. besser sind für präzise Bauwerksüberwachungen möglich. Die Deformationsanalyse ist aber nur für diejenigen Punkte möglich, die im Rahmen einer Zeitreihe wiederholt beobachtet wurden. Tritt im Extremfall eine räumliche Veränderung in einem Bereich auf, der bislang nicht Bestandteil des Überwachungsnetzes ist, bleibt diese lokale Deformation unerkannt.

Vor diesem Hintergrund werden alternativ zu den eher punktorientiert erfassenden Methoden flächenhaft erfassende Messsysteme (Kameras/Laserscanner) interessant. Terrestrische Laserscanner werden in ingenieurgeodätischen Anwendungen bereits eingesetzt. Unbemannte Fluggeräte (UAV bzw. Drohnen) haben sich ebenfalls in der Vermessung etabliert. Sie ermöglichen eine bevorzugte Sicht auf das zu vermessende Gebiet. Größere Plattformen erlauben die Verwendung von hochauflösenden Kamerasystemen, aktuell bis hin zu 150 Mpix-Kameras, aber auch die Kombination mit Laserscannern. Damit stehen die klassischen Verfahren der photogrammetrischen 3D-Bestimmung von Einzelpunkten bzw. Punktwolken – bildbasiert durch dichte Punktwolkenzuordnung/Dense Image Matching bzw. durch direkte Messung mittels Laserscanning – zur Verfügung und können bei entsprechender Genauigkeit auch für flächige Monitoringanwendungen eingesetzt werden.

Im Unterschied zu den üblichen bemannten Bild- oder Laserflügen aus größeren Flughöhen erlauben es Drohnen, deutlich niedriger zu fliegen. Die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung aus Bildern ist eine Funktion des Bildmaßstabs festgelegt durch den Aufnahmeabstand. Eine geringe Distanz verringert zwar die abgebildete Fläche pro Bild, ist aber positiv für die resultierende geometrische Auflösung und 3D-Punktgenauigkeit. Als erster Richtwert kann eine 3D-Punktgenauigkeit im Bereich von einem Bodenpixel (GSD) angenommen werden. Für die Genauigkeit des Laserscanning ist neben dem Messrauschen die sogenannte Strahldivergenz entscheidend. Die Aufweitung des Messstrahls definiert ebenfalls in Abhängigkeit von der Flughöhe den Durchmesser der von einer Messung am Boden ausgeleuchteten Fläche (Laser-Footprint). Der Laser misst die mittlere Höhe dieses Bodenelements. Niedrige Flughöhen von 50 m und eine angenommene Strahldivergenz von 0,5 mrad erlauben Footprint-Durchmesser von 2,5 cm (Mandlbürger et al. 2015). Das Messrauschen (Präzision) ist systemabhängig. Für mehrzielfähige, gepulst messende Systeme können mittlere absolute Differenzen innerhalb glatter Bereiche im Bereich von 5 bis 20 mm angenommen werden (Mandlbürger et al. 2015). Mehrzielfähige Systeme werden bevorzugt angewendet, da diese die Durchdringung von semi-transparenten Objekten wie z. B. Vegetation erlauben.

2 Monitoring-Projekt Hessigheim

Die Untersuchung der Eignung von UAV-basierten Kameras bzw. Laserscannern für präzises flächenorientiertes Monitoring ist Fokus eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts, welches seit einiger Zeit am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz durchgeführt wird. Als Projektumfeld wurde die Schleusenanlage Hessigheim/Neckar gewählt. Dieses Bauwerk wird aktuell saniert, da Teile der Schleusenanlage in schwierigem Baugrund gründen, was zu Instabilitäten und Bodenabsenkungen führt.

2.1 Bauwerksnetz

Der Kernbereich des Untersuchungsgebiets wird schon länger feinnivellistisch, tachymetrisch und mittels Extensometer beobachtet. Das unmittelbare Bauwerksumfeld wurde bis dato ausschließlich feinnivellistisch mit wenigen Objektpunkten in das bestehende Messprogramm einbezogen. Benötigt wird zukünftig eine verdichtete punkt- und insbesondere hoch aufgelöste flächenmäßige 3D-Oberflächenerfassung. Die zu erfassende Veränderung der eindeutig reproduzierbaren Stütz- und Objektpunkte soll mit einer Maßtoleranz T : $T = \Delta x = \Delta y = \Delta z \leq 1 \text{ cm/a}$ erfolgen (BfG 2017). Diese Toleranz definiert die entsprechende Punktmessgenauigkeit. Um derartige Bewegungen zu erfassen, muss die Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung demzufolge deutlich besser sein.

Die Abb. 1 zeigt das bisherige Bauwerksnetz. Das Vermessungspunktfeld ergibt sich aus 10 Messpfeilern, 4 Hilfspunkten (siehe Abb. 1 links), ca. 150 tachymetrisch zu messenden Objektpunkten, davon ca. 24 zusätzlich feinnivellistisch zu messen und ca. 135 ausschließlich feinnivellistisch zu messenden Objektpunkten (siehe Abb. 1 rechts). Das Messpfeilernetz wird zusätzlich durch GNSS-Basislinienmessungen eingemessen, zwei der Pfeilerpunkte werden dauerhaft als GNSS-Permanentstationen betrieben, die restlichen Punkte nur im Rahmen der Messkampagne beobachtet. Die Einmessung der Bodenpunkte gemäß der Vorgabe im Messprogramm dauert etwa 10 Tage mit zwei Messtrupps à drei Personen. Böhm (2019) gibt die Genauigkeit der Objektpunkte wie gefordert mit $u_x = u_y = u_z \leq 1 \text{ mm an}$.

Im Zuge der Erweiterung soll das Gebiet auf den in der Abb. 1 blau umgrenzten Bereich ausgedehnt werden. Damit wird das bisherige Kernmessgebiet deutlich auf die an den Neckar angrenzenden Bereiche inklusive bebauter Bereiche erweitert, wobei der mittels UAV-Bilder zu erfassende Bereich leicht kleiner definiert ist und durch die blau-gestrichelte Linie umgrenzt wird. Die

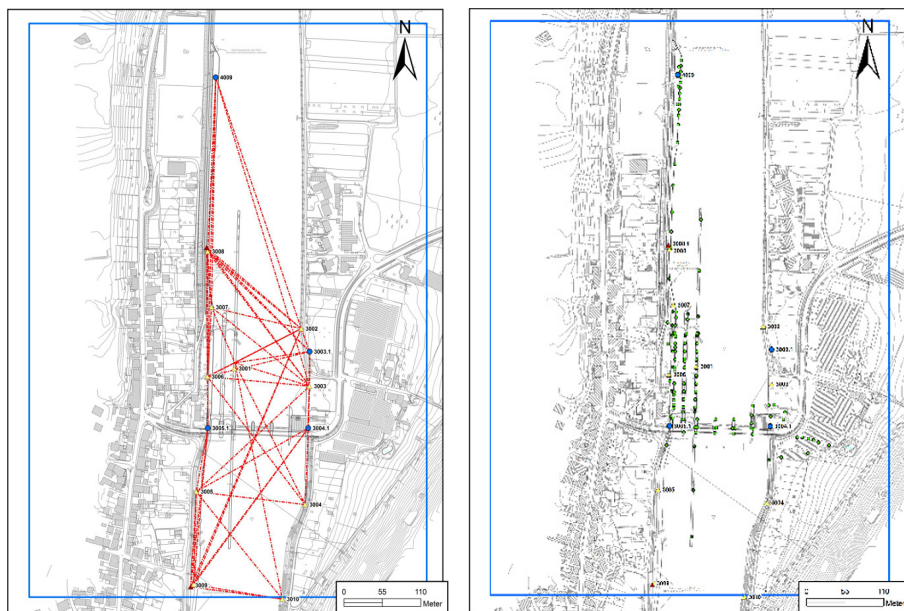


Abb. 1: Übersicht über das geodätische Bauwerksnetz: Netzpunkte mit der Beobachtungsgeometrie für die tachymetrische Messung (links) und die weiteren Objektpunkte (150 3D-Objektpunkte, 135 Höhenpunkte) (rechts)

UAV-Laserbefliegung erfolgt aber im gesamten erweiterten Gebiet. Es ist deutlich erkennbar, dass eine entsprechende punktweise Erweiterung des klassischen Bauwerksnetzes auf diesen deutlich größeren Bereich unter Beibehaltung der relativ hohen Punktdichte nur mit sehr großem Aufwand realisierbar wäre. Aufgrund der dichten Bebauung und der nur bedingten Zugänglichkeit privater Grundstücke wäre eine klassische Vermessung eines solchen Netzes vermutlich auch nur wenig realistisch. Hier bleibt also nur die berührungsfreie Vermessung aus der Luft. Niemeier und Riedel (2016) empfehlen ebenfalls die Verfahren der Fernerkundung zur Überwachung von großräumigen Bereichen mit Oberflächenveränderungen, aber mit Schwerpunkt auf der satelliten-gestützten Radarinterferometrie. Auch in dem hier vorgestellten Monitoringprojekt kommen Methoden der Radarinterferometrie zum Einsatz (Persistent Scatterer Interferometrie), auf die hier aber nicht eingegangen wird (Schneider und Sörge 2020).

Für kleinere Untersuchungsgebiete ist nach Niemeier und Riedel (2016) „eine Befliegung (Flugzeug, ggf. sogar UAV) möglich“, wobei diese Befliegungen im klassischen Sinn eher dem Aufdecken von potenziellen Bereichen mit Objektveränderungen dienen, für das eigentliche Monitoring dann aber die Approxi-

mation der spezifischen Veränderungszone mittels repräsentativer Punkte empfohlen wird. In Bezug auf flugzeuggestütztes Laserscanning erwartet Niemeier und Riedel (2016) Koordinatengenauigkeiten von wenigen Zentimetern.

2.2 Anforderungen an die UAV-Sensorik

Die oben genannten Genauigkeitsanforderungen sind entscheidend für die Auswahl der UAV-Sensorik. Das betrifft die Kamera, wie auch den Laserscanner. Grundsätzlich sind für beide Systeme das Gewicht und die Einbaumaße entscheidend für die Auswahl der Trägerplattform. In der Regel kommen für die nachfolgend diskutierten Systeme nur größere UAVs mit einer Gesamtflugmasse zwischen 10 bis 25 kg in Betracht.

2.2.1 Anforderungen an die Kamera

Für die Auswahl der Kamera kann die angestrebte Genauigkeit in erster Näherung in Relation zu der realisierten Bodenpixelgröße, die sog. Ground Sampling Distance GSD, gestellt werden. Geht man von Genauigkeiten im Bereich von etwa einer GSD aus, erfordert das eine entsprechend kleine GSD. Für das hier vorgestellte Projekt wurden die Bilder mit einer mittleren GSD von etwa 4 mm aufgezeichnet. Diese Festlegung beruht auf der Annahme, dass so die geforderte Maßtoleranz von ≤ 10 mm gesichert eingehalten werden kann.

In diesem Zusammenhang ist aber auch die tatsächliche Bodenauflösung, die sog. Ground Resolving Distance GRD von Bedeutung, da diese die eigentliche Erkennbarkeit von Details in den Bildern festlegt. Qualitativ hochwertige Kamera-Linsen-Kombinationen zeigen i. d. R. ein deutlich besseres Auflösungsvermögen; nur die tatsächlich erkennbaren Strukturen im Bild können auch gemessen werden.

Radiometrisch gute Bilder erlauben eine bessere Qualität der Bildpunktmessung. Dieses sind die entscheidenden Beobachtungen im Rahmen der Bildorientierung. Daher sollte bei der Kamera auf ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis geachtet werden. Das zeigt sich vor allem für Bildflüge unter nicht optimalen Beleuchtungsbedingungen bei denen die Empfindlichkeit/ISO-Zahl des Sensors entsprechend hoch gesetzt werden muss.

Wenn, wie im Monitoring üblich, identische Objektpunkte wiederholt einzumessen sind, muss deren eindeutige Erkennbarkeit in den Bildern sichergestellt sein. Für solch dezidierte Punkte wird daher eine entsprechend luftsichtbare und im Idealfall automatisch messbare Signalisierung (mit Zwangszentrierung) empfohlen. Diese automatische Bildpunktmessung signalisierter Punkte ist für Nahbereichsanwendungen üblich, bedingt aber eine gewisse Mindestgröße der

Signale. Daher wird sie im Luftbildfall eher selten eingesetzt. Für diese Anwendung können aber ausreichend große Signale installiert werden, da durch die kleinen Bodenpixel sichergestellt ist, dass die Signale hinreichend groß in den Bildern abgebildet werden. Im konkreten Fall wurden runde Schachbretttafeln mit einem Durchmesser von knapp 30 cm verwendet. Bei etwa 5 mm großen Bodenpixeln entspricht der Durchmesser des Signals mehr als 50 Pixeln, was für die automatische Messung ausreichend ist. Auf eine zusätzliche Kodierung der Messtafeln wurde aber verzichtet.

Durch die erforderliche geringe GSD spielt auch die Anzahl der Bildelemente der Kamera eine entscheidende Rolle. Das ist zunächst hinsichtlich der Effizienz von Belang: Bei einer größeren Flächenabdeckung pro Bild sind letztlich auch weniger Bilder bzw. Flugstreifen und damit Flüge zur Erfassung des Gebiets notwendig. Die Anzahl der Bilder wirkt sich auch auf die Blockstabilität aus. Ein Bildverband, der aus weniger Bildern und Streifen besteht, ist bei gleicher Überdeckung generell als stabiler zu betrachten.

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen sind auch entsprechende Genauigkeiten für die zugrundeliegenden Pass(punkt)informationen zu fordern. Da das photogrammetrisch zu erfassende Gebiet deutlich über das bisherige Kernmessgebiet hinausreicht, müssen für die spätere Bündeltriangulation zusätzliche Passpunkte koordiniert und signalisiert werden. Diese sollten im Idealfall an den Rändern des aufzunehmenden Gebiets liegen. Die genaue geodätische Einmessung dieser Punkte ist aufwändig, daher wird man im Sinne der Effizienz versuchen die Anzahl der notwendigen zusätzlichen Passpunkte zu minimieren. Auch vor diesem Hintergrund ist ein Bildverband mit weniger Bildern vorteilhaft.

Entscheidend ist letztlich die absolute Genauigkeit der Georeferenzierung des Bildverbands. Prinzipiell ist die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung skalierbar und damit nur eine Funktion des Aufnahmeabstands. Punktmessgenauigkeit und Strahlenschnittgeometrie sind ebenfalls zu berücksichtigen. Wie oben diskutiert spielen Genauigkeit und Verteilung der Passpunkte eine entscheidende Rolle. Sie liefern die Referenzmessungen für die Bildorientierung. Eine zusätzliche Kombination der Kamera mit einem integrierten GNSS/inertial-System zur direkten Messung der Sensortrajektorie ist empfehlenswert. Damit kann der Bildverband weiter stabilisiert werden. Prinzipiell ist für gut überlappende Bildverbände mit flächendeckender Verknüpfungspunktmessung und guter Strahlenschnittgeometrie auch eine präzise GNSS-Trajektorie ausreichend. Die zusätzliche Winkelmessung durch integrierte GNSS/inertial-Systeme unterstützt die Bildorientierung vor allem in den Bereichen, in denen keine Verknüpfung der Bilder möglich ist. Das ist in dem hier vorgestellten Projekt vor allem für die Schleuse und an den Flussufern der Fall, die aber für das Monitoring von besonderer Relevanz sind.

2.2.2 Anforderungen an den Laserscanner

Im Gegensatz zu der im Prinzip beliebig anpassbaren Genauigkeit der bildbasierten 3D-Punktbestimmung sind beim Laserscanner hardware-technische Vorgaben deutlich entscheidender. Im einleitenden Abschnitt wurde diesbezüglich bereits auf das Messrauschen und die sogenannte Strahldivergenz hingewiesen. Für UAV-Anwendungen in Betracht kommende Laserscanner haben fast durchweg eine Strahldivergenz von 0,5 mrad. Um ein 5 mm großes Bodenelement (sog. Footprint) im Nadir zu realisieren, müsste der Scanner 10 m über Grund fliegen. Für realistischere Flughöhen von 40 bis 60 m über Grund sind daher ausgeleuchtete Flächen einer Größe von 20 bis 30 mm zu erwarten. Diese Fläche definiert das kleinste abtastbare bzw. zu messende Objekt.

In diesem Kontext sind auch die Form des Footprints (kreisförmig versus elliptisch), die Strahlqualität (Konstanz des Footprints), der Punktabstand im Vergleich zum Footprintdurchmesser (under sampling, over sampling) und die daraus resultierende Homogenität der Punktverteilung anzumerken.

Die (innere) Genauigkeit der Messung wird wesentlich durch das Messrauschen festgelegt. Hier zeigen sich gewisse Unterschiede bei der aktuell verfügbaren Sensorik. Die herstellerseitig angegebenen Werte liegen je nach System bei 5 bis 40 mm, wobei nur ein System, nämlich der VUX-1UAV Scanner von Riegl, mit nur 5 mm Messrauschen klassifiziert wird, d. h. die Messung einer definierten Entfernung hat eine Standardabweichung von 5 mm.

Zusätzlich zu berücksichtigen ist die absolute Genauigkeit der Entfernungsmesseinheit, die für diesen Scanner mit 10 mm angegeben wird. Entscheidend ist letztlich wie genau also der Messstrahl und damit die Messung in das gewünschte übergeordnete Objektkoordinatensystem transformiert werden kann. Hier spielt aber nicht nur die hardwareseitige Ausstattung eine Rolle, wichtig ist auch die spätere Bestimmung der Lasertrajektorie durch GNSS/inertial-Daten und der nachfolgende Streifenausgleich.

Genau wie für die Bilddaten spielt auch für die Laserstreifen die Georeferenzierung die entscheidende Rolle für die finale Objektpunktgenauigkeit. Üblicherweise werden vergleichbar der Bündeltriangulation für Bilder die Laserstreifen über Verknüpfungen miteinander in Beziehung gesetzt. Zusätzlich werden Korrekturen an den Trajektorienparametern geschätzt, um die sog. Bore sight-Parameter, d. h. die Einbauoffsets/-Winkel zwischen GNSS/inertial-Sensorik und Laserscanner zu bestimmen. Falls notwendig können weitere Bias- oder höherwertigere Spline-Korrekturen verwendet werden, die direkt auf die GNSS/inertial-Positionen und -Winkel wirken. Dadurch wird die GNSS/inertial-Trajektorie aufgeweicht und die Laserstreifen können sich besser aneinander anpassen. Hier muss allerdings sehr vorsichtig vorgegangen werden, da dies unter Umständen durch mögliches Überspringen der Korrektursplines zu Verschlechterungen

der absoluten Genauigkeit führen kann. Eine gute Überdeckung der Laserstreifen ist dafür nötig. Neue Verfahren beziehen weitere Beobachtungen aus parallel und im Idealfall von der gleichen Plattform aus aufgenommenen Bildern ein. Diese zusätzlichen Korrespondenzen zwischen Bild und Laser wirken sich aufgrund der definierten Geometrie des 2D-Bildes deutlich stabilisierend auf die Georeferenzierung der Laserstreifen aus (Glira et al. 2019).

3 Empirische Genauigkeitsuntersuchungen



Abb. 2: Testfeld Schleusenanlage Hessigheim. Alle Punkte sind mit luft sichtbaren Schachbrettafeln signalisiert. Die drei gesondert in rot gekennzeichneten Punkte sind zudem Messpfeiler des Bauwerksnetzes.

Im Rahmen des Hessigheim-Projekts wurden zwischenzeitlich mehrere Testkampagnen durchgeführt. Exemplarisch werden hier die Resultate zweier Befliegungen präsentiert, die das Potenzial des UAV-basierten Monitorings aufzeigen. Die Genauigkeiten werden abgeleitet aus den absoluten Differenzen an den Kontrollpunkten, die im Bereich der Schleusenanlage in ausreichender Anzahl zur Verfügung stehen. Daher beschränken sich die Genauigkeitsuntersuchungen hier auch nur auf diesen Bereich. Die [Abb. 2](#) zeigt das Testfeld. Selbstverständlich wurde im Rahmen der Kampagnen das gesamte deutlich erweiterte Gebiet wie in [Abb. 1](#) dargestellt erfasst. Aufgrund der in Abschnitt 0 diskutierten Anforderungen wurde das Phase One iXM Kamerasystem und der Riegl VUX1-LR Laserscanner für die UAV-Datenerfassung gewählt. Der eigentlich geplante VUX1-UAV Laserscanner stand nicht zur Verfügung. Die Analysen haben aber gezeigt, dass die Messgenauigkeit des VUX1-LR Scanners praktisch identisch mit dem vom Hersteller etwas genauer klassifizierten VUX1-UAV-Systems ist.

Die Bilddatenerfassung fand im November 2018 statt. Verwendet wurde ein Multirotor-Copter der Firma Coptersystems, der mit einer Phase One iXM 100 Kamera mit 35 mm-Objektiv und dem integrierten GNSS/inertial-System Applanix APX-15el UAV ausgestattet war. Das Testfeld wurde in einer Kreuzbefliegung mit 80/60 Überdeckungsverhältnissen aus zwei Flughöhen (40 m/50 m ü. G.) erfasst. Die resultierenden Bodenpixelgrößen sind entsprechend etwa 4 mm bzw. 5 mm. Im Rahmen der integrierten Sensororientierung wurden die Koordinaten der drei Pfeilerpunkte als Passpunkte und die GNSS/inertial-Orientierungselemente als gewichtete Beobachtungen eingeführt. Gleichzeitig wurden die Systemkalibrierparameter mitbestimmt. Diese umfassen sowohl die Kamerageometrie als auch die Boresight-Kalibrierparameter. Durch die hohe Überdeckung kommt es zu bis zu 20-facher Verknüpfung der Bilder. Die unterschiedlichen Flughöhen erlauben zusätzlich die Trennung konstanter Kalibriergrößen von flughöhen- bzw. maßstabsabhängigen Systemparametern.

Die Laserdaten wurden im Rahmen der Projektbefliegung im März 2019 aufgezeichnet. Die Daten wurden aus einer Flughöhe von 50 m ü. G. mit dem Riegl RiCopter-System der Universität Innsbruck geflogen. Dieses UAV ist mit dem Riegl VUX1-LR Scanner und dem Applanix AP 20 GNSS/inertial-System ausgestattet. Der resultierende Abtastfleck hat einen Durchmesser von < 3 cm. Der Scanner weist ein quasi 360°-Scanfeld auf, wobei der Nutzbereich pro Streifen hier auf einen Scanwinkelbereich von nur $\pm 35^\circ$ beschränkt wurde, um die o. a. Größe des Abtastflecks zu gewährleisten. Damit kann ein Schwad von knapp 80 m pro Streifen abgedeckt werden. Die Querüberdeckung der Streifen ist etwa 50 %. Mit einer maximalen Pulsrepetitionsrate von 820 kHz werden die Laserpunkte mit einem Punktabstand von ca. 5 cm abgetastet. Die Orientierung der Laserstreifen erfolgt auf Basis der redundanten Beobachtungen von (glatten) Flächenstücken im Überlappungsbereich der einzelnen Scans. Für die finale Ausgleichung wird das Spline-Korrekturmodell verwendet, bei dem ein einzelner Streifen basierend auf definierten Zeitintervallen in mehrere Teile aufgeteilt wird, wodurch kontinuierliche Positions- und Orientierungsoffsets bestimmt werden können. Die absolute Orientierung wird durch sogenannte ALS-Passflächen – definierte giebelartige Referenzflächen, deren Position und Ausrichtung im Raum exakt bestimmt ist – in der Ausgleichung bewerkstelligt.

Tab. 1 zeigt die erzielten Genauigkeiten aus 18 Kontrollpunktdifferenzen des Testfelds. Der RMS-Wert definiert dabei die absolute Genauigkeit der Objektpunktbestimmung. Setzt man die erzielte Genauigkeit in Bezug zu der Bodenpixelgröße GSD 4 mm für die iXM Bilder aus der Flughöhe 40 m ü. G., so werden in der Lage Genauigkeiten von besser $\frac{1}{4}$ pix, in der Vertikalkomponente eine Genauigkeit von $\frac{1}{2}$ pix erreicht. Die Genauigkeit der Vertikalkomponente des Laserscanners ist marginal schlechter als die photogrammetrische Genauigkeit aus den Phase One Bildern. Die Genauigkeit ist aber deutlich besser als

Tab. 1: Absolute Genauigkeit der 3D-Objektpunktbestimmung. Die Statistik wurde aus 18 signalisierten Kontrollpunkten berechnet, die in beiden Datensätzen vorhanden sind.

		UAV-Kamera iXM 100	UAV-Laser VUX1-LR
RMS [mm]	Ost	1,1	–
	Nord	1,7	–
	Vertikal	2,3	3,1
Mean [mm]	Ost	–0,6	–
	Nord	–0,4	–
	Vertikal	0,3	0,1
Std. Abw. [mm]	Ost	0,9	–
	Nord	1,6	–
	Vertikal	2,3	3,1

das theoretische Messrauschen des Scanners. Das liegt daran, dass aus allen Laserpunkten, die auf dem Kontrollpunktsignal gemessen wurden, zunächst eine mittlere Ebene geschätzt, deren Abstand zur Referenzhöhe des Kontrollpunkts dann ermittelt wurde. Insgesamt sind die erzielten Resultate sehr zufriedenstellend.

4 Diskussion

Die obigen Auswertungen zeigen das hohe Potenzial der UAV-gestützten Objektpunktbestimmung und damit auch dessen prinzipielle Eignung für Monitoringanwendungen. Die in der Tab. 1 nachgewiesenen absoluten Genauigkeiten wurden an definierten, mit Signaltafeln versehenen Kontrollpunkten erzielt, können aber auch auf andere natürliche, aber klar definierte Punkte übertragen werden. Für die Laserpunktbestimmung sind dazu definierte horizontale Flächen zu bevorzugen. Die Interpolation einer ausgleichenden Ebene durch mehrere Einzelpunktmessungen erlaubt hier die Reduktion des Messrauschens der Einzelmessung und steigert damit die Genauigkeit der Höhenmessung.

Entscheidend für die erreichte Genauigkeit ist wie bereits diskutiert die Genauigkeit der Georeferenzierung. Diese beruht auf einer ausreichenden Anzahl von Passpunkten und ggf. weiteren speziellen Referenzflächen für die Laser-scannerdaten. Diese Passpunkte umschließen das zu untersuchende Gebiet und definieren den Passpunktrahmen. Wenn Genauigkeiten im Bereich von wenigen Millimetern zu erzielen sind, müssen auch die Passinformationen mit

dieser hohen Genauigkeit zur Verfügung stehen. Im Vergleich zu dem aktuellen Festpunktfeld, das als Kernmessgebiet nur das eigentlichen Schleusenbauwerk umfasst, sind die Referenzpasspunkte deutlich großflächiger anzuordnen. Die bislang durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die präzise Einmessung eines solchen erweiterten Passpunktfelds mit einem deutlichen Messaufwand verbunden ist, vor allem dann, wenn diese für die UAV-Befliegungen notwendigen Punkte nur als temporäre Passpunkte, also nur für den Zeitpunkt der Messung realisiert werden. Empfehlenswert sind daher auch in den Randbereichen des erweiterten Monitoringgebiets permanent vermarkte Punkte, die mit entsprechenden Signalisierungen für jede Messkampagne luftsichtbar gemacht werden können. Wenn diese Referenzpunkte nicht garantiert werden, können die im Testfeld erzielten Genauigkeiten nicht in die Fläche übertragen werden.

Sowohl Laser als auch Kamera sind mit GNSS/inertial-Sensorik ausgestattet. Damit schließt die Kalibrierung neben dem zu orientierenden Sensor immer auch diese Navigationssensorik ein. Die Qualität der Gesamtsystemkalibrierung ist entscheidend. Eine sehr stabile Blockgeometrie wie im Beispiel der obigen Phase One Befliegung ist der Idealfall für eine derartige Kalibrierung. Diese Geometrie kann aber nicht unbedingt für die gesamte Fläche garantiert werden. Daher ist es unter Umständen notwendig, eine in-situ-Kalibrierung aus einem Testfeld als fest für die weiteren Flüge anzunehmen. Hier sind geometrisch stabile Systeme vorteilhaft. Für die Stabilisierung der Laserstreifen wurden daher extra zusätzliche Stützstreifen geflogen, die durch die zusätzlichen Verknüpfungen den Block weiter versteifen.

Es ist ohne Zweifel klar, dass man sich mit den hier angestrebten Genauigkeiten immer an der Grenze des aktuell technisch Machbaren befindet. Das gilt aber nicht nur für die UAV-Datenerfassung, sondern auch für die Bereitstellung der präzisen Referenzpunkte. In Rahmen der Auswertungen des obigen Laserflugs wurde zum Beispiel ein nicht erwarteter Offset in der Zeitsynchronisation zwischen den Messungen des Laserscanners und der GNSS/inertial-Trajektorieninformation in der Größenordnung von 1,2 msek nachgewiesen. Nach Korrektur dieses Fehlers konnte die relative Orientierung der Streifen signifikant von einer mittleren Abweichung von 1,2 cm auf 1 mm reduziert werden.

Vielsprechend sind in diesem Zusammenhang die Verfahren der hybriden Ausgleichung, also die gleichzeitige Berücksichtigung von parallel erfassten Bild- und Laserdaten. Dieses wurde schon empirisch an diesen Datensätzen nachgewiesen, allerdings nur in Kombination mit den standardmäßig auf dem RiCopter installierten schrägblickenden Sony Alpha 6000 Kameras, die primär eigentlich der Texturierung der Laserpunktwolke dienen. Diese Bilder haben deutlich größere Bodenpixel, die durch die starke Perspektive zusätzlich noch je nach Lage im Bild in der Größe variieren. Das erschwert die Punktzuordnung und Verknüpfung mit den Laserdaten. Vor diesem Hintergrund wird für

zukünftige Tests eine gemeinsame Verwendung von hochauflösender nadirblickender Kamera- und Lasersensorik auf einer Plattform angestrebt. Die aktuellen auch kommerziellen Systementwicklungen gehen deutlich in diese Richtung. Derzeit kommen UAV-Plattformen auf den Markt, die Phase One 100 MPix Kamera, Riegl VUX-Laserscanner und präzise GNSS/inertial-Sensorik in einer Plattform integrieren und damit genau das gewünschte Instrumentarium zur Verfügung stellen. Damit sollte der angestrebte Genauigkeitsbereich von wenigen Millimetern bei einem vertretbaren Aufwand für die Bereitstellung photogrammetrischer Passpunkte flächendeckend realisierbar sein.

Dieser Beitrag hat schwerpunktmäßig nur die Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung thematisiert. Das ist auch die klassische Aufgabe des Monitorings. Nicht angesprochen wurde der Mehrwert, der durch die wirkliche 3D-Erfassung des gesamten Gebiets erzielt wird. Als Motivation sollen hier nur die nachfolgenden Grafiken dienen. Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt aus der gemeinsam dargestellten Laser- und photogrammetrischen Punktwolke und Abb. 4 den entsprechend markierten Profilschnitt.

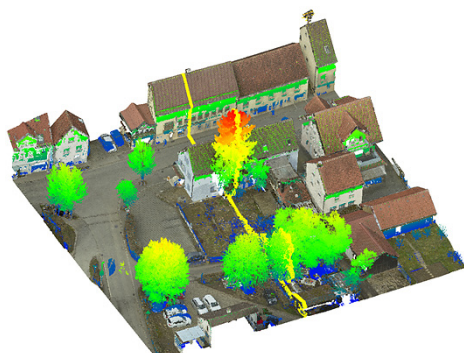


Abb. 3:

Vergleich der photogrammetrischen (RGB-koloriert) und Laserpunktwolke (eingefärbt nach Reflektanz – blau: gering, rot: hoch) für einen Ausschnitt des erweiterten Testfeldbereichs. Gelb hervorgehoben ist der Bereich für den Profilschnitt in der Abb. 4.

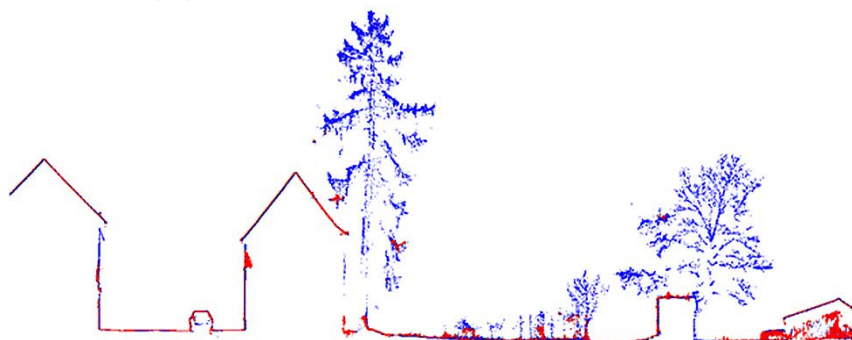


Abb. 4: Vergleich eines Profilschnittes durch die photogrammetrische (rot) und Laserpunktwolke (blau)

Deutlich zu erkennen ist die hohe Detailinformation, die in diesen Punktwolken enthalten ist. Darüber hinaus kann in dem Profilschnitt auch die Überlegenheit des Laserscannings bei semi-transparenten Objekten wie Vegetation erkannt werden. Hier liefert die photogrammetrische Bildpunktzuordnung keine Ergebnisse, weshalb die Bäume und andere Vegetation in der Regel nicht oder nur rudimentär in der dichten Punktwolke aus Dense Image Matching (DIM) enthalten sind.

5 Fazit

Im obigen Beitrag wurde die Eignung von UAV-basiertem Monitoring diskutiert. Es handelt sich vermutlich um die erste UAV-Datenerfassung, die eine derartige hochgenaue 3D-Objektrekonstruktion für ein vergleichbar großes Untersuchungsgebiet anstrebt. Die vorgestellten Ergebnisse sind sehr zufriedenstellend. Für definierte Flächen können unter Berücksichtigung aller Vorgaben absolute Genauigkeiten im Bereich von besser 5 mm gesichert nachgewiesen werden. Bei angenommenen Veränderungen im Objektraum in der Größenordnung von 1 cm/a sollten Deformationen nach etwa sechs Monaten nachweisbar sein.

Die im Rahmen des klassischen Monitorings erzielten Genauigkeiten in der Größenordnung von 1 mm für definierten Einzelpunkte sind aber nicht zu erreichen. Dafür liefert der UAV-basierte Ansatz die volle flächendeckende 3D-Information auch für Bereiche, die für klassische terrestrische Messverfahren kaum oder nur mit großem Aufwand zugänglich sind. Vor diesem Hintergrund ist das UAV-basierte Monitoring auf jeden Fall als Erweiterung der klassischen Verfahren zu sehen, vor allem dann, wenn die in diesem Beitrag erwähnten Randbedingungen berücksichtigt werden. Die parallele Erfassung und zukünftig gemeinsame Auswertung von UAV-Bild- und Laserdaten nutzt das tlw. komplementäre Verhalten: Der stabilen Geometrie und sehr hohen Auflösung der Bilder stehen die Vorteile des Laserscannings bei semi-transparenten Objekten gegenüber.

Danksagung

Die Autoren danken allen Beteiligten, die zum Gelingen des Hessigheim-Projekts beigetragen haben. Ausdrücklicher Dank gilt dabei vor allem den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der BfG in Koblenz, des Amts für Neckarausbau Heidelberg und des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart.

Literatur

- BfG (2017): Projekt 301_BfG: Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke (Ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring), interner Projektbericht, Bedarfserhebung experimentelle FuE-Aktivitäten, Bundesanstalt für Gewässerkunde, M5-Geodäsie + Objektvermessung, Koblenz.
- Böhm, K. (2019): Beobachtung lokaler Bauwerksnetze bei instabilem Baugrund. Vortrag im Kolloquium Ingenieurgeodäsie für eine zeitgemäße Infrastruktur der Bundeswasserstraßen, Koblenz, 13.+14. November 2019. www.bafg.de/DE/05_Wissen/02_Veranst/2019/2019_11_13_Boehm.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff 01/2020.
- DIN 18710-1 (2010): Deutsche Norm: Ingenieurvermessung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin.
- Eichhorn, A., Heunecke, O., Kuhlmann, H., Neuner, H. (2015): Methoden und Modelle bei ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen. In: Handbuch der Geodäsie, Freeden, W., Rummel, R. (Hrsg.), Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-662-46900-2_30-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2_30-1).
- Gkira, P., Pfeifer, N., Mandlbürger, G. (2019): Hybrid Orientation of Airborne LiDAR Point Cloud and Aerial Images, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2/W5, 567–574. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-567-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-567-2019).
- Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., Niemeier, W. (2013): Ingenieurgeodäsie – Definition, Kernkompetenzen und Alleinstellungsmerkmale. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2013, 138. Jg., 391–399.
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Riegl, U., Haring, A., Wieser, M., Gkira, P., Winiwarter, L. (2015): Complementing Airborne Laser Bathymetry with UAV-based LiDAR for Capturing Alluvial Landscapes. Proc. SPIE 9637, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII, 96370A. DOI: [10.1117/12.2194779](https://doi.org/10.1117/12.2194779).
- Niemeier, W., Riedel, B. (2016): Monitoring von Hangrutschungen. In: Handbuch der Geodäsie, Freeden, W., Rummel, R. (Hrsg.), Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-662-47188-3_34](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_34).
- Schneider, P., Sörgel, U. (2020): Monitoring einer Schleuse mittels satellitengestützter DInSAR-Techniken. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 29, DGPF-Jahrestagung 2020 in Stuttgart, 4.–6. März. www.dgpf.de/src/tagung/jt2020/proceedings/start.html.

Kontakt

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

Patrick Havel
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat M5 – Geodäsie
Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
havel@bafg.de

Session 4: Praxiserfahrungen

Hochpräzise Objekterfassung mit UAV am Beispiel einer Gleisanlage

Markus Gerke | Yahya Ghassoun | Ahmed Alamouri |
Markus Bobbe | Yogesh Khedar | Frank Plöger

1 Einleitung

Die Kranschienen der Lagerkrane des Containerlagers im Container Terminal Altenwerder (CTA) der HHLA Hamburg Hafen und Logistik AG unterliegen großen Anforderungen hinsichtlich einer unveränderten Position und der exakten Spurführung. Die geomorphologische Beschaffenheit des Baugrundes im Hafen führt jedoch fortlaufend zu signifikanten Setzungen und Spuränderungen der Schienenanlagen, die deshalb regelmäßig überprüft, vermessen und nachgebessert werden müssen.

Die heutigen halbautomatischen Messmethoden sind sehr aufwendig und kostenintensiv. Sie sind arbeitssicherheitstechnisch mit einem Restrisiko behaftet und führen zu einer stunden- bzw. tageweisen Stilllegung von Containerlagerbereichen, was zu entsprechenden betrieblichen und kapazitiven Einschränkungen führen kann. Im Forschungsprojekt *AeroInspekt* soll mit Hilfe von auf einem Multicopter installierten Kamerasystem eine automatische und während des laufenden Betriebes durchführbare Vermessung der Kranschienen erzielt werden. Die Automatisierung soll sich hierbei sowohl auf die Flugdurchführung beziehen, vor allem hinsichtlich der Berücksichtigung der sich auf den zu vermessenden Schienen bewegenden Krane, als auch bezüglich der Bildauswertung zur Messung der Schienenlage. Vorrangiges Ziel des Projektes ist es, theoretisch und experimentell zu eruieren, welche Vor- und Nachteile sich aus einem Multicopter-basierten Ansatz ergeben.

Beim CTA kommen sog. „Double Rail Mounted Gantry Cranes“ (DRMG) zum Einsatz, die Spurweiten von 31 m bzw. 41 m, sowie Höhen von 21 m bzw. 24 m haben. In [Abb. 1](#) ist ein Block im CTA skizziert. Seeseitig werden Container mit der Containerbrücke entladen und mit Hilfe der automatischen Transportfahrzeuge AGV (Automated Guided Vehicle) zum Blocklager gebracht. Dort lagern die DRMG die Container, bis diese landseitig von LKW oder der Bahn weitertransportiert werden. Die Container für den Schiffstransport werden auf der Wasserseite wieder auf ein AGV verladen.

Die Anforderungen an die Genauigkeit der Lage- und Höhenmessungen der Schienen ergibt sich aus der Richtlinie VDI 3576 bzw. der Spezifikation des

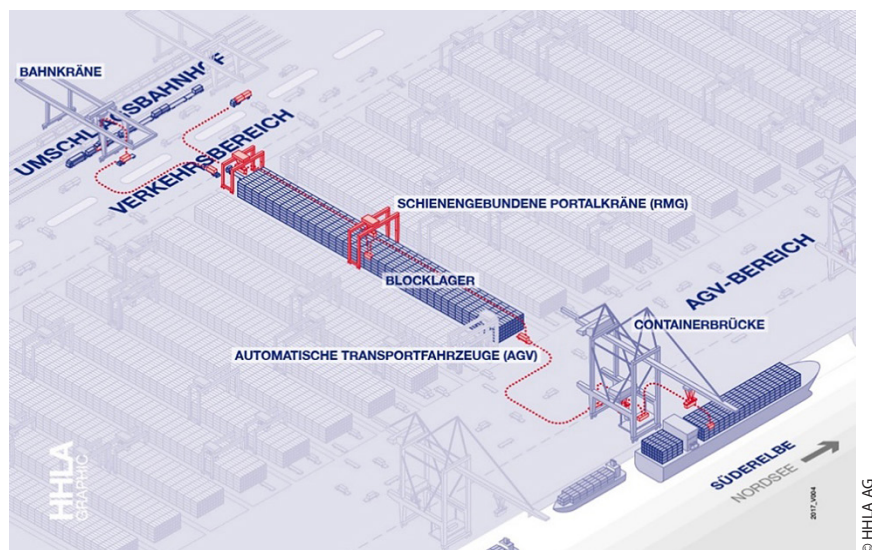


Abb. 1: Skizze des Lagerbereichs im CTA

Kranherstellers. Für die Spurweite gilt eine Toleranz von ± 10 mm für die Höhenlage ± 100 mm.

In diesem Beitrag wird das laufende Projekt vorgestellt. Wir gehen auf die Systemauswahl, die Vermessung der Bodenpasspunkte und die Befliegung vor Ort, sowie auf die automatische Messung der Schienenlage in den aus den Bildverbänden erzeugten Daten ein. Erste Ergebnisse zeigen das Potenzial des automatischen Ansatzes, aber auch die Herausforderung hinsichtlich der Erreichbarkeit und Überprüfbarkeit der Genauigkeit. Eine weitere wichtige Komponente, die Detektion der sich bewegenden Krane während des Bildfluges, wird hingegen hier nicht thematisiert.

Für eine photogrammetrische Erfassung bzw. Feststellung der Schienenlage und -höhe spielen viele Faktoren eine Rolle, wenn es um die Abschätzung der geometrisch zu erreichenden Genauigkeit geht. Zunächst muss festgehalten werden, dass sich die Toleranz auf die maximale Ablage bezieht. Entsprechend Kuhlmann et al. (2017) gilt bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % für die einzuhaltende Messgenauigkeit $\sigma = T/4$, mit T : Toleranz. Für dieses Projekt wird daher eine Messgenauigkeit in der Lage von $\sigma_{xy} = 2,5$ mm für die Lage angesetzt und für die Höhengenaugkeit $\sigma_z = 25$ mm gefordert.

Im Folgenden gehen wir zunächst auf die Auswahl des Flug- und Kamerasystems ein, eine zusätzliche Fragestellung betrifft die Laborkalibrierung der Kameraparameter. Im Anschluss daran werden Details zur Netzmessung, die zur Lagerung der Bodenpasspunkte notwendig ist, erläutert. Das vierte Kapitel

widmet sich der Methodik zur automatischen Messung der Schienenlage in Orthobildern und dem Höhenmodell. Kapitel 5 geht schließlich auf die erzielten Ergebnisse ein.

2 Systemauswahl und Kamerakalibrierung

2.1 Trägersystem und Kamera

Die Auswahl der Kamera und des Trägersystems ist ein kritischer Schritt in diesem Projekt, denn es gilt einige Besonderheiten und spezielle Anforderungen zu beachten. Die Flughöhe sollte 35 m über Grund im Praxisbetrieb nicht unterschreiten, um einen Sicherheitsabstand zu den im Betrieb befindlichen Kranen zu gewährleisten. Zudem soll die Bodenauflösung so hoch wie möglich sein, aber die Pixelgröße darf andererseits auch nicht beliebig klein sein, um ein gutes Signal-/Rauschverhältnis zu gewährleisten bzw. um kurze Belichtungszeiten realisieren zu können. Hinsichtlich des Trägers sollte beachtet werden, dass bei relativ hoher Traglast eine ausreichend lange Flugzeit gewährleistet werden kann. Ferner ist eine Positionierung über RTK-GNSS zur genauen Navigation, aber auch zur Stützung des Bildverbandes wünschenswert (Gerke und Przybilla 2016), auch wenn die zu erwartende innere Genauigkeit des photogrammetrischen Blocks um eine Größenordnung besser als RTK-GNSS ist. Nach einer eingehenden Literatur- und Marktrecherche wurde folgendes System für das Projekt angeschafft:

- *Kamerasensor*: PhaseOne iXM 100 MP: Auflösung 11.664×8.750 , Sensor $43,9 \text{ mm} \times 32,9 \text{ mm}$ (Mittelformat), Pixelgröße $D = 3,8 \text{ }\mu\text{m}$, Masse: 630 g
- *Objektiv*: PhaseOne RSM 150 mm: Brennweite $f = 150 \text{ mm}$ (diagonaler Öffnungswinkel bei dem gewählten Sensor: 19°), Masse: 750 g
- *Träger*: DJI Matrice 600pro mit RTK und Ronin MX Gimbal (Masse: 2150 g), Flugzeit nominell bei voller Batteriebestückung und der Zuladung von ca. 3,6 kg: 20 Minuten

Aus dieser Konfiguration ergeben sich folgende theoretische Kennwerte bei einer Flughöhe von 35 m:

- Bildmaßstab, $m = 1/235$,
- $GSD = m * D = 0,9 \text{ mm}$,
- angenommene Punktmessgenauigkeit Lage: Bildkoordinaten: $s_x = s_y = 0,5 * D$, Objektkoordinaten $s_x = s_y = m * s_x = m * s_y = 0,5 \text{ mm}$.
- Die Höhenmessgenauigkeit lässt sich über das Höhen-Basis-Verhältnis abschätzen. Die Basis ist im besten Fall die halbe Bildbreite bei quer eingebauter Kamera, also ca. 4,5 m. Das heißt, dass sich die Höhengenaugkeit theoretisch

gegenüber der Lage um Faktor $H/B = 35/4,5 \approx 7$ verschlechtert. Da jedoch eine hohe Überlappung und damit Redundanz vorliegt, kann dieser Faktor entsprechend Förstner (1988) für Mehrbildphotogrammetrie mittels $\sqrt{k^3}$ korrigiert werden, wobei k die Anzahl der Bilder, in der ein Punkt beobachtet wird, darstellt.

Aus diesen Daten und den Anforderungen, die sich aus der Toleranz ergeben, wird klar, dass für eine durchgreifende Realisierung und Überprüfung ein 3D-Passpunktfeld mit sehr hohen Genauigkeitsansprüchen realisiert werden muss. Auf diesen Aspekt geht Kapitel 3 ein.

2.2 Laborkalibrierung

Eine Schwierigkeit bei diesem Projekt ist, dass die zu vermessene Szene einer Ebene entspricht und deshalb die Schätzung der internen Kameraparameter im Rahmen der Bündelausgleichung (Simultankalibrierung) wegen der starken Korrelation zwischen Brennweite und Objektstand vermutlich nicht zuverlässig durchgeführt werden kann. Es ist bei dem gewählten Kamerasystem zusätzlich zu beachten, dass die Optik erst ab einem Objektstand von 750 m auf Unendlich fokussiert werden kann. Vor diesem Bereich wird motorisch die dem Abstand entsprechende Brennebene eingestellt, die laut Herstellerangaben mit einer Genauigkeit von ca. 6 Mikrometer, also 1,5 Pixeln, angefahren werden kann. Für jegliche Kalibrierungsmethodik bedeutet das, dass die internen Kameraparameter für jede Flughöhe separat geschätzt werden müssen.

Die Kamera wurde im Vorfeld der ersten Befliegung am Institut für optische Sensorsysteme, DLR, Berlin kalibriert. Hierbei kam ein Verfahren, das mit optischen Beugungsgittern arbeitet (DOE, diffractive optical elements) zum Einsatz, siehe (Bauer et al. 2008) und (Dahlke et al. 2019). Bei dieser Kalibrierung wird mittels Laser und einer Beugungseinheit ein geometrisch hochgenau definiertes Muster von der Kamera hinter einem Kollimator aufgenommen. Das Abbildungsmodell, das die Kalibrierungsparameter der Kamera inklusive der optischen Verzeichnung beinhaltet, wird anhand einer Aufnahme iterativ optimiert. Dahlke et al. (2019) zeigen, dass diese Methode zu ähnlich guten Ergebnissen wie eine 3D-Testfeld-Kalibrierung führt. Ein Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass die Verzeichnungsparameter und die Brennweite nicht dekorreliert werden können, da nur eine Aufnahme genutzt wird.

Wegen des kleinen Sichtfeldes aufgrund der langen Brennweite wurden nur ca. 300 Diffraktionspunkte auf dem Sensor abgebildet, weshalb die Ergebnisse nicht so sicher sind, wie beispielsweise in den vorgenannten Veröffentlichungen gezeigt wurde. Die Objektentfernungen wurden auf 35 m und 20 m eingestellt

und die Messungen wurden vier bzw. zwei Mal wiederholt. Ermittelte Kalibrierungsparameter wurden jeweils gemittelt. Die rechnerische Genauigkeit für die Brennweite lag bei $s_f \approx 0,1$ Pixel und für die Hauptpunktlage bei $s_{u0} \approx s_{v0} \approx 1$ Pixel. In Kapitel 5 wird eine Bündelblockausgleichung, bei der diese Parameter angenommen werden mit einer simultankalibrierenden Ausgleichung verglichen.

3 Genauigkeitsaspekte und Festpunktfeld

Einige Aspekte sind bei der Festlegung der zu erreichenden Lage- und Höhen-genauigkeit des Festpunktfeldes zu beachten. Die höchste Anforderung ist durch die zu erwartende innere Genauigkeit des photogrammetrischen Blocks gegeben: Selbst bei pessimistischer Annahme, dass gut definierte Punkte nicht besser als ein Pixel bestimmt werden können, liegt die zu erwartende Genauigkeit im Bereich der GSD, also ca. $s_{xy} \approx GSD = 0,9$ mm. Das bedeutet, dass für eine durchgreifende Genauigkeitsüberprüfung bei der Nutzung einer einfachen Daumenregel eine Netzgenauigkeit von $s_{xy} = 0,3 * GSD \approx 0,3$ mm realisiert werden muss. Bei einer Ausdehnung des Schienenbereichs, inkl. Nebenbereichen, von 30×330 m im Außenraum wäre hierfür selbst eine Messung mit hochgenauen Lasertrackern nur sehr schwer zu realisieren. Aus diesem Grund wurde die Zielgenauigkeit, die sich aus den oben diskutierten Toleranzen für die Schienenlage ergibt, angehalten. Bei der Annahme derselben Daumenregel ergeben sich aus den Zielgenauigkeiten $\sigma_{xy} = 2,5$ mm bzw. $\sigma_z = 25$ mm Werte für die Netzmessung von $\sigma_{xy'} \approx 1$ mm bzw. $\sigma_{z'} \approx 10$ mm. Falls diese Genauigkeiten erreicht werden können (bei guter Verteilung der Passpunkte), kann zwar der photogrammetrische Block nicht durchgreifend getestet werden, jedoch kann die Toleranz der Schienenlage überprüft werden. Eine Annahme dabei ist natürlich, dass der Schienenkörper hinreichend genau in den Bildern erfasst werden kann.

Für einen weitestgehend automatischen Arbeitsfluss bei der photogrammetrischen Auswertung und zur Gewährleistung hoher Punktmessgenauigkeiten war eine Anforderung, dass codierte Zielmarken als Pass- und Kontrollpunkte verwendet werden sollten. Eine traditionelle Einmessung von fest vermarkten Punkten schied deshalb prinzipiell aus. Aus diesem Grund wurde eine Kombination aus drehbaren Prismen und codierter Zielmarke entwickelt (Abb. 2). Die beiden Prismen und das Zentrum der Zielmarke sind in einer Achse angeordnet und die Abstände sind kalibriert. Durch die Einmessung der beiden Prismen kann deshalb die Lage und Höhe des Zentrums der Marke durch Extrapolation bestimmt werden. Die Wahl von zwei Prismen wurde vorgenommen, da eine lotrechte Aufstellung dieser Kombinationen nicht gewährleistet werden kann.



Abb. 2: Der Aufbau der Zielmarke mit den Prismen: die Zentren der drei Elemente sind kollinear angeordnet, die Abstände sind bekannt (links); Marke im Luftbild (rechts).

Für den ersten Versuch im Sommer 2019 wurden 20 solcher Kombinationen von Prismen und Zielmarken produziert und an Betongewichte befestigt, die somit einerseits mobil eingesetzt werden, aber auch über einen gewissen Zeitraum als stabil stehend angenommen werden können.

Eine Schwierigkeit bei der Vermessung innerhalb dieses langgestreckten Bahn-Objektes ist, dass Festpunkte nur recht weit außerhalb zur Verfügung stehen. Eine Simulation im Vorfeld der Messkampagne hat ergeben, dass trotzdem die erforderlichen Lage- und Höhengenaugkeiten bei optimalen Bedingungen erreichbar sind.

Bei der Kampagne hat sich dann jedoch gezeigt, dass lediglich vier Anschlusspunkte von dem betrachteten Block aus sichtbar sind, und weiterhin waren die meteorologischen Bedingungen nicht ideal (wolkenfreier Himmel, direkte Sonneneinstrahlung). Die realisierte Netzkonfiguration inkl. Fehlerellipsen an den 20 Bodenpunkten (2×20 Prismen) ist in Abb. 3 skizziert.

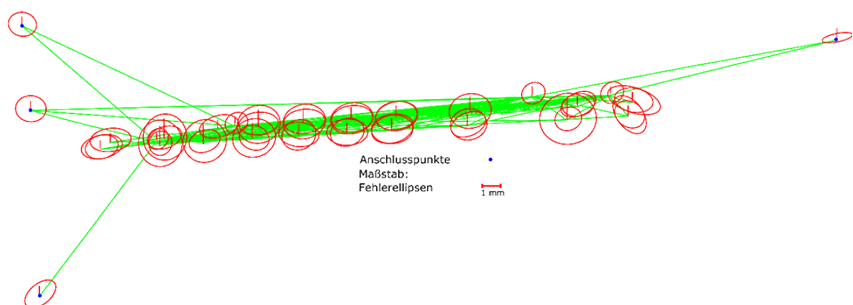


Abb. 3: Netzgrafik der ausgeglichenen Koordinaten inkl. Fehlerellipsen

Durch den Einsatz von Zielerkennung des genutzten Tachymeters Leica MS50 konnte eine automatisierte Satzmessung erreicht werden. Allerdings bringt dieses Hilfsmittel in dieser Netzkonfiguration die Problematik mit sich, dass Ziele, die nahezu in einer Flucht stehen, schnell von dem Tachymeter verwechselt werden können. Atmosphärisches Flimmern aufgrund der Bodennähe verschärft diese Problematik.

Die Ausgleichung wurde mit dem Softwarepaket PANDA durchgeführt und beruht auf dem Prinzip der freien Netzausgleichung. Dieses Netz wurde dann auf den vier Anschlusspunkten gelagert. Im Anschluss an die Netzausgleichung wurde die oben erwähnte Extrapolation der Koordinaten vorgenommen. Die Extrapolation erfordert eine Varianzfortpflanzung, sodass die Genauigkeiten der extrapolierten Koordinaten für die photogrammetrischen Zielmarken bestimmt werden können. Im Mittel wird eine 3D-Genauigkeit von 3 mm erreicht, in der Lage sind es $s_{xy'} \approx 2,8$ mm und in der Höhe $s_z' \approx 1,2$ mm. Es ist bei der Auswertung bei drei Punkten zu unerklärbaren Koordinatendifferenzen aus der Messung von verschiedenen Gerätestandpunkten gekommen, so dass diese aus dem Netz genommen wurden, somit blieben 17 Bodenpunkte für die photogrammetrische Auswertung erhalten.

Die oben geforderte Genauigkeit wurde also zumindest für die Lage nicht erreicht und diese Feststellung muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

4 Automatische Messung der Schienenlage

Der Ansatz erfordert das digitale Oberflächenmodell (DEM), welches die 2,5D-Informationen für das Untersuchungsgebiet enthält. Das Verfahren zielt darauf ab, die Kanten und die Mittelpunkte der Schienen aus dem DEM zu extrahieren. Zu diesem Zweck werden in einem Abstand von 5 cm Profile in das DEM quer zur Schienenrichtung gelegt. Die Lage der Profile und ein beispielhaftes Profil sind in Abb. 4 gezeigt.

Da die dichte Bildzuordnung auf dem Schienenstück zu fehlerhaften Punkten führen kann, werden nur Profile berücksichtigt, die im oberen Bereich um weniger als ± 3 cm vom Mittelwert streuen. Aus den validen Profilen werden dann die unteren Punkte, die direkt an die Flanke anschließen, extrahiert. Durch die Punkte aus den beidseitigen 6 benachbarten Profilen wird eine vermittelnde Gerade gelegt, um den Einfluss von Zuordnungsfehlern weiter zu reduzieren (Abb. 4, oben, gelbe Punkte).

Die Referenzachse für jede Schiene ist von der HHLA vorgegeben (siehe gestrichelte Achse in Abb. 4). Über die halbe vorgegebene Schienenbreite wird aus den gemittelten Profilpunkten die tatsächliche Lage ermittelt. Diese wird in 2-m-Abständen protokolliert und mit Referenzmessungen verglichen.

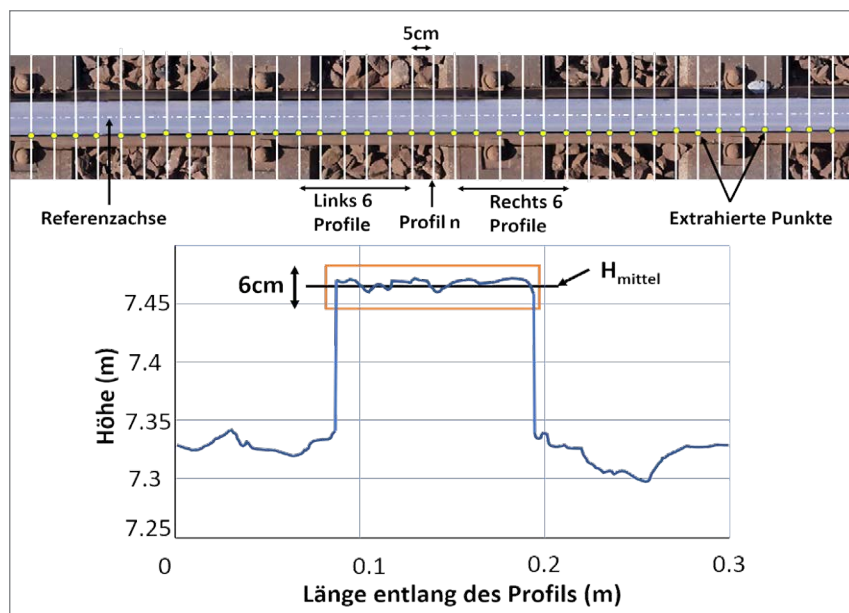


Abb. 4: Simulierte Schnitte im Abstand von jeweils 5 cm, Mittelung über 6 Profile, Referenzachse (oben) und Profilschnitt (unten)

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird von der ersten Flugkampagne berichtet, welche im Juni 2019 auf dem CTA stattfand. Hierfür wurde ein Block gewählt, dessen Schienen kurz zuvor erneuert wurden und in dem deshalb auch keine Container lagerten. Eine konventionelle Lagemessung der Schienen wurde mit dem Schienenmesswagen der Firma Hanack und Partner und einem Gleiswinkel durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit jenen des hier entwickelten Verfahrens verglichen (siehe Abschnitt 5.4). Flüge mit dem System wurden sowohl außerhalb des Betriebes der Krane durchgeführt, als auch während des Betriebes, vor allem, um den Ansatz zur Detektion der Krane zu testen, auf den aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird.

5.1 Flugplanung und Datenerfassung

Das zu befliegende Areal zwischen zwei Lagerblöcken beinhaltet 4 Schienen und misst 310×14 m. Die Projektion eines Bildes hat eine Größe von $10,4 \times 7,8$ m. Ziel der Planung war zum einen die Erfassung des Areals in einem Flug, zum

anderen sollte die resultierende Anzahl der Bilder nicht unnötig hoch sein, um die anschließende Prozessierung in sinnvollen Zeitrahmen durchführen zu können.

Um Bewegungsunschärfe in den Bildern zu begrenzen ist die maximale Geschwindigkeit des Fluggeräts limitiert auf:

$$v_{\max} = \frac{0,5 \cdot \text{GSD}}{t_{\text{exposuremin}}} = \frac{0,5 \cdot 0,9 \text{ mm}}{0,4 \text{ ms}} = 1,125 \text{ m/s} \approx 1,1 \text{ m/s}$$

In Tab. 1 ist der Einfluss von Vorwärts- und Seitenüberlappung (OL/SL) für die Befliegung des Missionsareals dargestellt. Die maximale Auslösefrequenz der Kamera beträgt 3 Hz, die Wahl einer sehr hohen Überlappung wäre daher möglich, führt jedoch zu mehr Bildern und somit zu einer entsprechend hohen Prozessierungszeit. Eine Variation der Seitenüberlappung hat direkt Einfluss auf die Anzahl der Flugstreifen, was sowohl die Flugzeit, als auch die Anzahl der Bilder erhöht. Die Wahl von 80 % / 70 % (OL/SL) scheint so ein sinnvoller Kompromiss.

Tab. 1: Einfluss von Vorwärts- und Seitenüberlappung (OL/SL) auf relevante Missionsparameter

OL / SL	Trigger	Bilder	OL / SL	Streifen	Flugzeit	Bilder
90 / 70 %	1,4 Hz	1550	80 / 90 %	6	28 min	1170
80 / 70 %	0,7 Hz	780	80 / 80 %	5	23 min	970
70 / 70 %	0,5 Hz	520	80 / 70 %	4	19 min	780
60 / 70 %	0,4 Hz	390	80 / 60 %	3	14 min	590

Um den speziellen Anforderungen des Vorhabens gerecht zu werden, wurde im Rahmen des Projekts die Bodenstations-App „Inspekt GS“ entwickelt. Sie ermöglicht zum einen die Planung der Mission mit den hier festgelegten Parametern. Zum anderen sind Funktionen zur automatisierten Identifikation von ungültigen Fotos (vor allem aufgrund von Verdeckung durch Krane) und eine anschließende reaktive Missionsplanung implementiert.

Die Identifikation nutzt hier entweder externe Informationsquellen (z. B. aktuelle Position von Kranen) oder Computer-Vision-Algorithmen auf dem Live-Kamerabildes. Die App ist mittels dem DJI-Mobile-SDK für Android implementiert, ist kompatibel mit gängigen DJI Drohnen und deckt den gesamten Arbeitsfluss von Missionsplanung, -überwachung und -bewertung ab. Abb. 5 zeigt die Planung der Mission in der App.

Ein Luftbild belegt im PhaseOne RAW-Format „IIQ large“ ca. 110 MB (komplette Mission 85 GB) und als 8 bit TIFF ca. 300 MB (komplette Mission 232 GB).

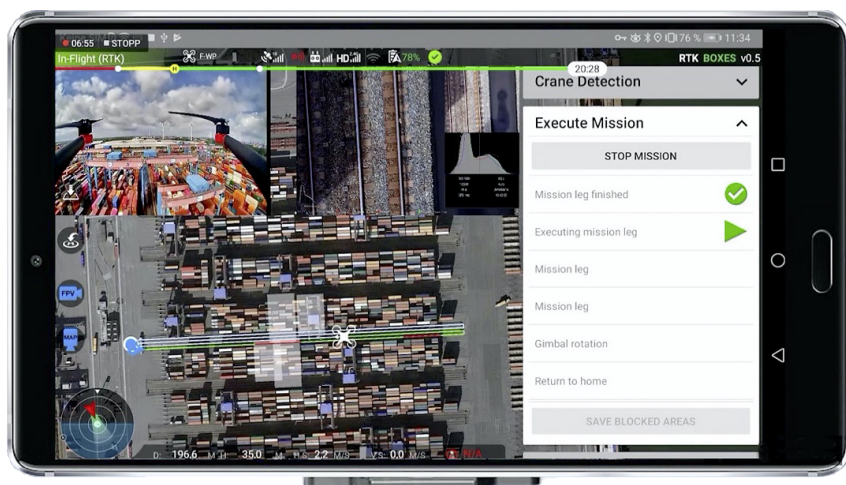


Abb. 5: Planung und Durchführung der Mission mittels der selbst entwickelten Bodenstations-App „Inspekt GS“



Abb. 6: Volle Abdeckung eines Luftbilds aus 35 m Höhe (11.664×8.750) und Bildausschnitt (507×380 Pixel, entspricht ca. 45×34 cm)

Bei der notwendigen Konvertierung in CaptureOne wurde zur Informationsgewinnung in den Schlagschatten die Schatten in allen Bildern um eine Blendstufe aufgehellt. In Abb. 6 ist ein exemplarisches Luftbild nach der Konvertierung zu sehen.

5.2 Bildorientierung

An dieser Stelle soll über Tests mit verschiedenen Konfigurationen des Bündelblocks berichtet werden. Verschiedene Fragestellungen ergeben sich, wobei ein

Interesse darin liegt, die notwendige Anzahl und die beste Verteilung von Passpunkten am Boden experimentell zu bestimmen. Weiterhin soll auf die Rolle der Laborkalibrierung bei der Bündelblockausgleichung (BBA) eingegangen werden. Alle Auswertungen wurden mit der Software Agisoft Metashape durchgeführt. Ein Grund dafür ist, dass diese Software die codierten Zielmarken lesen kann und somit einen automatischen Datenfluss garantiert. Experimente mit anderen Softwarepaketen stehen noch aus. Bei allen Experimenten werden die jeweils genutzten Passpunkte und die RTK-GNSS-Beobachtungen mit ihrer theoretisch ermittelten Lage- und Höhengenaugigkeit versehen. Sofern möglich, wurden andere Parameter zur Auswertung auf optimale Werte eingestellt, beispielsweise wurden die Verknüpfungspunkte in der besten Auflösung gesucht.

Aus Platzgründen werden nur die folgenden Szenarien verglichen:

- 5.2.1: Festhalten der Laborkalibrierung, Flughöhe 35 m, Vergleich der besten mit der schlechtesten Passpunktconfiguration
- 5.2.2: Simultankalibrierung der inneren Kameraparameter, Flughöhe 35 m, Vergleich der besten mit der schlechtesten Passpunktconfiguration

Die beiden Pass- und Kontrollpunktconfigurationen sind wie folgt zu beschreiben: In (der schlechtesten) Konfiguration K1 wird explizit eine Extrapolation über den Passpunktbereich hinaus angelegt, d. h. 10 Passpunkte (GCP: Ground Control Points) befinden sich im Zentrum des Blocks und die 7 Kontrollpunkte (CP: Check Points) an den beiden längsseitigen Außenbereichen. Die Konfiguration K2 entspricht der üblichen Empfehlung: 10 GCP sind regelmäßig im Block verteilt, dazwischen die 7 CP.

5.2.1 Festhalten der Laborkalibrierung, Flughöhe 35 m

Der Bildblock, der bei einer Flughöhe von 35 m erfasst wurde und insgesamt 780 Bilder enthält wurde einer Auswertung in der Software zugeführt. Die Parameter, die sich aus der DOE-Kalibrierung ergeben haben, wurden entsprechend in der Software eingestellt und die Option zur Simultankalibrierung ausgeschaltet.

In Abb. 7 sind die Residuen in Form von RMSE Werten, getrennt nach GCP und CP aufgeführt, im oberen Bereich für K1, im unteren für K2. Im Vergleich zeigt sich zunächst, dass die Restklassen an den Passpunkten bei K1, also der schlechteren Konfiguration, etwas kleiner sind als bei K2 (1,9 mm gegenüber 2,5 mm). Dieses Verhalten ist damit zu erklären, dass die Restfehler über einen räumlich kleineren Bereich im Rahmen der BBA minimiert werden konnten. Hingegen zeigen die RMSE-Werte an den Kontrollpunkten klar die um Faktor 2,5 (XY) bzw. 12 (Z) schlechteren Werte von K1 gegenüber K2. Die Modelldeformation resultierend aus der Extrapolation, die sich in der Höhe zeigt, ist bei K1 klar erkennbar.

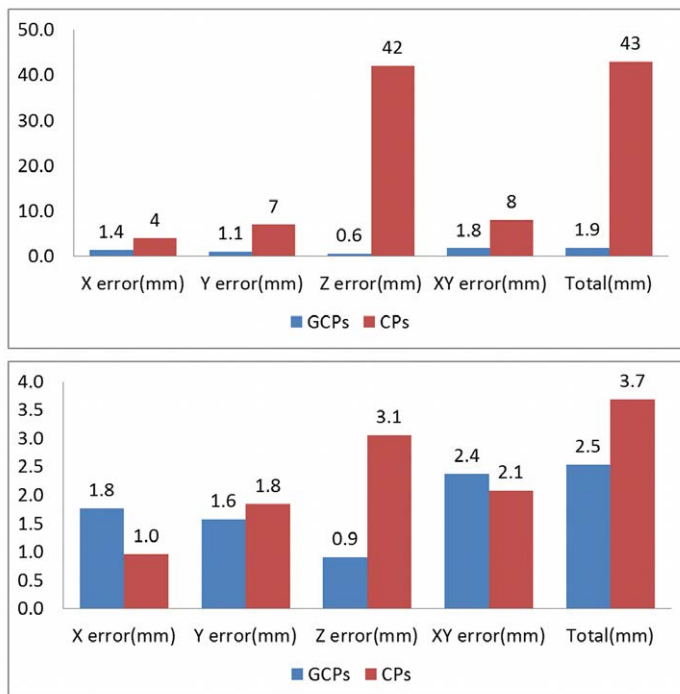


Abb. 7: RMSE-Werte an GCPs und CPs für die Konfigurationen K1 (oben) und K2 (unten) unter Nutzung der Laborkalibrierung. Man beachte die unterschiedliche Skalierung.

5.2.2 Simultankalibrierung, Flughöhe 35 m

In diesen Versuchen wurden dieselben Eingangsdaten genutzt wie in 5.2.1. erläutert. Im Gegensatz dazu wurde jedoch eine Simultankalibrierung der Kameraparameter vorgenommen. In Abb. 8 sind die entsprechenden Werte ähnlich zu Abb. 7 dargestellt. Die beiden Graphen ergeben RMSE-Werte in denselben Größenordnungen wie in 5.2.1. gezeigt, wobei bei der guten Konfiguration die Lagegenauigkeit hier etwas schlechter ist, die Höhe jedoch besser.

5.2.3 Fazit zur Bündelblockausgleichung

Der Vergleich der Ergebnisse aus der Nutzung der Laborkalibrierung und der Simultankalibrierung ergibt keine signifikanten Unterschiede, zumal bedacht werden muss, dass das Netz, auf dem der Block gelagert ist, eine Genauigkeit in derselben Größenordnung aufweist, wie die hier gezeigten Residuen. Ein abschließendes Fazit zum Einfluss und Stabilität der genutzten Kalibrierungsmethode kann also nicht gezogen werden.

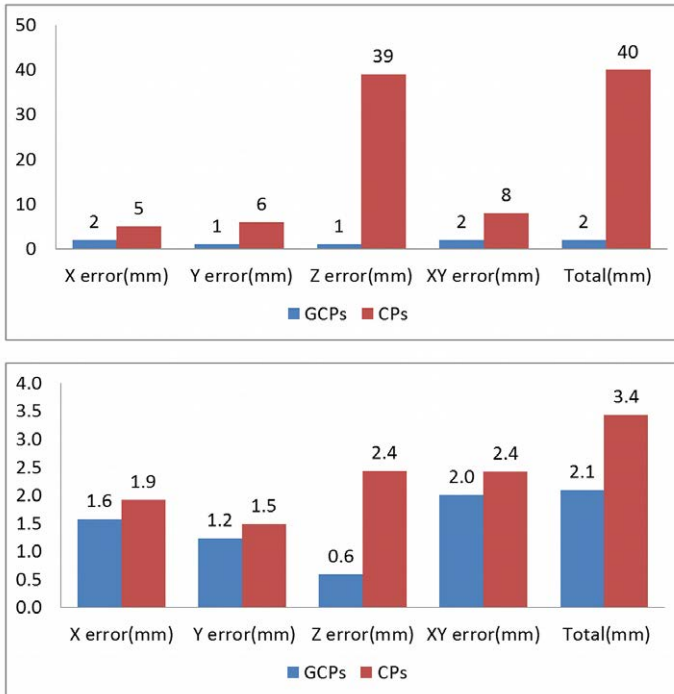


Abb. 8: RMSE-Werte an GCPs und CPs für die Konfigurationen K1 (oben) und K2 (unten) bei Simultan-kalibrierung. Man beachte die unterschiedliche Skalierung.

Dennoch lässt sich ein Trend in der Höhengenaugkeit erkennen. Da die Passpunkte mit einer theoretischen inneren Genauigkeit von $s_z \approx 1,2$ mm erfasst wurden, können die RMSE-Werte in Z bei K2 von 3,1 mm bzw. 2,4 mm als durchaus realistisch eingeschätzt werden. Ohne weitere Untersuchungen lassen sich jedoch keine zuverlässigen Erklärungen für die unterschiedlichen Werte finden.

Die RMSE-Werte für K2 von 2,1 mm (2,4 mm) in XY und 3,1 mm (3,4 mm) in Z liegen besser als die Vorgaben ($\sigma_{xy} = 2,5$ mm bzw. $\sigma_z = 25$ mm), wobei beachtet werden muss, dass mit dem gegebenen Netz diese Genauigkeit in der Lage nicht durchgreifend getestet werden kann.

Zur Überprüfung der Relativgenauigkeit bzw. der lokalen Maßstabsschätzung wurde ein hochgenau kalibrierter aus CFK produzierter Maßstab der Firma



Abb. 9: Hochgenau kalibrierter CFK-Maßstab zur Überprüfung des lokalen Bildmaßstabs

Aicon, der für das Photogrammetriesystem DPA genutzt wird, in der Szene positioniert (Abb. 9). Die Differenz der Längenmessung aus Koordinatenunterschieden im Bündelblock und der kalibrierten Länge beträgt 0,26 mm. Dieser Wert ist ein Hinweis darauf, dass Koordinatendifferenzen in kleinräumigen Bereichen mit der aus der GSD resultierenden inneren Genauigkeit ermittelt werden können.

5.3 Oberflächenmodellierung und Orthoprojektion

Die Erfassung der Schienenlage wird nicht direkt im Bildblock über Mehrbildauswertung durchgeführt, sondern über das aus der dichten Bildzuordnung abgeleitete digitale 2,5D-Höhenmodell (DEM). Weiterhin werden Daten auch mit einem generierten (True)Orthophoto (TOP) überlagert, beispielsweise zur visuellen Kontrolle und Überlagerung mit anderen georeferenzierten Daten. Aus diesen Gründen ist es wichtig zu quantifizieren, wie genau diese abgeleiteten Produkte sind. Fehlerquellen bei der Prozessierung sind Ablagen oder „Löcher“ in der Punktwolke, beispielsweise in kontrastarmen Regionen. Solche Artefakte wirken sich direkt auf die Qualität des DEMs aus. Ferner hängt die Qualität der Orthoprojektion über die bekannten Beziehungen (Reliefversatz) von der Oberflächenmodellierung ab. Zur Quantifizierung der geometrischen Genauigkeit der Produkte DEM und TOP wurden markante Punkte (die gegebenen, markierten Bodenkontrollpunkte), aber auch händisch in die BBA hineingebrachte Punkte (klar definiert Ecken), im Orthobild bzw. im DEM gemessen. Die RMSE-Werte für diese Abweichungen liegen im Bereich um 0,1 mm für die Lage und 0,4 mm für die Höhe.

5.4 Messung der Schienenlage und Diskussion der Ergebnisse

Auf Basis des Bildblocks und der BBA mit den besten Ergebnissen wurden ein DEM und TOP des gesamten Bereichs erstellt. Entsprechend der oben vorgestellten Methodik konnten Schienenpunkte extrahiert und die Differenz zur Soll-Lage berechnet werden.

Als Referenz dient eine zuvor durch das Vermessungsbüro durchgeführte Messung mit einem Schienenwagen und einem Gleismesswinkel. Die absolute Genauigkeit dieses Ergebnisses wird mit $\sigma_{xyz} = 3$ mm angegeben und liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie unsere theoretische Schätzung.

In Abb. 10 wird zunächst die Lage betrachtet. In der oberen Abbildung zeigt die blaue Linie die Abweichung von der Soll-Lage als Funktion der Position entlang der Schiene, wobei der in diesem Projekt ermittelte Abstand eingeht. Die rote Linie ist der durch den Schienenwagen/den Gleismesswinkel errechnete Abstand. Es fällt zunächst auf, dass die blaue Linie sehr viel hochfrequenter

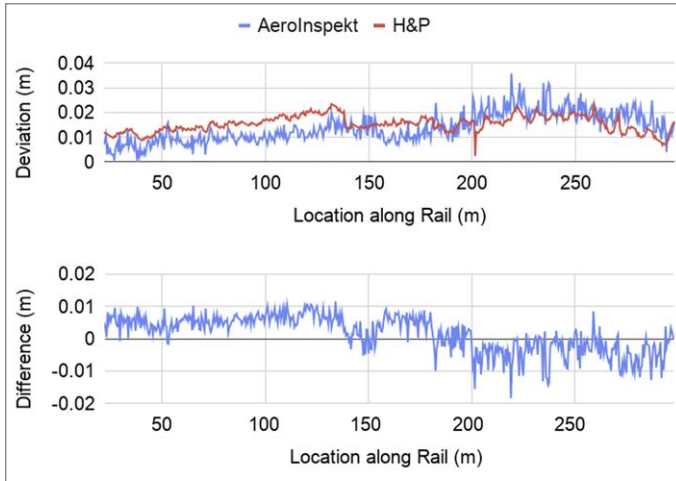


Abb. 10:
Abweichung zur Soll-Lage entlang der Referenzachse. Blau: unser Ergebnis, rot: Schienenmesswagen (oben), Differenz der beiden Messungen (unten)

Schwankungen aufweist als die rote Linie. Diese recht hohen Schwankungen im AeroInspekt-Ergebnis von einem Messpunkt zum nächsten – im vorgegebenen 2 m-Raster – lassen auf Restunsicherheiten bei der automatischen Bildanalyse schließen.

Der Abstand wächst bis zur Mitte des Gleises bis auf ca. 2 cm und wird im letzten Drittel wieder kleiner. Der generelle Trend ist ähnlich; interessant ist, dass das Ergebnis von AeroInspekt bis ca. bei Station 200 m näher an der Soll-Achse liegt, jenseits von dieser Grenze aber weiter entfernt, als die Lage, die durch das andere System ermittelt wurde.

Interessant ist auch die Differenz, die sich aus beiden Messverfahren ergibt und die in Abb. 10 (unten) gezeigt ist. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass die hohen Schwankungen von einem 2 m-Profil zum nächsten aus verbleibenden Restunsicherheiten bei der automatischen Bildanalyse kommen, sollte eine Tiefpassfilterung helfen, ein etwas realistischeres Ergebnis zu geben.

Daher wurden dieselben Werte verschiedenen gleitenden Tiefpassfiltern unterzogen (Median und Mittelwert, jeweils 3 und 5 Nachbarwerte). Die daraus resultierenden Graphen sind in Abb. 11 dargestellt. Die vom Betrage her größte Abweichung ist –11 mm bei der Mittelwert-Filterung mit Filterlänge 5, die mittlere Abweichung beträgt 1,5 mm.

Aufgrund der recht hohen Unsicherheiten bei dieser Messkampagne kann keine belastbare Aussage über die Gründe der Abweichung getroffen werden. Folgende Aspekte müssen weiter untersucht werden:

- Gibt es eine systematische Abweichung? Aus Abb. 11 könnte man eine stückweise systematische Verschiebung vermuten. Ein Aspekt, der hier nicht abschließend bewertet werden kann, betrifft die Datumsdefinition. Die

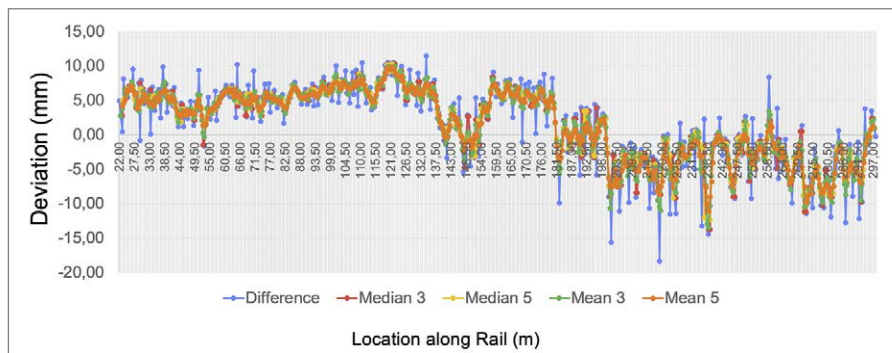


Abb. 11: Differenz der beiden Messungen mit verschiedenen gleitenden Tiefpassfiltern.

Vermessung des Schienenmesswagens wurde nicht an denselben Festpunkten angeschlossen wie das Netz der Kontrollpunkte. Das heißt, Inkonsistenzen in der Lagerung können nicht ausgeschlossen werden und zu systematischen Ablagen führen.

- Wenn die Lagemessungen mit beiden Verfahren bei ca. $\sigma_{xy} \approx 3 \text{ mm}$ liegen, so gilt nach Varianzfortpflanzung für die Differenz $\sigma_{Dxy} \approx \sqrt{2} * 3 \text{ mm} \approx 4,5 \text{ mm}$. Das bedeutet, dass für alle Abweichungen, wie in Abb. 11 gezeigt, ein 95%-Konfidenzband von $\pm 9 \text{ mm}$ gilt. Die meisten Werte liegen in diesem Band, sind also theoretisch nicht signifikant von Null verschieden.

In Abb. 12 (oben) ist das Höhenprofil, wieder getrennt nach AeroInspekt und klassischer Vermessung, aufgetragen. Die „Rampen“ am Anfang und am Ende der Schienenbahn, bei der ein Höhenunterschied von 5 bis 7 cm überwunden

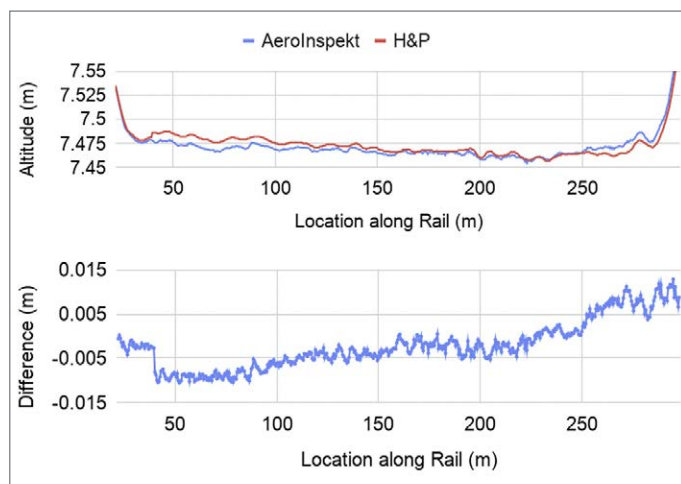


Abb. 12:

Abweichung zur Soll-Höhe entlang der Referenzachse. Blau: unser Ergebnis, rot: Schienenmesswagen (oben), Differenz der beiden Messungen (unten)

wird, ist gut in beiden Profilen zu sehen. Eine technische Erklärung für diese Rampen ist, dass die Schienen am Ende nicht belastet werden, da die Kräne nicht in diesen Bereich fahren. Insgesamt ist das Gefälle zur Seeseite (aufsteigende Stationen) sichtbar. Die Differenz zwischen den beiden Profilen ist in der unteren Darstellung in Abb. 12 aufgetragen. Diese Kurve ist sehr viel glatter als die der Lage. An den Enden der ursprünglichen Distanzgraphen in der oberen Darstellung kann man sehr gut sehen, dass diese Kurven seitlich verschoben sind. Diese Verschiebung führt zu den recht großen Abweichungen von 8 bis 10 mm und belegt die These, dass eine Restverschiebung aus der Datumsdefinition herrühren könnte. Da die Verschiebung zur Seeseite hin größer wird, könnte ein Maßstabsfehler vorliegen. Diese Vermutung wird in zukünftigen Arbeiten untersucht.

6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag berichtet von ersten Ergebnissen aus dem BMVI-Projekt Aero-Inspekt. Das Ziel in diesem Projekt ist es, mit Hilfe von sehr hoch auflösenden Drohnendaten eine Schienenvermessung am Container Terminal in Altenwerder durchzuführen. Die spezielle Anforderung in diesem Projekt liegt in der zu erfüllenden hohen absoluten Lagegenauigkeit: auf eine Länge von ca. 300 m wird eine Lagetoleranz von 10 mm zugestanden, die Höhentoleranz ist mit 100 mm moderater. Die Herausforderung bei der Wahl einer UAV-/Kamerasystemkonfiguration liegt darin, dass eine Flughöhe von 35 m über Grund nicht unterschritten werden darf und dass die Aufnahmen auch während des Kranbetriebes durchgeführt werden sollen. Die nominelle GSD, die mit dem gewählten System erreicht werden kann, liegt bei 0,9 mm. Erste, teils vorläufige Ergebnisse, zeigen, dass ein vollautomatischer Datenfluss von der Bildaufnahme zur Ermittlung der Schienenlage möglich ist. Eine durchgreifende Genauigkeitsanalyse erweist sich für den Datensatz jedoch als schwierig, da Referenzdaten mit einer ähnlichen Genauigkeit erfasst wurden. In zukünftigen Arbeiten wird die Methodik zur Extraktion der Schienenkante verbessert, beispielsweise durch die Einbeziehung der Orthobilder. Hinsichtlich der Messung der Bodenpasspunkte sollten die (Wetter)-Bedingungen besser sein als bei der hier genutzten Kampagne, ferner ist sicherzustellen, dass die Messung der Vergleichsdaten (Schienenmesswagen) auf demselben Datum lagern. Ein weiteres Ziel ist es, die Anzahl der benötigten Passpunkte zu reduzieren. Es ist aber festzuhalten, dass die durch die hier vorgestellte Anordnung und Systemausstattung theoretisch erreichbare innere Genauigkeit im Bildverband nur unter sehr hohen Messaufwand in den Objekt-raum übertragen und überprüft werden kann.

Danksagung

Das Projekt AeroInspekt wird durch das BMVI über das Programm IHATEC gefördert, Förderkennzeichen: 19H18006B. Wir bedanken uns bei den Kollegen vom DLR, Dennis Dahlke, Henry Meissner und Thomas Kraft für die Hilfe bei der DOE-Kalibrierung und der Bestimmung der physikalischen Sensorauflösung.

Literatur

- Bauer, M., Griefsbach, D., Hermerschmidt, A., Krüger, S., Scheele, M., Schischmanow, A. (2008): Geometrical camera calibration with diffractive optical elements. *Optics Express*, 16(25), 20241–20248.
- Dahlke, D., Geßner, M., Meißner, H., Stebner, K., Griefsbach, D., Berger R; Börner, A. (2019): Calibrating photogrammetric airborne camera systems with diffractive optical elements. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, 1637–1642. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1637-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1637-2019).
- Förstner, W. (1988): On the Theoretical Accuracy of Multi Image Matching, Restoration and Triangulation. Technischer Bericht, Universität Bonn.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, (1), 17–30.
- Kuhlmann, H., Hesse, C., Holst, C. (2017): Standardabweichung vs. Toleranz. DVW-Merkblatt 12-2017. <https://d-nb.info/1163759562/34>, letzter Zugriff 01/2020.

Kontakt

Markus Gerke | Yahya Ghassoun | Ahmed Alamouri
Technische Universität Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Bienroder Weg 81, 38106 Braunschweig
m.gerke@tu-bs.de | y.ghassoun@tu-bs.de | a.alamouri@tu-bs.de

Markus Bobbe | Yogesh Khedar
Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugführung
Hermann-Blenk-Straße 27, 38108 Braunschweig
m.bobbe@tu-bs.de | y.khedar@tu-bs.de

Frank Plöger
Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft
Technik, Bautechnik
Bei St. Annen 1, 20457 Hamburg
ploeger@hhla.de

UAV im kommunalen Einsatz

Thomas Maier

1 Einleitung

Die Kur- und Bäderstadt Baden-Baden, auch bekannt als Medien-, Kunst und Festspielstadt, im Südwesten Deutschlands zwischen Oberrheingraben und Hochschwarzwald gelegen, ist mit rund 55.000 Einwohnern der kleinste Stadtkreis in Baden-Württemberg. Aufgeteilt in zehn Gemarkungen mit einer Gesamtfläche von 140 km² erstreckt sich das Stadtgebiet von der Oberrheinischen Tiefebene über die Vorbergzone bis in die Höhenlagen des Schwarzwalds. Etwa 60 % der Stadtkreisfläche ist mit Wald bedeckt, davon ist auch ein Anteil dem Nationalpark Schwarzwald zugehörig.

Allen Stadt- und Landkreisen in Baden-Württemberg sind die Führung des Liegenschaftskatasters und sonstige hoheitlichen Vermessungen als gesetzliche Pflichtaufgaben übertragen. Das Fachgebiet Vermessung und Geoinformation der Stadt Baden-Baden setzt sich aus den Sachgebieten Kataster/Liegenschaftsvermessung, Ingenieurvermessung und Geoinformation, sowie der Geschäftsstelle des Gutachterausschusses zusammen.

1.1 Aufgabenbereiche des Sachgebiets Ingenieurvermessung

Als interner Dienstleister für die städtischen Fachgebiete, Eigenbetriebe und Gesellschaften

- Stadtplanung
- Gebäudemanagement
- Umwelttechnik
- Tiefbau
- Stadtwerke
- Forst/Park und Garten/Friedhof
- Gewerbeentwicklung
- Entwicklungsgesellschaft Cité
- Gesellschaft für Stadterneuerung und Entwicklung

decken die Aufgabenbereiche eine große Bandbreite der Ingenieurvermessung ab.

Die Aufgabenbereiche sind im Wesentlichen:

- Messung und Bereitstellung des Lage- und Festpunktfeldes
- Bestandsaufnahmen für Planungs- und Dokumentationszwecke
- (Präzisions-)Nivellement
- Setzungs- und Deformationsmessungen (Monitoring)
- Aufnahme Infrastruktur – Wasser, Abwasser, Gas, Strom, Fernwärme, Telekom
- Absteckungen aller Art
- Baubegleitende Vermessungen
- Lagepläne nach LBOVVO
- Massenermittlungen, Aufmaß zu Abrechnungszwecken
- Kontrollvermessungen (Bauüberwachung)
- Gebäudeinnen- und Außenaufnahme
- 3D-Stadtmodell, 3D-Modellierung und Visualisierung

Zur Erledigung dieser vielfältigen Aufgaben steht im Außendienst eine aktuelle Sensorik zur Verfügung, bestehend aus Scanstation, Robotic-Tachymetern, GNSS-Empfängern, Laserscanner, Digitalnivellier, Feldrechnern, Vollformatkamera, UAV (Fixed Wing und Multicopter).

1.1.1 Überlegungen zur Beschaffung und zum Einsatz von UAS

Die seit Jahren stetig wachsenden Aufgabenbereiche und Anforderungen an die Bereitstellung bzw. Erhebung von Geodaten ohne Aufstockung des Personalbestandes, führten zu der Überlegung, UAS als ergänzendes Verfahren der Datenerfassung einzuführen. Zum einen waren es Erwägungen die Datenerfassung effizienter zu gestalten, zum anderen auch solche Daten zu erfassen, die auf terrestrischem Wege nicht oder nur mit hohem Aufwand zu erfassen sind. Anhand des breiten Spektrums an Einsatzmöglichkeiten, welche die UAV-Technik bietet, konnte so im Dialog mit den städtischen Fachgebieten ein Bedarf ermittelt werden, der einen künftigen Einsatz von UAS in verschiedensten Bereichen der Stadtverwaltung vorsah.

1.1.2 Welches Flugsystem für welchen Zweck?

Der Markt im UAV-Bereich wächst enorm schnell und ist ständigen Innovationen unterworfen. Welches System (Multicopter oder Starrflügler) zum Zeitpunkt der Anschaffung passt am ehesten zu den geplanten Einsatzbereichen und liefert zudem noch am Ende des Auswertungsprozesses die gewünschten Daten?

Die angedachten Einsatzbereiche selbst unterscheiden sich hinsichtlich ihrer (Objekt-)Ausdehnung, ihrer Form oder Oberflächenbeschaffenheit. Ebenso die Produkte, die aus einer Befliegung abgeleitet werden können.

Ein weiterer Aspekt bei der Wahl des Flugsystems ist die Notwendigkeit von entsprechend großen Flächen zum Starten und Landen des Fluggerätes.

Am Ende der Abwägung stand die Anschaffung eines Multicopters mit der Begründung fest, dass für den Einstieg in die UAV-Welt zunächst eine größere Bandbreite der Anwendungsfelder abgedeckt werden könne.

Im Laufe des ersten Jahres hat sich jedoch schnell gezeigt, dass ein Multicopter alleine die Vielzahl der aufkommenden Einsatzbereiche und das steigende Interesse an den Daten nicht gleichermaßen effektiv bearbeiten kann. Die Beschaffung eines Starrflüglers (= Fixed Wing) hat das Einsatzspektrum vor allem für größere Flächen (Wald, Deponien) und im städtischen Bereich erheblich erweitert und somit effektivere Abläufe ermöglicht.

1.1.3 Berge und Täler – geländeangepasste Flugplanung

Wie eingangs bereits erwähnt, erstreckt sich Baden-Baden von der Rheinebene bis in bergige Höhenlagen um 1000 m. Die Topographie stellt den Vermesser bzw. den UAV-Steuerer immer wieder vor neue Herausforderungen. Es gibt nur wenige Bereiche in der Rheinebene, in denen das zu befliegende Gelände keine relevanten Höhenunterschiede aufweist. Die große Zahl der Aufgaben spielt sich in sehr bewegtem Gelände mit teilweise großen Höhenunterschieden bzw. in recht engen Tälern ab.

Sehr schnell hat sich gezeigt, dass zur Steigerung einer sicheren Durchführung von autonomen Flugmissionen, aber auch im Hinblick auf die Qualität der Ergebnisse, relativ zum Gelände befliegen werden muss. Beim geländeangepassten Flug folgt das UAV in einer festgelegten Höhe dem darunterliegenden Gelände, welches als Bezugshorizont in der Flugplanungssoftware hinterlegt wird. Als eine Option steht herstellerseitig die Verwendung eines SRTM-Modells (Shuttle Radar Topography Mission der NASA) zur Verfügung, als zweite Option kann ein eigenes DGM als Grundlage verwendet werden. Das SRTM-Modell zeigt in Bereichen von großen Waldflächen Schwächen in der Höhengengenauigkeit. Die Oberfläche liegt in der Regel zu hoch. Das UAV fliegt zwar relativ zur Modelloberfläche in der geplanten Höhe, faktisch aber zu hoch über dem tatsächlichen Gelände.

Zudem ergibt sich aufgrund der großen Rasterweite der Nachteil, dass bewegtes Gelände, wie Hügel, Bruchkanten, kleine Täler im Modell nicht mehr abgebildet werden (z. B. der Talgrund ist nicht eben, ein Sportplatz liegt am Hang). In der Folge entstehen inhomogene Überlappungen und Bodenauflösungen in den Aufnahmen.

Die elegantere Option ist die Verwendung des vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL 2019) bereitgestellten DGM. Diese Daten entstammen einer Laserscanbefliegung und beschreiben die Erdoberfläche ohne

Vegetation und Gebäude in einem regelmäßigen Gitter (ab 1 m Rasterweite erhältlich).

Als dritte Option steht die Verwendung eines benutzerdefinierten DGMS zur Auswahl. Dies kann aus selbst erfassten Geländedaten, sei es terrestrisch oder auch aus zuvor durchgeführten Befliegungen erfasst, berechnet werden.

Im Hinblick auf die Qualität der Ergebnisse macht es für den jeweiligen Anwendungsfall durchaus Sinn, eine möglichst aktuelle Oberfläche als Bezugshorizont für die UAV-Befliegung heranzuziehen.

1.1.4 Direkte Georeferenzierung – Einsatz von RTK/PPK

Das Einmessen von Bodenpasspunkten beansprucht den zeitlich größeren Anteil beim Außendienst eines UAV-Projektes. Abhängig von der Größe des Projektgebietes, der vorhandenen Topographie und der Zugänglichkeit des Geländes kann das Zeitverhältnis von Passpunktbestimmung zu Flugzeit extrem auseinanderdriften. Zwar konnte in bebauten Bereichen oftmals auf die aus der Kanalaufnahme flächendeckend vorliegenden, tachymetrisch eingemessenen Kanaldeckel als Bodenpasspunkte zurückgegriffen werden, dennoch war der zeitliche Aspekt bei Projekten außerhalb des bebauten Bereichs stets ein Thema zur Verbesserung.

Im Rahmen einer Teststellung der Firma senseFly (senseFly 2019a) konnte das Upgrade zur RTK/PPK-Funktionalität des Starrflügler-UAV „eBee Plus“ getestet werden. Die korrigierten Bildpositionen können sowohl während der Flugmission über eine Mobilfunkverbindung zu einem Korrekturdatendienst direkt in die EXIF-Daten geschrieben werden, oder auch später durch Auswertung im Postprocessing. Bei der Bearbeitung zweier Projekte wurde schnell deutlich, welche Vorteile sich im Außendienst aber auch bei der Auswertung im Büro ergeben.

Die beim Einsatz von RTK/PPK bestimmten Bildpositionen können als Beobachtungen der äußeren Orientierung in die photogrammetrische Auswertung mit einfließen. Dies führt zu einer erheblichen Stabilisierung des Bildverbandes, sowie einer Steigerung der initialen Genauigkeit der Punktwolke. In der Folge kann die Zahl der Bodenpasspunkte deutlich reduziert werden, ohne dass es zu einer signifikanten Modellaufbiegung der Punktwolke kommt (Przybilla et al. 2015, Gerke und Przybilla 2016).

Mit den durchgreifend positiven Erfahrungen beim Einsatz von RTK/PPK beim Starrflügler „eBee Plus“ in zahlreichen Projekten, wurde ein Jahr später ein RTK-fähiger Multicopter (DJI Phantom 4 RTK, DJI 2019) hinzugekauft.

2 Einsatzbereiche von UAV bei der Stadt Baden-Baden

Aus den ersten Überlegungen vor der Anschaffung eines UAV bis zum tatsächlichen Einsatz hat sich eine Vielzahl von Anwendungsgebieten ergeben, zudem lassen sich weitere Bereiche erschließen:

- Bestands-/Geländeaufnahmen
 - Schaffung von Planungsgrundlagen (Stadtplanung, ...)
- Orthophotos, Schrägluftbilder, Fassadenaufnahmen
 - Darstellung aktuelle Situation, Präsentationen, Texturen, Videos
- Massenermittlungen
 - Deponien, Kiesgruben
 - Baustellen (Baugruben, Schüttungen, Halden, ...)
 - Steinbrüche
- Inspektionen und Dokumentation
 - Bauwerksinspektion
 - Schadensdokumentation
 - Bauüberwachung
- 3D-Modellierung
 - Schaffung von Planungsgrundlagen
 - 3D-Stadtmodell
- Forst und Naturschutz
 - Vegetationskontrolle
 - Erfassung von Schadflächen (Borkenkäfer-/Trockenschäden)
 - Kartierung von Baumbeständen, Nutzflächen, ...
- Friedhofskataster



Abb. 1: Punktwolke Planungsbereich

Die aufgeführten Einsatzbereiche lassen sich faktisch nicht immer streng abgrenzen. Der praktische Anwendungsfall hat gezeigt, dass die einzelnen Bereiche bei der Gesamtbearbeitung von Projekten häufig miteinander verschmelzen. Die generierten Produkte (Punktwolke, Orthophoto, Schrägluftbilder, ...) können für verschiedenste Zwecke genutzt oder weiterverarbeitet werden.



Abb. 2: Orthophoto, Höhenlinien, ALKIS-Daten, Bäume



Abb. 3: First- und Traufhöhen

2.1 Projektbeispiele

2.1.1 Entwicklung BPlan – Ausschreibung Ideenwettbewerb

Ein großer Aufgabenbereich des FG Vermessung und Geoinformation ist die Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Geodaten für stadtplanerische Zwecke. Entscheidungen des Gemeinderates bzw. von Planungsgremien erfordern in der Regel eine zeitnahe Datenerfassung um die städtebauliche Planung, z. B. durch Ausschreibung von Ideenwettbewerben auf den Weg zu bringen.

2.1.2 Standortanalyse Pflegeheim

Die Wahl eines geeigneten Standortes für ein geplantes Bauprojekt ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. Der Findungsprozess kann langwierig sein. Oft stehen Entscheidungsträger vor dem Problem, dass Planungsgrundlagen weder aktuell noch vollständig vorliegen. Hinzu kommt, dass Pläne mit Grundrissen und Schnitten in 2D-Darstellung oftmals wenig Aussagekraft haben und die tatsächlichen Dimensionen und ihre Auswirkung auf das Projektumfeld nicht wiedergeben. Die mit der UAV-Technik gewonnen umfangreichen Daten (Abb. 4) ermöglichen eine zielgerechte Planung aber auch eine sensiblere Entscheidungsfindung. Mit einer aus den UAV-Daten abgeleiteten 3D-Visualisierung (Abb. 5) können Zusammenhänge aus Planung und Umfeld besser dargestellt, sowie Schwachstellen aufgedeckt und analysiert werden. Letztendlich wird auch der Zeitaufwand zur Entscheidungsfindung erheblich verkürzt bzw.



Abb. 4: Punktwolke Untersuchungsbereich



Abb. 5: 3D-Modell mit Bestandsgebäuden, Planung, relevanten Bäumen aus dem Baumkataster, Licht- und Schattenwurf

der Kostenaufwand aufgrund geringerer Planungsvarianten reduziert. Mit 3D-Werkzeugen wird eine Planung plastisch verständlich und sensibilisiert den gesamten Planungsprozess. Damit wird ein Vorhaben für jeden vorstellbar und bringt in der Folge die gewünschte Akzeptanz bei allen Beteiligten. Nahezu jedes anstehende Planungsvorhaben bei der Stadt Baden-Baden wird inzwischen durch den Einsatz von UAV-Technik begleitet bzw. je nach Bedarf und Anwendungsfall mit verschiedenen Produkten versorgt.

2.1.3 Massenermittlung Erdaushubdeponien

Die Stadt Baden-Baden betreibt zwei Erdaushubdeponien, die regelmäßig übers Jahr einer Massenbilanz unterzogen werden müssen. Was vor wenigen Jahren noch im Laufe einer Woche terrestrisch mit Tachymeter von einem Messtrupp erfasst wurde, konnte in der Zwischenzeit mit einer Person und dem Einsatz eines Laserscanners in zwei Tagen erledigt werden. Mit dem Einsatz von UAV und der Erfassung aus der Luft, ist es nun möglich diese Aufgabe noch effizienter zu bearbeiten und Daten mit hohem Detaillierungsgrad zu generieren. Neben der 3D-Punktwolke als Basis für DGM- und Massenberechnung (Abb. 6 und Abb. 7), ist ein aktuelles Orthophoto des Deponiegeländes ein weiteres wichtiges Produkt hinsichtlich Dokumentation und ergänzenden Auswertungen.

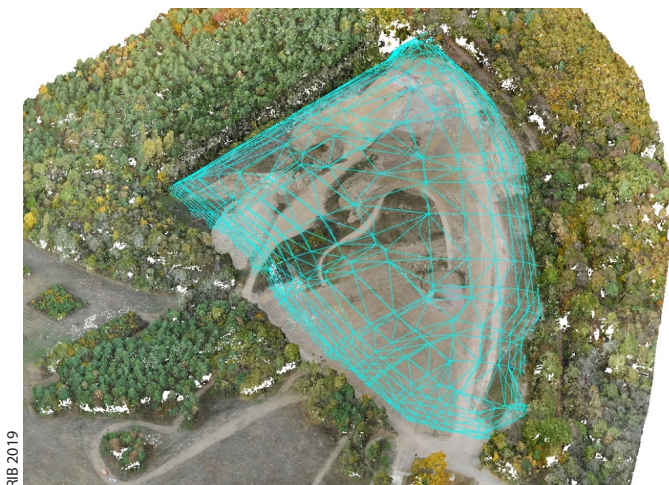
Die Befliegung der Deponien wird mit geländeangepasster Flugplanung durchgeführt. Dazu wird jeweils das Gelände von der vorherigen Epoche als benutzerdefiniertes DGM herangezogen.

Als Ergebnisse werden abgegeben:

- DGM-Berechnung
- Erstellung Massenbilanz
- Orthophoto
- Lageplan mit Höhenlinien und Böschungen
- Profile
- 3D-Darstellung



↑ Abb. 6:
Punktwolke mit
Bodenpass-
punkten



← Abb. 7:
Punktwolke
mit DGM der
geplanten
Auffüllung

2.1.4 3D-Stadtmodell – Baugebiet Cité-Bretagne

Im Jahr 2009 wurde anhand eines größeren Projektes erstmals eine 3D-Visualisierung erstellt (Abb. 8). Ein 17 ha großes Baugebiet wurde vom ersten Spatenstich bis zum Endausbau der Infrastruktur vermessungstechnisch erfasst. Unterirdische Gewerke wie Gas, Wasser, Strom und Kanal wurden ebenfalls erfasst wie auch oberirdische (Fahrbahnen, Gehwege, Bordsteine, Lärmschutzwand, Straßenlaternen, Stromkästen, Bäume, ...). In die bestehende dreidimensional vorliegende Infrastruktur wurden schließlich die Grundstücke aus dem



Abb. 8: 3D-Visualisierung

Liegenschaftskataster mit Modellhäusern aus der Bebauungsplan-Grundlage als Platzhalter eingefügt. Die städtische Entwicklungsgesellschaft konnte fortan mit einem 3D-Modell in das Marketing der Bauplätze einsteigen und potenziellen Interessenten ihr Wunschgrundstück mit Licht- und Schattenwurf animiert präsentieren. Das Konzept schlug mit derart großem Erfolg ein, dass innerhalb kurzer Zeit die Grundstücke an Bauwillige veräußert werden konnten ohne umfangreiche Marketingmaßnahmen einzusetzen.

Das war der Startschuss für weitere 3D-Projekte in den folgenden Jahren. Mit der Bereitstellung eines LOD2-Gebäudemodells des LGL vor einigen Jahren war schließlich eine flächendeckende 3D-Gebäudelandschaft verfügbar. In vielen Bereichen war jedoch eine Ergänzung des Gebäudebestandes mit noch nicht eingemessenen Gebäuden bzw. eine Nacharbeitung der Dachlandschaften notwendig. Die ständig wachsende Nachfrage nach 3D-Daten für unterschiedlichste Zwecke sowie die zeitaufwändige Nachbearbeitung und Laufendhaltung, haben die Stadtverwaltung dazu veranlasst, ein umfangreiches 3D-Stadtmodell

unter Personalbereitstellung und der Anschaffung spezieller Software auf den Weg zu bringen.

Seit Anfang 2019 fließen nun Geodaten aus einer Vielzahl an eigenen Quellen (Laserscanprojekte, Terrestrische Aufnahmen, UAV-Befliegungen) in die Entwicklung des 3D-Stadtmodells mit ein. Auch im Hinblick auf die Bewerbung zum UNESCO-Welterbe bekommt die Entwicklung des 3D-Stadtmodells eine wichtige Bedeutung.

Die einzelnen Teilabschnitte des Baugebiets Cité-Bretagne sind inzwischen nahezu vollständig bebaut, angrenzende Bereiche befinden sich in der Erschlie-



Abb. 9: Punktwolke aus aktueller Befliegung (11/2019)



Abb. 10: 3D-Modell mit aktualisiertem Gebäudebestand (VIS-ALL 3D 2019)

ßung. Zur Aktualisierung und Fortführung des Gebäudebestandes im 3D-Stadtmodell, sowie für weitere planerische Aufgaben, wurde im November eine UAV-Befliegung durchgeführt (Abb. 9 und Abb. 10).

2.1.5 Dokumentation Baustelle Kindertagesstätte

Was hier im kleinen Beispiel genannt wird, lässt sich auch skalieren. Die UAV-Technik kann vielerlei Unterstützung während eines Bauprozesses geben. Sei es



Abb. 11: Dokumentation Baufortschritt

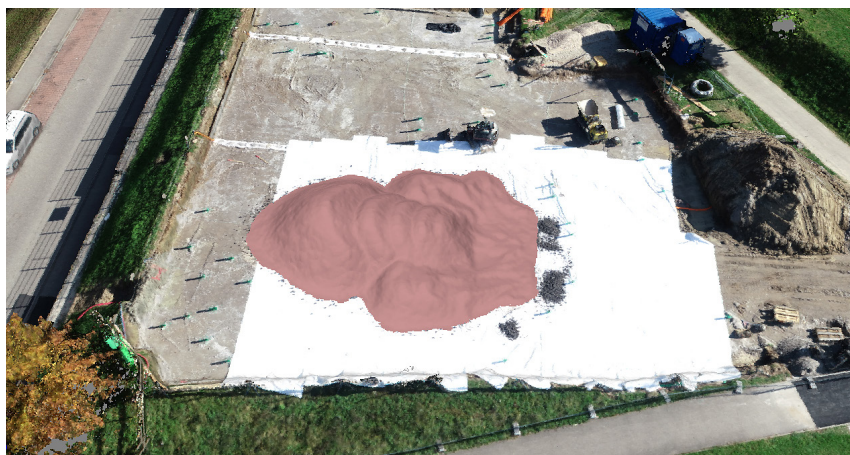


Abb. 12: Massenermittlung aus Punktwolke/DGM (Agisoft Metashape 2019)

Agisoft Metashape 2019

durch Dokumentation des Baufortschritts in regelmäßigen Zeitabständen, oder zur Beweissicherung bzw. Inventarisierung zu bestimmten Anlässen (Abb. 11). Jede Baustelle hat ihr zugehöriges Festpunktfeld. Nach Durchführung von Bildflügen kann wiederum eine Punktwolke als Basis zur Massenermittlung einer Baugrube oder von Haufwerken erzeugt werden (Abb. 12). Ebenso ist ein aktuelles Orthophoto quasi als Nebenprodukt aus der photogrammetrischen Auswertung schnell verfügbar. Das Beispiel steht dafür, dass unterschiedliche UAV-Anwendungen im Laufe eines Projektes durchaus verschmelzen.

2.1.6 Inspektion Gebäude, Liegenschaften und Bauwerke

Die Stadtverwaltung hat in Vertretung durch ihre jeweiligen Fachgebiete eine Vielzahl an Liegenschaften und Gebäuden, wie z. B. Verwaltungsgebäude, Schulzentren, Kindergärten, Sporthallen, Gebäude der städtischen Gesellschaften, etc. zu unterhalten. In regelmäßigen Abständen oder auch zur Sichtung nach möglichen Schadensfällen (heruntergefallene Ziegel nach Unwetter, Abplatzungen Mauerwerk, etc.) muss die Verwaltung aktiv werden und eine Überprüfung vornehmen (Abb. 13 und Abb. 14). Das Einrücken von Gebäuden ist ein erheblicher



↗ Abb. 13:
Inspektion Schloss
Solms (links) und Detail
des Turms (rechts)



← Abb. 14:
Inspektion eines Daches
einer städtischen Lie-
genschaft

Kosten- und Zeitfaktor. Ebenso ist der Einsatz eines Hubsteigers nur begrenzt möglich und für größere Gebäude ebenfalls zeitaufwändig und teuer. Die stabilen Flugeigenschaften eines aktuellen Multicopters in Verbindung mit einer hochauflösenden Kamera bieten hier eine effektive und kostengünstige Lösung. Der Auftraggeber kann vor Ort live während der Foto- und Videodokumentation direkt Einsicht gewinnen oder die Ergebnisse der Inspektion nachträglich im Büro als Entscheidungshilfe heranziehen, um über die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen zu entscheiden.

2.1.7 Vegetationskontrolle für den Forst

Der Baden-Badener Stadtwald ist einer der größten in Deutschland. Mit rund 60 % der Stadtfläche ist ein überdurchschnittlich großer Teil mit Wald bedeckt. Als untere Forstbehörde betreut und bewirtschaftet das Fachgebiet Forst und Natur den Stadtwald.

Die extrem trockenen Sommer der vergangenen Jahre haben dem Wald stark zugesetzt. Trockenschäden und Schädlingsbefall, im Speziellen Borkenkäferschäden, haben massiv zugenommen. Was vom Borkenkäfer befallen ist, muss schleunigst aus dem Wald entfernt werden. Das bisherige Vorgehen der Förster war das Absuchen der Baumkronen mittels Auge und Fernglas aus exponierter Lage oder vom Gegenhang eines Tales. Die große Schwierigkeit war schließlich das mühsame Auffinden der zuvor aus der Ferne erspähten Bereiche.



Agisoft Metashape 2019

Abb. 15:
Orthophoto Forstdistrikt Testgebiet 1

Nicht selten war es unmöglich den sprichwörtlichen „Wald vor lauter Bäumen zu sehen“. Doch wie kann der Forst dahingehend unterstützt werden, schadhafte Bäume bzw. Baumgruppen zu lokalisieren? In Einzelprojekten wurden in jüngerer Vergangenheit aus UAV-Befliegungen Orthophotos zur Vegetationskontrolle (Monitoring) bzw. zur Bestandserfassung bereitgestellt. Mit der Dringlichkeit der Borkenkäferproblematik wurde in Zusammenarbeit mit der Vermessung, der GIS-Abteilung und dem städtischen Forst ein UAV-Testprojekt zur „Detektion von Vegetationsschäden“ auf den Weg gebracht. Ziel war es, aus UAV-Befliegungen unter Einsatz einer Multispektralkamera und Berechnung von Indexkarten auf Basis des NDVI (= normierter differenzierter Vegetationsindex, Wikipedia 2019), schadhafte Einzelbäume sowie Schadflächen zu ermitteln.

Als Testgebiet wurden zwei jeweils 27 ha große Forstdistrikte herangezogen, in denen Trockenschäden und Schädlingsbefall zur erwarten war (Abb. 15). Für die Befliegung der beiden Flächen wurde der Starrflügler „eBee Plus“ (senseFly 2019b) eingesetzt. Die „eBee Plus“ ist mit einem Kameraschacht ausgestattet, der mit verschiedenen Kamerasystemen (Payload) bestückt werden kann (Abb. 16 links). Für das Testprojekt wurde von der Firma senseFly freundlicherweise eine Parrot Sequoia Multispektralkamera (Abb. 17) zur Verfügung gestellt. Beide Forstdistrikte wurden jeweils mit der Sequoia Multispektralkamera und der S.O.D.A. RGB-Kamera (Abb. 16 rechts) befliegen.



Abb. 16: Kameraschacht der eBee Plus (links) und S.O.D.A. RGB-Kamera der senseFly (rechts)



Abb. 17: Parrot Sequoia Multispektralkamera (links), Sunshine-Sensor (rechts)



Abb. 18: Indexkarte mit hinterlegtem Orthophoto (Pix4D Mapper)

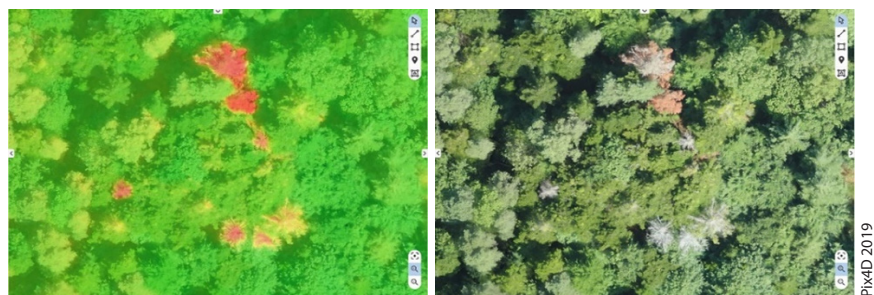


Abb. 19: Detail der Indexkarte und Orthophoto mit Baumschäden (Pix4D Mapper)

Nach photogrammetrischer Auswertung von RGB- und Multispektralaufnahmen (Abb. 18 und Abb. 19) wurde eine GIS-Methode angewendet um die relevanten bzw. kritischen Bereiche als thematische Karten aufzuzeigen. Im folgenden Schritt wurde den Forstmitarbeitern eine georeferenzierte Indexkarte mit Orthophoto, Forstwegenetz sowie Holzrückegassen auf ihren Tablet-Rechnern in Form einer App-Anwendung der Firma ESRI (ESRI 2019) bereitgestellt (Abb. 20).

Mit den GNSS-fähigen Tablets waren die Förster nun in der Lage, über das Wegenetz zu navigieren und sogenannte Hotspots (= schadhafte Vegetation) in

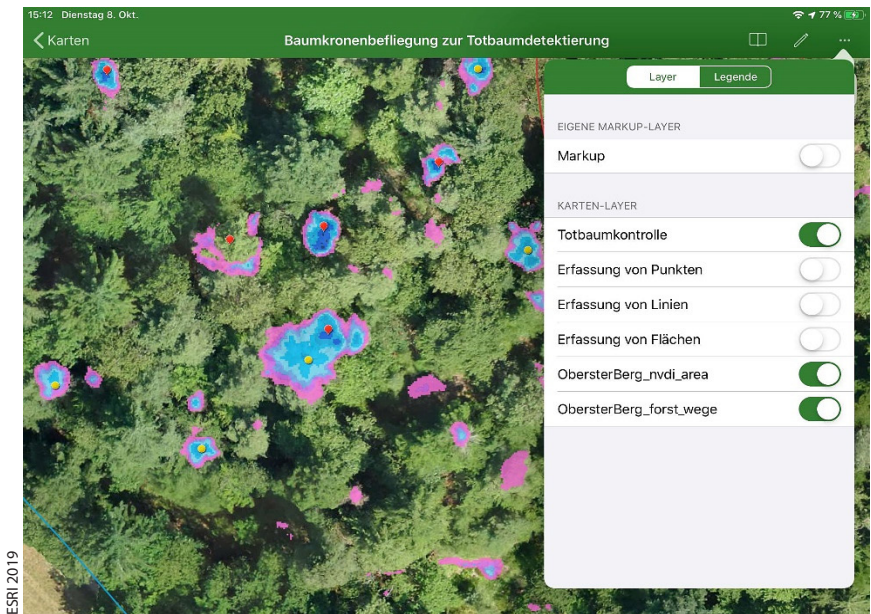


Abb. 20: App-Anwendung für den Forstaufendienst



Abb. 21: Navigation im Wald anhand eines Orthophotos, einer Indexkarte und eines Wegenetzes

der Örtlichkeit aufzufinden und zu beurteilen (Abb. 21). Mit der App-Anwendung können Attribute, Sachdaten sowie grafische Elemente ergänzt und bei Bedarf dem ausführenden Forstunternehmen zur Bearbeitung elektronisch übermittelt werden. Das UAV-Pilotprojekt hat in beiden Testgebieten überzeugende Ergebnisse geliefert. Die flexible, effiziente und kostengünstige Datenerhebung mittels UAV hat Potenzial bewiesen. Im Dialog mit dem Forst wird die App nun sukzessive den Bedürfnissen angepasst, sodass ein flächendeckender Einsatz im kommenden Jahr in Echtbetrieb gehen kann.

2.1.8 Friedhofskataster

Die Friedhofsverwaltung der Stadt Baden-Baden betreut insgesamt 11 Friedhöfe auf den jeweiligen Gemarkungen. Bei einem ersten Friedhof erfolgt derzeit die Datenerfassung zur Umstellung auf ein Friedhofs-Informationssystem durch einen externen Dienstleister. Das FG Vermessung und Geoinformation liefert als Datengrundlage ein hochaufgelöstes georeferenziertes Orthophoto (Abb. 22) sowie ggf. terrestrisch ergänzte Grabgeometrien und Wegelinien, welche aus dem Orthophoto aufgrund Bewuchs, Gebäuden, etc. nicht digitalisierbar sind (Abb. 23). Zusätzlich können aus der vorhandenen Punktwolke bei Bedarf weitere topografisch relevante Informationen wie Gelände- und Mauerhöhen generiert werden, aber auch 3D-Produkte wie DGM und fototexturiertes Mesh (Abb. 24).



Agisoft Metashape 2019

Abb. 22: Ausschnitt Orthophoto



RIB 2019

Abb. 23: CAD-Bearbeitung von Grabflächen inkl. Wegenetz aus Punktwolke



Agisoft Metashape 2019

Abb. 24: Fototexturiertes Mesh vom Friedhof

3 Zusammenfassung

Der Einstieg in die Welt der UAV mit seinen zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten, der Aufwand für Beschaffung von Hard- und Software, Schulung und Einarbeitung in die Thematik hat sich gelohnt. Nach anfänglicher Skepsis und Zurückhaltung gegenüber einer neuen Technik bei den städtischen Fachgebieten

ist heute die Nutzung von Daten, die aus einer UAV-Befliegung generiert werden können, selbstverständlich geworden. Eine Vielzahl an Anwendungsfällen ist bereits entstanden, weitere Ideen werden gedanklich schon entwickelt.

Starrflügler und Multicopter sind im (Vermessungs-)Alltag der Stadtverwaltung Baden-Baden nicht mehr wegzudenken. Die Genauigkeit der produzierten Daten ist für 95 Prozent der Anwendungsfälle völlig ausreichend. Man muss sich auch darüber im Klaren sein, mit welchem vergleichsweise geringen Aufwand man eine große Datendichte mit hohem Informationsgehalt erhält. Ein wichtiger nicht zu unterschätzender Faktor ist die riesige Datenmenge, die bei einer UAV-Befliegung und daran anschließender Auswertung produziert wird. Für die Berechnungsprozesse sind leistungsstarke Rechner und Speicherkapazität notwendig, aber auch für die Weiterverarbeitung der Daten bei den Auftraggebern. Gewiss ist nicht immer ein Einsatz von UAV möglich oder gar sinnvoll. Die UAV-Technik ist ein zusätzliches Hilfsmittel zur Gewinnung von Geodaten und stets in Ergänzung zu anderen Messsystemen wie Tachymeter/Scanstation, Laserscanner, GNSS-Empfänger zu sehen. Vorteile der Datenerfassung sind ganz klar die Schnelligkeit und Effizienz, die Perspektive von oben, aber auch der Sicherheitsaspekt bei diversen Aufgaben wo Arbeitsschutz bei Personen eine erhebliche Rolle spielt (Inspektionen von Bauwerken, Strommasten, etc.).

Wir bewegen uns mit unseren unbemannten Luftfahrzeugen im Luftraum. Hier gilt es zwingend Gesetze und Regeln zu beachten. Der direkte Kontakt sowie eine umfassende Information von beteiligten Behörden, Institutionen und Dienststellen ist unabdingbar. Bei der Durchführung von städtischen Projekten ist stets Kontakt zu Polizei, Rettungsleitstelle, ggf. Flugplatzleitung des Segelflughafens, aber auch zur DFS (bei Projekten innerhalb der Kontrollzone des Flughafens Karlsruhe/Baden-Baden). Die Erfahrung hat gezeigt, dass auch den „kleinsten“ Teilnehmern am Flugbetrieb (UAV) Verständnis und Unterstützung bei der Durchführung von Projekten entgegengebracht wird. Wie die im Text vorgestellten Projektbeispiele zeigen, finden die bereitgestellten Produkte/Geodaten ein breites Anwendungsfeld von Naturschutz bis Städtebau. Gerade im Bereich der Stadtplanung tragen die aus UAV-Befliegung generierten Grundlagendaten für eine Sensibilisierung auf Planungsebene bei und sorgen so für eine wesentlich höhere Akzeptanz bei der Umsetzung von (Bau-)Projekten.

Literatur

- Agisoft Metashape (2019): Metashape – photogrammetric processing of digital images and 3D spatial data generation. www.agisoft.com, letzter Zugriff 12/2019.
- CloudCompare (2019): 3D point cloud and mesh processing software – Open Source Project. www.cloudcompare.org, letzter Zugriff 12/2019.
- DJI (2019): DJI Phantom 4 RTK. www.dji.com/de/phantom-4-rtk, letzter Zugriff 12/2019.

- ESRI (2019): Explorer for ArcGIS. www.esri.com/en-us/arcgis/products/explorer-for-arcgis, letzter Zugriff 12/2019.
- Geoplex (2019): PlexMap. www.geoplex.de, letzter Zugriff 12/2019.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. Zeitschrift für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (PFG), 2016(1), 17–30.
- LGL BW (2019): Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg – Digitale Geländemodelle. www.lgl-bw.de/unsere-themen/Produkte/Geodaten/Digitale-Gelaendemodelle, letzter Zugriff 12/2019.
- Pix4D (2019): Pix4Dmapper – Die führende Photogrammetrie-Software für das professionelle Drohnen-Mapping. www.pix4d.com/de/produkt/pix4dmapper-photogrammetrie-software, letzter Zugriff 12/2019.
- 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, 45–54.
- RIB (2019): RIB iTWO civil – CAD-Software für den Straßen-, Erd- und Kanalbau. www.rib-software.com/loesungen/cad-tiefbau, letzter Zugriff 12/2019.
- senseFly (2019a): Explore our drones. www.sensefly.com, letzter Zugriff 12/2019.
- senseFly (2019b): eBee Plus. www.sensefly.com/drone/ebec-plus-survey-drone, letzter Zugriff 12/2019.
- USGS (2019a): SRTM Data Products. www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects, letzter Zugriff 12/2019.
- USGS (2019b): Earth Explorer. <https://earthexplorer.usgs.gov>, letzter Zugriff 12/2019.
- VISALL 3D (2019): Interaktive 3D-Visualisierung und Trassenplanung. <https://vis-all.de>, letzter Zugriff 12/2019.
- Wikipedia (2019): NDVI. https://de.wikipedia.org/wiki/Normalized_Difference_Vegetation_Index, letzter Zugriff 12/2019.

Kontakt

Thomas Maier
 Stadt Baden-Baden
 Fachgebiet Vermessung und Geoinformation
 Briegelackerstraße 8, 76532 Baden-Baden
thomas.maier@baden-baden.de

Baubegleitende Dokumentation mittels UAV und bildbasierten Punktwolken

Alexander Zurhorst | Jens Hudasch

1 Einleitung

Vermessungen mittels Unmanned Aerial Vehicles (UAV) sind seit einigen Jahren ein großes Thema. Neue technische Entwicklungen lassen die Anwendungen immer einfacher und effektiver werden. Ein besonderes Augenmerk liegt aktuell auf preiswerten Multikoptern mit integrierten GNSS-Modulen, die aufgrund der integrierten Zweifrequenz-Empfänger präzise Positionsbestimmungen mittels Realtime-Kinematic (RTK), alternativ auch über Post-Processing, ermöglichen. Beispielhaft hierfür ist das System DJI Phantom 4 RTK (P4RTK), welches zum Jahresbeginn 2019 in den Markt eingeführt wurde.

Diese technischen Entwicklungen lassen immer häufiger die Fragestellung aufkommen, wo in der Vermessung – hier im Speziellen bei den Arbeiten im Vermessungsbüro eines öffentlich bestellten Vermessungsingenieurs (ÖBVI) – Arbeitsabläufe mittels UAV-Aufmaßes optimiert werden können. Im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Hochschule Bochum (Hudasch 2019) wurde die Eignung des Systems P4RTK im Bereich baubegleitender Vermessungen (BBV) untersucht. Begleitet wurde diese Arbeit durch die Kooperationsgemeinschaft der drei ÖBVI Büros Dr. Rose, vbm Vermessungsbüro Münsterland und Zurhorst. So war der Bezug zur Praxis auf einem breiten Arbeitsspektrum der Geodäsie gegeben. Inwieweit auch eine UAV-Nutzung bei BBV möglich ist, soll anhand erster Erfahrungen aufgezeigt werden. Da ein ÖBVI Büro wirtschaftlich handeln muss, stand die Arbeitserleichterung und Zeitersparnis im Vordergrund.

1.1 Phantom 4 RTK

1.1.1 Das System

Für die Untersuchung bei der BBV kam ein P4RTK-System zum Einsatz. Der P4RTK ist ein speziell von der Firma DJI weiterentwickeltes UAV für den geodätischen Gebrauch.

Durch die Integration eines Zweifrequenz-RTK-GNSS-Empfängers soll das GNSS-Modul der P4RTK laut Herstellerangaben eine Positionsgenauigkeit von $\pm 1,5 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$ vertikal und $\pm 1 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$ horizontal aufweisen. Das eingebaute GNSS-Modul kann neben den L1-/L2-Frequenzen des GPS- und des GLONASS-GNSS-Systems auch die B1-/B2-Frequenzen des Beidou- und die E1-/E5a-Frequenzen des Galileo-GNSS-Systems empfangen und verarbeiten.

In der Kamera der P4RTK ist ein 1' großer CMOS-Sensor mit 20 Megapixel (5472×3648 Pixel, 3:2-Format) und einer Brennweite von 8,8 mm verbaut. Neben einer Unendlich-Fokussierung besitzt die Kamera einen elektronischen Zentralverschluss. Jedes aufgenommene Bild der P4RTK besitzt XMP-Metadaten. Neben der Kameraneigung und verschiedenen Flugparametern des UAV werden unter anderem Kalibrierparameter von DJI und Informationen zur RTK-Messung hinterlegt (DJI 2019).

1.1.2 Voruntersuchungen

Das P4RTK-System wurde im Labor der Hochschule geprüft. Insbesondere wurde eine Kamerakalibrierung durchgeführt. Ohne in die Details zu gehen ist bemerkenswert, dass die Kamera dabei eine hohe Stabilität über zwei Kalibrierungsmessungen aufwies. Auch wenn es sich um keine Messkamera handelt, ist die im P4RTK verbaute Kamera von der Metrik sehr gut. Die innere Orientierung des P4RTK-Systems stellte sich als weitestgehend stabil heraus. Auch der Autofokus arbeitete in den Testreihen sehr zuverlässig und gut.

Das RTK-System wurde bei allen Untersuchungen in Echtzeit mit Korrekturdaten von SAPOS NRW über NTRIP genutzt (BKG 2019). Der Vorteil eines RTK-Systems ist die direkte Georeferenzierung. Passpunkte können stark reduziert werden oder (unter Umständen) gar ganz weggelassen werden. In der Praxis funktionierte das RTK-System durchaus zuverlässig. Gelegentlich wurde die GPS-FIX-Lösung verloren, sodass Flugstreifen ohne hochgenaue Koordinate für den Bildmittelpunkt entstanden. Durch die hohe Überlappung und einer guten Aufnahmekonfiguration (Kap. 1.2) entstand in der Bündelblockausgleichung immer ein zuverlässiger Bildverband. Im Rahmen des Projektes führte das RTK in Verbindung mit der Aufnahmekonfiguration zu einer Genauigkeit von 1 bis 2 cm in der Lage sowie 2 bis 3 cm in der Höhe.

1.2 Aufnahmekonfiguration

Es wurden bei den Untersuchungen verschiedene Aufnahmekonfigurationen (Abb. 1 und Abb. 2) getestet (vgl. auch Przybilla 2020, in diesem Tagungsband). Eine Kombination aus einer Nadir-Aufnahme und einer niedriger geflogenen Oblique-Aufnahme im Kreisverband stellt sich für die Auswertung als optimal heraus. Untersucht wurden hierbei die Ermittlung der inneren Orientierung anhand der vorgegebenen Aufnahmen und die Abweichungen der ermittelten Koordinaten der Bündelblockausgleichung zu Kontrollpunkten (Root Mean Square Error – RMSE).



Abb. 1: Planung einer typischen Nadir-Aufnahme



Abb. 2: Planung einer typischen Oblique-Aufnahme im Kreuzverband

2 Baubegleitende Vermessung

2.1 Umfang der baubegleitenden Vermessung

Die BBV gliedert sich in mehrere Abschnitte, die in Abb. 3 dargestellt sind.

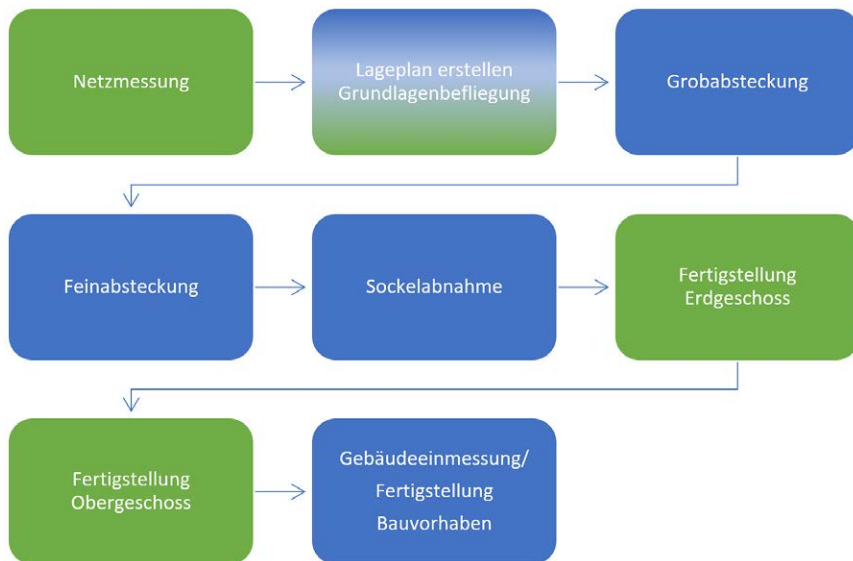


Abb. 3: Arbeitsschritte einer BBV. Grüne Arbeitsschritte sind optional.

2.2 Durchführung von UAV-Befliegungen bei der baubegleitenden Vermessung

Interessant ist zum einen die Wirtschaftlichkeit und zum anderen die technische Umsetzbarkeit von UAV-Befliegungen bei der BBV.

Das P4RTK-System ermittelt keine Koordinaten in Echtzeit und kann sicherlich nicht alles bei einer BBV abdecken. Weder wird eine tachymetrische Messung ersetzt, die bei einer Absteckung direkt – in Echtzeit – eine Koordinate liefert, noch örtliche Arbeiten, wie die Anzeige von Achsen auf Schnurgerüsten. Der Schwerpunkt vom UAV-Einsatz liegt auf *Kontrollen* und *Beweisicherungen*.

2.2.1 Lageplan zum Bauantrag

Vor Baubeginn ist ein Lageplan zum Bauantrag zu erstellen. Der Inhalt ist in § 3 BauPrüfVO geregelt. Die Anforderungen an solch einen Lageplan können sehr unterschiedlich sein. Alle Pläne haben gemein, dass sie den momentanen Zustand des Baugrundstücks dokumentieren und die geplante Maßnahme darstellen. Bei der Dokumentation des Baugrundstücks kann eine UAV-Befliegung helfen. Insbesondere bei allen luft sichtbaren Merkmalen: Geländehöhen, Dachformen und Höhen von Nachbargebäuden, Böschungen, Gewässer sowie verschiebbliche Bodenbefestigungen sind aus Befliegungen gut zu entnehmen. Hierfür können aus der Befliegung verschiedene Daten abgeleitet werden: Ein digitales Orthofoto sowie hinterlegte Höhen bilden die Grundlage einer Erfassung im Innendienst. Hinzu kommen Messungen in einer generierten Punktwolke. Böschungen lassen sich gut aus von Höhen abgeleiteten Schummerungsbildern entnehmen. In unübersichtlichen und großen Flächen ist der Vorteil eines UAV-Datensatzes zur Auswertung im Innendienst vom Arbeitsaufwand deutlich spürbar.

Ergänzende Arbeiten wie die Messung von Kanaldeckeln mit Sohlthiefen sind weiterhin terrestrisch vorzunehmen. Die UAV-Befliegung ist also hier ein ergänzender Sensor zur Aufnahme des Bestandes.

2.2.2 Grobabsteckung

Die Grobabsteckung wird abgerufen um das erste Mal die Planung in die Örtlichkeit zu übertragen. Sie dient als erste Orientierung für Baumaschinen, wo z. B. Mutterboden abgetragen werden muss. In diesem Arbeitsschritt sind direkte Messverfahren in Echtzeit nötig um die Koordinaten der Planung direkt mit einem Holzpflock o. ä. in die Örtlichkeit zu übertragen. Die Dokumentation mittels UAV ist technisch machbar, oft sogar trivial, aber meist nicht wirtschaftlich. Eine Ausnahme bilden Großbaustellen, bei denen die Grobabsteckungen umfangreich sein können. Mittels Orthofotos kann dann eine komplexe Situation plakativ für z. B. Baubesprechungen aufbereitet werden.

2.2.3 Feinabsteckung

Feinabsteckungen sind ähnlich der Grobabsteckungen mit einem direkten Messverfahren umzusetzen. Auch bei Feinabsteckungen ist die Wirtschaftlichkeit kritisch zu hinterfragen. Technisch ist die Dokumentation auch schwieriger (Abb. 4), da die Feinabsteckung sehr genau – oft unter oder um die 1 cm-Genauigkeit – durchgeführt werden muss. Dementsprechend genau muss auch die aus der UAV-Befliegung abgeleitete Punktwolke sein. Dies stellt hohe, wenn auch

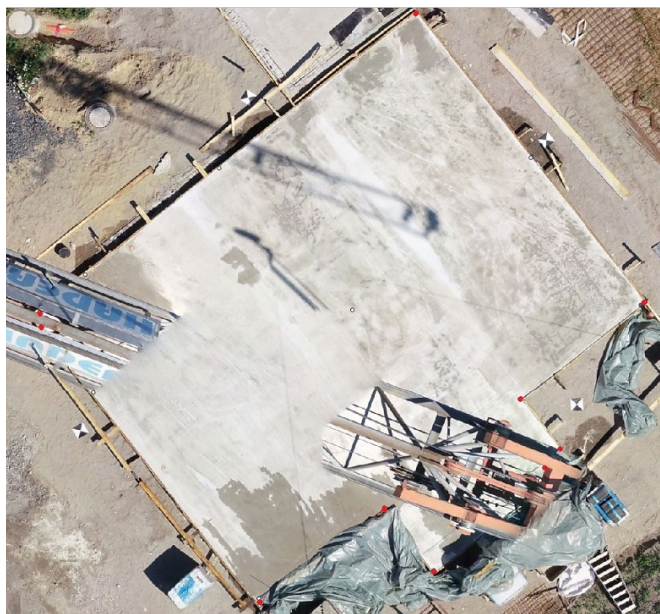


Abb. 4:
Sichtprobleme
bei Grob- und
Feinabsteckung
durch Bauma-
schinen (hier:
Kran)

machbare, Ansprüche an die UAV-Befliegung und Auswertung. Wirtschaftlich wird eine Dokumentation von einer Feinabsteckung auch wiederum bei Großbaustellen. Ein Beispiel ist die Dokumentation von Bohrlöchern für die Pfeiler einer großen Industriehalle in Fertigbauweise. Hier kann eine Beweissicherung im Zweifelsfall bei späteren Regressansprüchen durch Baufehler das ÖBVI-Büro entlasten.

2.2.4 Sockelabnahme

Anders als bei den Absteckungen steht bei der Sockelabnahme die Dokumentation im Vordergrund. Für das Land NRW ist dies in der Landesbauordnung NRW (BauO NRW) § 83 (3) festgelegt: In einer Sockelabnahme soll die Einhaltung der Maße eines Bauvorhabens in Lage und Höhe zum vorher geplanten und beantragten Projekt geprüft und dokumentiert werden. Maße wie die Lage der Bodenplatte, aber auch der Trauf- und Firsthöhe sowie Balkenhöhen, sind meist gut aus einer UAV-Befliegung abzuleiten. Gerade bei hohen und in der Dachform komplexen Gebäuden ist eine Erfassung aus der Luft und eine anschließende Auswertung aus der Punktwolke effizient. Meist sind all diese Merkmale luftsichtbar, da die Bauphase noch nicht oder gerade erst abgeschlossen ist (Abb. 5). Wenig bis keine Vegetation oder andere Hindernisse versperren die Sicht des optischen Sensors eines UAV.



Abb. 5: Punktwolke eines Rohbaus zur Dokumentation von Bodenplatte und Erdgeschoss-Außenwänden im Rahmen einer Sockelabnahme

2.2.5 Gebäudeeinmessung

Analog zur Sockelabnahme steht auch bei der Gebäudeeinmessung die Dokumentation des (fertiggestellten) Gebäudes im Vordergrund. In NRW ist die Gebäudeeinmessung verpflichtend. Anders als bei den anderen Vermessungsleistungen ist die Gebäudeeinmessung eine hoheitliche Tätigkeit und im VermKatG NRW § 16 geregelt. Aus dem amtlichen Wesen der Gebäudeeinmessung ergibt sich auch eine Vorschrift zur Durchführung einer Gebäudeeinmessung. Die Ermittlung von Koordinaten aus einer UAV-Befliegung zählt nicht zu den zugelassenen Messmethoden, sodass eine Gebäudeeinmessung mittels UAV im Moment rechtlich noch nicht durchführbar ist. Technisch wäre eine solche Messung analog zur Sockelabnahme umsetzbar.

2.3 Messverfahren

Die Messung kann in der 3D-Punktwolke direkt geschehen. Klassisch wird dies in einer Software am Monitor durchgeführt. Es gibt verschiedenste Lösungen auf dem Markt. Um die Messung in der Punktwolke einfacher zu gestalten, kann die Visualisierung durch 3D-Monitore erhöht werden.

Eine weitere Variante ist die Messung in den *orientierten* Fotos; dies entspricht einer Messung im Vorwärtsschnitt. Wird in mehreren Fotos dieselbe sichtbare Stelle markiert, kann die zugehörige Koordinate im Raum durch den Vorwärtsschnitt gerechnet werden (Abb. 6). Alle gängigen fotogrammetrischen Auswerteprogramme unterstützen diese Methode.



Abb. 6: Vorwärtsschnitt im orientierten Bildverband

3 Ergebnisse

Der Nutzen von UAV-Daten bei der BBV ist sehr unterschiedlich und auch stark vom zu begleitenden Projekt abhängig. So vielfältig die Bauvorhaben sind, so individuell ist der Einsatz von UAV bei der BBV abzuwägen (Tab. 1). Im ÖBVI Büro steht neben der technischen Machbarkeit der finanzielle Nutzen und somit die *Wirtschaftlichkeit* im Vordergrund.

3.1 Der P4RTK in der BBV

Das P4RTK-System ist ein geeignetes System um geodätische, bildbasierte Punktwolken zu erstellen. Wie aufgezeigt ist der Einsatz von UAV in der BBV oftmals sinnvoll.

3.2 Mehrwert

Neben den Daten für die BBV entstehen an verschiedenen Stellen Mehrwerte. Bei Absteckungen und Sockelabnahmen entsteht auf der Grundlage von Bildverbänden eine Gesamtdokumentation der Baumaßnahme und des Baufelds.

Tab. 1: Einsatz von UAV im Rahmen der BBV

Phase der BBV	Nutzen eines UAV
Lageplan	Als <i>ergänzender</i> Sensor können alle luftsichtbaren Objekte erfasst und für den Lageplan digitalisiert werden. Es ergeben sich häufig wirtschaftliche Vorteile.
Absteckung	Dokumentationen bei Absteckungen sind meist nicht wirtschaftlich. Lediglich bei komplexen Absteckungen können aus der UAV-Befliegung abgeleitete Produkte die Übersichtlichkeit erhöhen und gleichzeitig als Beweissicherung dienen.
Sockelabnahme	Da Sockelabnahmen einen Nachweis zwischen Soll- und Ist-Zustand von Baumaßnahmen liefern sollen, ist die Dokumentation und Auswertung mittels UAV im Rahmen der BBV technisch gut umsetzbar. Je komplexer die Strukturen sind, umso wirtschaftlicher ist eine UAV-Auswertung.
Gebäude-einmessung	Auch für die Gebäudeeinmessung würde sich anbieten die Lage des Baus mittels UAV zu erfassen. Neben technischen und wirtschaftlichen Faktoren ist aber hier der rechtliche Faktor zu berücksichtigen: Die Gebäudeeinmessung ist vom Messverfahren her reglementiert und schließt eine UAV-Auswertung daher (bisher)aus.

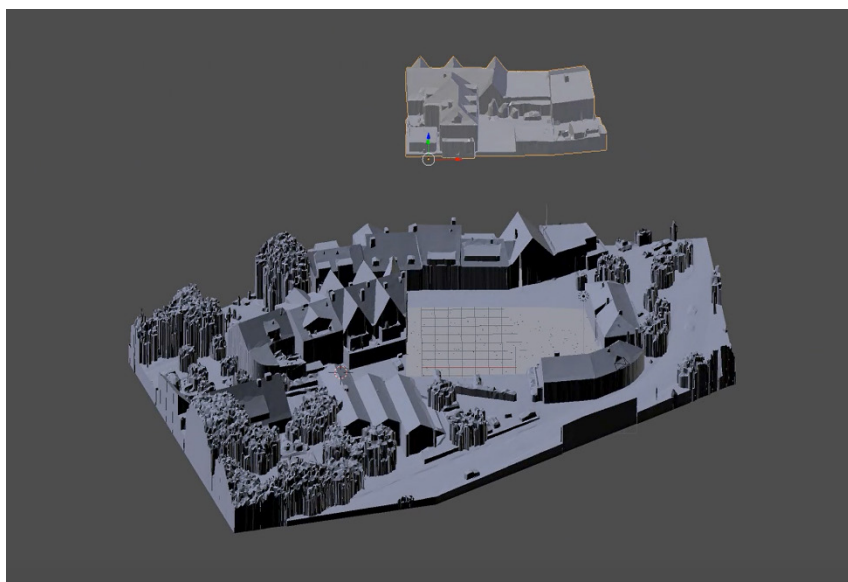


Abb. 7: Kombination von Bestand (Oberflächenmodell, unten im Bild) und Planung (oben im Bild)

Beim Lageplan zum Bauantrag kann aus der Punktwolke ein komplettes 3D-Modell des Bestandes abgeleitet werden. Der auf diese Weise visualisierte Bestand kann mit der als 3D-Daten modellierten Planung verschnitten werden (Abb. 7 und Abb. 8). Es ergibt sich eine plakative Visualisierung der zukünftigen Bebauung. Diese Kombination kann eingesetzt werden um Akzeptanz, beispielsweise in Bauausschüssen, für komplexe Planungen zu bekommen.

Derartige Visualisierungen können in Videos animiert, auf 3D-Druckern ausgegeben oder in VR-Umgebungen beeindruckend in Szene gesetzt werden.



Abb. 8: Visualisierung von Baumaßnahmen im virtuellen Raum mit dem VR-System HTC Vive

Literatur

- BKG (2019): Ntrip – Networked Transport of RTCM via Internet Protocol. <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/about>, letzter Zugriff 09/2019.
- DJI (2019): Phantom 4 RTK – Technische Details & FAQ. www.dji.com/de/phantom-4-rtk/info, letzter Zugriff 06/2019.
- Hudasch, J. (2019): Einsatz des DJI Phantom 4 RTK zur Durchführung baubegleitender Vermessungen. Unveröffentlichte Bachelor-Arbeit, Hochschule Bochum, Labor für Photogrammetrie.
- Przybilla, H.-J. (2020): UAV-Befliegung – Alles klar? Über den Einfluss der Aufnahme-konfiguration. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Augsburg, 61–76. (Dieser Tagungsband).

Kontakt

Alexander Zurhorst
Aerometrics GmbH & Co.KG
Landwehrstraße 143, 59368 Werne
azurhorst@vermessung-zurhorst.de

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) haben die geodätische Praxis erreicht und gehören vermehrt zum „Vermessungsalltag“. Die verfügbaren Trägerplattformen bieten für viele Einsatzbereiche passende Hardware-Lösungen.

Die Nutzung von UAV, einschließlich der Bedienung der damit verbundenen Auswertesysteme, wirft eine Vielzahl von Fragen auf: Gibt es Kameras mit metrischen Eigenschaften? Wie lässt sich eine Kamera im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung kalibrieren? Welche Vorteile bietet die Nutzung von Real Time Kinematic (RTK-)Systemen für die Georeferenzierung? Hat RTK Einfluss auf den örtlichen Messaufwand? Wie können Auswerteprozesse optimiert werden? Wie lässt sich die Qualität der erfassten Daten steigern? Welche Projekte werden aktuell in Verwaltung und Industrie UAV-gestützt bearbeitet? Lassen sich neue Anwendungsgebiete, z. B. im Bereich des Monitorings oder der baubegleitenden Dokumentation, erschließen?



ISBN: 978-3-95786-240-2



9 783957 862402

Schriftenreihe des DVW
Band 97 / 2020
Printversion: 31,00 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaesie.info

