

Aktuelle Forschung und Anwendung von unbemannten Luftfahrzeugen in Österreich





Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation

Organ der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation
und der Österreichischen Geodätischen Kommission

101. Jahrgang 2013

Heft: 2+3/2013

ISSN: 1605-1653

Schriftleiter: Dipl.-Ing. Andreas Pammer

Stellvertreter: Dipl.-Ing. Ernst Zahn

Dipl.-Ing.(FH) Georg Topf

A-1020 Wien, Schiffamtsgasse 1-3

Internet: <http://www.ovg.at>

Ch. Briese, N. Pfeifer:

Vorwort

63

Ch. Briese, R. Fortner, Ph. Sager, N. Pfeifer:

Vom Modellflughobby zu unbemannten Flugsystemen für die Geodatenerfassung

64

Ph. Glira, Ch. Briese, N. Pfeifer:

Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren

75

M. Rumpler, Ch. Hoppe, A. Wendel, G. Mayer, H. Bischof:

Echtzeit-Qualitätsüberprüfung für zuverlässige UAV-gestützte Bildatenerfassung und exakte, automatisierte Mehrbildauswertung

88

H. Ragg, K. Hanke, M. Granig:

Naturgefahrenmonitoring alpiner Prozesse aus multitemporalen UAV- und LIDAR-Daten – Erfahrungen im praktischen Einsatz

101

B. Sotier, A. Graf, J. Kammerlander:

Einsatz von UAV im alpinen Gelände. Erfahrungsbericht und Anwendungsbeispiel aus der Naturgefahrenpraxis

110

O. Gebauer:

Zur Auswahl und Bewertung von Flächenflugzeug-Mikrodrohnen für die Luftbildvermessung

119

G. Neuner, Ch. Neuner, H. Ragg, A. Riha:

Schüttvolumenbestimmung einer Zwischenlagerdeponie mit twinGEO- UAVs. Ein Praxisbericht, von der Datengewinnung bis zur Auswertung und Dokumentation

127



Organ der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation und der Österreichischen Geodätischen Kommission

101. Jahrgang 2013 / ISSN: 1605-1653

Herausgeber und Medieninhaber: Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Austrian Society for Surveying and Geoinformation, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien zur Gänze. Bankverbindung: Österreichische Postsparkasse BLZ 60000, Kontonummer PSK 1190933. ZVR-Zahl 403011926.

Präsident der Gesellschaft: Dipl.-Ing Gert Steinkellner, Tel. + 43 1 21110-2714, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien.

Sekretariat der Gesellschaft: Dipl.-Ing. Julius Ernst, Tel. +43 1 21110-3703, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. E-Mail: office@ovg.at.

Schriftleitung: Dipl.-Ing. Andreas Pammer, Tel. +43 1 21110-5336, Dipl.-Ing. Ernst Zahn, Tel. +43 1 21110-3209, Dipl.-Ing. (FH) Georg Topf, Tel. +43 1 21110-3620, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. E-Mail: vgi@ovg.at.

Manuskripte: Bitte direkt an die Schriftleitung senden. Es wird dringend ersucht, alle Beiträge in digitaler Form zu übersenden. Genaue Angaben über die Form der Abfassung des Textes sowie der Abbildungen (Autoren-Richtlinien) können bei der Schriftleitung angefordert werden bzw. sind auf <http://www.ovg.at> unter „VGI Richtlinien“ zu ersehen. Beiträge können in Deutsch oder Englisch abgefasst sein; Hauptartikel bitte mit einer deutschsprachigen Kurzfassung und einem englischen Abstract sowie Schlüsselwörter bzw. Keywords einsenden. Auf Wunsch können Hauptartikel einem „Blind-Review“ unterzogen werden. Nach einer formalen Überprüfung durch die Schriftleitung wird der Artikel an ein Mitglied des Redaktionsbeirates weitergeleitet und von diesem an den/die Reviewer verteilt. Artikel, die einen Review-Prozess erfolgreich durchlaufen haben, werden als solche gesondert gekennzeichnet. Namentlich gezeichnete Beiträge geben die Meinung des Autors wieder, die sich nicht mit der des Herausgebers decken muss. Die Verantwortung für den Inhalt des einzelnen Artikels liegt daher beim Autor. Mit der Annahme des Manuskriptes sowie der Veröffentlichung geht das alleinige Recht der Vervielfältigung und Wiedergabe auf den Herausgeber über.

Redaktionsbeirat für Review: Univ.-Prof. Dr. Johannes Böhm, Univ.-Prof. Dr. Werner Lienhart, Univ.-Prof. Dr. Norbert Pfeifer, Dipl.-Ing. Gert Steinkellner, Prof. Dr. Josef Strobl, O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hans Sünkel und Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. iur. Christoph Twaroch

Copyright: Jede Vervielfältigung, Übersetzung, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen sowie Mikroverfilmung der Zeitschrift oder von in ihr enthaltenen Beiträgen ohne Zustimmung des Herausgebers ist unzulässig und strafbar. Einzelne Photokopien für den persönlichen Gebrauch dürfen nur von einzelnen Beiträgen oder Teilen davon angefertigt werden.

Anzeigenbearbeitung und -beratung: Dipl.-Ing. Andreas Pammer, Tel. +43 1 21110-5336, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien. Unterlagen über Preise und technische Details werden auf Anfrage gerne zugesendet.

Erscheinungsweise: Vierteljährlich in zwangloser Reihenfolge (1 Jahrgang = 4 Hefte). Auflage: 1200 Stück.

Abonnement: Nur jahrgangsweise möglich. Ein Abonnement gilt automatisch um ein Jahr verlängert, sofern nicht bis zum 1.12. des laufenden Jahres eine Kündigung erfolgt. Die Bearbeitung von Abonnementangelegenheiten erfolgt durch das Sekretariat. Adressänderungen sind an das Sekretariat zu richten.

Verkaufspreise: Einzelheft: Inland 15 €, Ausland 18 €; Abonnement: Inland 50 €, Ausland 60 €; alle Preise exklusive Mehrwertsteuer. OVG-Mitglieder erhalten die Zeitschrift kostenlos.

Satz und Druck: Buchdruckerei Ernst Becvar Ges.m.b.H., A-1150 Wien, Lichtgasse 10.

Offenlegung gem. § 25 Mediengesetz

Medieninhaber: Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Austrian Society for Surveying and Geoinformation, Schiffamtsgasse 1-3, A-1020 Wien zur Gänze.

Aufgabe der Gesellschaft: gem. § 1 Abs. 1 der Statuten (gen. mit Bescheid der Bundespolizeidirektion Wien vom 26.11.2009): a) die Vertretung der fachlichen Belange der Vermessung und Geoinformation auf allen Gebieten der wissenschaftlichen Forschung und der praktischen Anwendung, b) die Vertretung aller Angehörigen des Berufsstandes, c) die Förderung der Zusammenarbeit zwischen den Kollegen der Wissenschaft, des öffentlichen Dienstes, der freien Berufe und der Wirtschaft, d) die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, e) die Herausgabe einer Zeitschrift mit dem Namen „Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation“ (VGI).

Erklärung über die grundlegende Richtung der Zeitschrift: Wahrnehmung und Vertretung der fachlichen Belange aller Bereiche der Vermessung und Geoinformation, der Photogrammetrie und Fernerkundung, sowie Information und Weiterbildung der Mitglieder der Gesellschaft hinsichtlich dieser Fachgebiete.



<http://www.ovg.at>



<http://www.oegk-geodesy.at>

Vorwort

In der Photogrammetrie, Fernerkundung und Ingenieurgeodäsie, genauso aber auch in angrenzenden Wissenschaften wie beispielsweise der Computer Vision und Robotik, haben kleine unbemannte Luftfahrzeuge mit verschiedenen Sensoren an Bord eine Lawine von Forschungsarbeiten ausgelöst. Die Ursache liegt in Fortschritten in der Steuerungs- und Regelungstechnik und in der Miniaturisierung der Flugobjekte und Sensoren. Dies hat zu kleinen, leicht steuerbaren unbemannten Flugobjekten geführt. Außerdem sind Satellitennavigation und Trägheitsnavigation soweit weiterentwickelt worden, dass automatisiert und zuverlässig eine durch Punkte vorgegebene Route abgefliegen werden kann.

In der Literatur sind unterschiedliche Bezeichnungen für diese Flugobjekte bzw. -systeme (Flugobjekte inkl. der Steuer- und Datenübertragungseinheit) zu finden. Während im militärischen Bereich der Begriff „Drohne“ uns allen aus den Medien geläufig ist, versucht man im Bereich der zivilen Anwendung den Begriff unbemanntes Fluggerät bzw. -system (unmanned aerial vehicle (UAV) bzw. unmanned aircraft system (UAS)) oder aber ferngesteuertes Fluggerät bzw. -system (remotely piloted vehicle (RPV) oder remotely piloted aircraft system (RPAS)) zu etablieren.

Ziel des vorliegenden Themenheftes ist es eine aktuelle Übersicht über die Forschung und Anwendung der UAV in Österreich auf dem Gebiet der Geodäsie und Geoinformation zu geben. Dazu gehören einerseits wissenschaftliche Untersuchungen, andererseits aber auch Berichte vom Einsatz in der Praxis.

Der einleitende Artikel *Briese et al.* der hier vorliegenden VGI-Ausgabe gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und der aktuellen Gesetzgebung in Österreich. Anschließend beschäftigt sich *Glira et al.* mit der direkten Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges anhand kostengünstiger Sensoren während *Rumpler et al.* auf die

Echtzeit-Qualitätsüberprüfung und automatisierte Mehrbildauswertung anhand eines Beispiels im Tagebau eingehen. Der Beitrag *Ragg et al.* beschäftigt sich mit dem Naturgefahrenmonitoring alpiner Prozesse aus multi-temporalen UAV und Laserscanner-Daten. Weiters geht auch der Artikel *Sotier et al.* auf den Einsatz im alpinen Gelände ein und schildert den Einsatz eines UAV zur Dokumentation einer Erosionsrinne mit einer ausgedehnten Schutthalde. *Gebauer* beschäftigt sich hingegen mit der Auswahl und Bewertung von UAV zur Luftbildmessung, während der abschließende praxisorientierte Beitrag *Neuner et al.* auf die Anwendung von UAV zur Schüttvolumenbestimmung eingeht.

Die hier veröffentlichten Arbeiten der Autoren aus der Wissenschaft wurden bis auf den einleitenden Artikel *Briese et al.* standardmäßig dem Review-Verfahren im VGI unterzogen (Artikel: *Glira et al.*, *Rumpler et al.*, *Ragg et al.* und *Sotier et al.*). Das „Peer-Verfahren“ wurde auch auf die Artikel mit starkem Praxischarakter (*Gebauer* und *Neuner et al.*) angewandt, die Kriterien wurden jedoch dem anderen Zugang entsprechend angepasst. Bei diesen Beiträgen wurde ein stärkeres Augenmerk auf die Schilderung der praktischen Anwendung gelegt, und auf eine genaue Darstellung und Einbettung der angewandten Methoden wurde weitestgehend verzichtet.

Dass dieses Thema eine große Bedeutung hat, zeigen beispielsweise die *Intergeo* (neben einem UAV im Titelbild 2013, findet man 7 Vorträge mit der Abkürzung UAV im Titel), die UAV-g in Rostock (2013), das UAS Summit im Rahmen der AGIT 2013 in Salzburg sowie die zukünftige Session „Unmanned Aerial Vehicles for High Resolution Sensing in the Geosciences“ auf der in Wien stattfindenden EGU 2014 (European Geosciences Union, <http://www.egu.eu/>).

Christian Briese und Norbert Pfeifer

Vom Modellflughobby zu unbemannten Flugsystemen für die Geodatenerfassung



Christian Briese, Raoul Fortner, Philip Sager und Norbert Pfeifer, Wien

Kurzfassung

In den letzten Jahren haben die technologischen Entwicklungen im Bereich der unbemannten Luftfahrzeuge (uLFZ, engl. Unmanned aerial vehicles, UAV) zu einem vermehrten Einsatz dieser Technologie in Forschung und Entwicklung geführt. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und die laufende Rechtsentwicklung zum praktischen Einsatz von UAV Systemen (engl. Unmanned aerial systems, UAS) für die Geodatenerfassung in Österreich. Darüber hinaus werden unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie aufgezeigt. Zukünftig besitzen UAS das Potential die Datenerfassungslücke zwischen der terrestrischen Vermessung und der luftgestützten bemannten Luftfahrt zu schließen.

Schlüsselwörter: Unbemannte Luftfahrzeuge, unbemannte Flugsysteme, Flugsteuerungssysteme, Luftbild, Nahbereichs-Luftbildmessung

Abstract

Technological developments have led to a significantly increased usage of unmanned aerial vehicles (UAV) in research and development in the last years. This article provides an overview about the actual status of the UAV technology in the field of geomatics and provides actual information about the legal use of UAV in Austria. Furthermore, different application fields are discussed. In the future, UAS have the potential to close the data acquisition gap between terrestrial surveying and manned airborne data acquisition.

Keywords: Unmanned aerial vehicles (UAV), unmanned aerial systems (UAS), remotely piloted aircraft systems (RPAS), airborne platforms, flight support systems, aerial image, close range airborne photogrammetry

1. Einleitung

„Der Traum vom Fliegen“ beschäftigt die Menschheit bereits seit vorgeschichtlicher Zeit – man wollte es den Vögeln gleich tun. Im 15. Jahrhundert machte sich Leonardo da Vinci (1452-1519) daran, ein Fluggerät zu erfinden. Da Vinci kam auf die Idee, dass man sich in die Luft schrauben könnte, vorausgesetzt, man kann diese Schraube schnell genug drehen. Er erfand damit den ersten Hubschrauber zumindest theoretisch [1]. Nach Versuchen mit Heißluftballons (weitere Details zur Geschichte der Luftfahrt können unter [1] nachgelesen werden) konnte im Jahr 1783 eine erste zweistündige Ballonfahrt mit einem wasserstoffgefüllten Ballon vor rund 200.000 Bewohnern in Paris stattfinden [1]. Erste Luftbilder aus einem Fesselballon machte der französische Fotograf Nadar im Jahr 1858, während erste Luftaufnahmen aus unbemannten, ferngesteuerten Flugzeugen aus den 1930er Jahren stammen und militärischen Zwecken dienen [2]. Eine

der Wiegen der Luftfahrt in Österreich-Ungarn entstand in Wr. Neustadt wo Ignaz „Igo“ Etrich die Etrich Taube – eines der ersten in größerer Stückzahl gebauten Flugzeuge – ab 1909 entwickelte [3].

Die Geschichte des Messens und Rekonstruierens aus Luftbildern, also der Aerophotogrammetrie, soll hier nicht wiederholt werden. Anstelle der bildgebenden Sensoren (Kameras, Laserscanner, Mikrowellenradar) werden auch andere Messinstrumente eingesetzt, wie bspw. Magnetometer oder Instrumente zur Messung der Schwerkraft. Im vorliegenden Artikel werden speziell luftgestützte bildgebende Messungen aus unbemannten Luftfahrzeugen ins Zentrum gesetzt.

Im Fachbereich der Photogrammetrie wurden z.B. von der Technischen Universität Wien in den 1980er Jahren einige Forschungsarbeiten zur Luftbilderfassung mittels unbemannter Luftfahrzeuge publiziert („Ballonphotogrammetrie“,

siehe z.B. [4]). Das Thema wurde zu dieser Zeit auch international diskutiert. Heckes publizierte im Jahr 1984 am ISPRS Kongress in Rio de Janeiro (Brasilien) einen „Überblick über Flugsysteme für photogrammetrische Luftaufnahmen im Nahbereich“ [5]. Dabei unterteilte er als „Kameraträger für den Nahbereich: (1) gefesselte Systeme (Drachen, Systeme nach dem Prinzip „Leichter als Luft“), (2) ferngelenkte, unbemannte Systeme (Kleinflugzeuge, Kleinhubschrauber) und (3) langsam fliegende, bemannte Systeme (Sportflugzeuge, Ultraleicht-Flugzeuge, Hubschrauber, Luftschiffe und Ballone)“. In seinem Artikel erwähnt Heckes (1984), dass dem routinemäßigen Einsatz von Kleinflugzeugen und Kleinhubschraubern noch Navigationsprobleme entgegenstehen. Abschließend in der Zusammenfassung von Heckens (1984) findet man: „Bei stetiger Weiterentwicklung der Kameraträger und der Navigationstechniken können diese Systeme die Lücke zwischen terrestrischer und aero-photogrammetrischer Aufnahmetechnik schließen.“

Die von Heckes (1984) genannten „Kameraträger“ erlebten in den letzten Jahren aufgrund des technologischen Fortschrittes im Flugzeugbau (Leichtbau, Antriebsentwicklung) als auch im Bereich der Navigation (globale Satellitennavigation, inertielle Messsysteme) und der Mechatronik (Mechanik, Elektrotechnik und Informatik) einen signifikanten Fortschritt. Diese Technologien wurden und werden auch im militärischen Bereich intensiv genutzt. Im vorliegenden Artikel wird ausschließlich auf die zivile Nutzung von unbemannten Flugobjekten eingegangen. Begriffe dafür sind: *unmanned aerial vehicles (UAV)* oder das Gesamtsystem (inklusive Bodenstation) *unmanned aircraft system (UAS)* oder auch *remotely piloted aircraft system (RPAS)*. Neben dem Bereich der UAVs gibt es aktuell auch für die Nahbereichs-Luftbildphotogrammetrie interessante Entwicklungen in der bemannten Luftfahrt (z.B. Ultraleicht-Flugzeuge, Gyrokopter und motorisierte Paragleiter). Auf diese Entwicklungen wird im vorliegenden Artikel nicht näher eingegangen.

Viele der aktuellen Entwicklungen im Bereich kleiner bzw. leichter UAV nutzen die technische Weiterentwicklung im Modellflugsport um geeignete Plattformen zur systematischen Erfassung von Objekten und Landschaftsoberflächen zu entwickeln. Während im Modellflugsport neben dem Modellbau vor allem auch die Kunst der manuellen Flugsteuerung eine wesentliche Rolle spielt, versucht man bei den Flugsystemen zur

Geodatenerfassung den Piloten durch Assistenzsysteme beim Fliegen zu unterstützen bzw. nutzt man Navigationskomponenten um ein automatisiertes oder zukünftig sogar autonomes Fliegen zu ermöglichen.

Die technische Weiterentwicklung der Flugplattformen hat zu einem signifikanten Anstieg der Nutzung von UAV Systemen zur Geodatenerfassung geführt (siehe z.B. die Publikationen der ISPRS-Kongresse 2008 in Peking und 2012 in Melbourne, die eigens zum Thema UAV veranstalteten Konferenzen UAV-g in Zürich (2011) bzw. in Rostock (2013), das „UAS Summit“ im Rahmen der AGIT 2013 in Salzburg, der „Workshop on UAV-based Remote Sensing Methods for Monitoring Vegetation“ an der Universität zu Köln sowie die zukünftige Session „Unmanned aerial vehicles for high resolution sensing in the geosciences“ [6] auf der in Wien stattfindenden General Assembly 2014 der EGU (European Geosciences Union).

Im folgenden Kapitel 2 wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik gegeben. Kapitel 3 widmet sich der Rechtslage zum Einsatz von UAV Systemen in Österreich und stellt einen aus österreichischer Sicht aktuellen Abriss über relevante Organisationen und Interessengruppen zur Verfügung. Das abschließende Kapitel 4 fasst den Artikel zusammen, zeigt unterschiedliche praktische Anwendungsgebiete von UAV Systemen auf und gibt einen Ausblick in zukünftige Entwicklungen.

2. Aktueller Stand der Technik

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, hat sich die Technologie im Bereich unbemannter Flugsysteme in den letzten Jahren signifikant weiterentwickelt. In den folgenden Unterkapiteln wird überblicksartig auf die dabei relevanten Fortschritte eingegangen.

2.1 Fluggeräte

Heute steht eine Vielzahl unterschiedlicher Fluggeräte von Groß bis sehr Klein zur Verfügung, beispielsweise (vgl. Abbildung 1):

- Luftschiffe oder Ballone (Prinzip „Leichter als Luft“)
- Motorisierte Gleitschirme
- Micro-Flugzeuge (z.B. Spannweite < 1 m)
- Flächenflugzeuge
- Helikopter
- Multi-Rotor Systeme



(a) Zeppelin (Länge ca. 10 m), <http://skive.ch/>



(b) Helikite (11 m³), <http://www.allsoop.co.uk/>



(c) Motorisierter Paragleiter (Gleitschirm: 3.8 m²)
<http://www.vflugzeuge.de/>



(d) Nurlügel (Spannweite: 80 cm)
<http://www.sensefly.com>



(e) Flächenflugzeug (Spannweite: 5 m)
<http://www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/zav/unsere-projekte/projekt-umars.html>



(f) Hubschrauber (Hauptrotor: 3.2 m)
<http://www.aeroscout.ch/>



(g) Quadrocopter (Durchmesser: 50 cm)
<http://mikrokopter.de>



(h) Flächenflugzeug (Spannweite: ca. 75 m)
<http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/ResearchUpdate/Helios/>

Abb. 1: UAV Typen mit unterschiedlichen Sensoren

- HALE (High Altitude and Long Endurance) Systeme
- Neben großen Flugobjekten (z.B. >25 kg Gesamtgewicht oder mehr als 5 m Spannweite), die oft auch für militärische Anwendungen genutzt werden, hat der Leichtbau mit den typischerweise eingesetzten Materialien: GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff), CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) und EPP (expandiertes Polypropylen) und die Weiterentwicklung der Regelungs- und Navigationssensorik zu einer Vielzahl möglicher Bauweisen (von sehr groß bis sehr klein) für die Geodatenerfassung geführt.

Leichte Flächenflugzeuge und Helikopter sind als Fluggeräte durch Multirotorsysteme ergänzt worden. Letztere erlauben durch gegenläufige in einer horizontalen Ebene angebrachte Motoren einen Drehmomentausgleich und über entsprechende Motorregelung anhand von Beobachtungen von inertialen Messeinheiten (Beschleunigungsmesser und Drehratensensoren) eine den Steuerbefehlen entsprechende Lageregelung des Flugobjektes. Anhand dieses Konzeptes sind selbst horizontierende, automatisiert oder auch autonom fliegende (siehe dazu Kapitel 2.2) Multirotorsysteme mit z.B. drei (Trikopter), vier (Quadrokopter), sechs (Hexakopter), acht (Oktokopter) oder mehr Rotoren möglich.

Die Flugeigenschaften der jeweiligen UAV Typen unterscheiden sich signifikant (z.B. senkrecht Starten und Landen, Länge der Flugzeit in Stunden bzw. Reichweite in km, Windanfälligkeit). Bei der Auswahl des geeigneten Flugzeugtyps für die jeweilige Anwendung sind neben den Flugeigenschaften die Einsatzmöglichkeiten (Strom-, Gewichts- und Platzbeschränkungen) der jeweiligen Sensorik (Digitalkamera, Laserscanner, Thermalkamera, Multispektralkamera, etc.) zu berücksichtigen.

2.2 Flugsteuerung und Flugunterstützung

Beim klassischen Modellflugsport steuert der Pilot sein Modell direkt auf Sicht (Sichtflug, engl. *Visual line of sight* (VLOS)). Dadurch ergeben sich naturgemäß einige Einschränkungen, abhängig von der Größe des Modells, dem Können und der Sehkraft des Piloten. Für ein Flächenmodell mit rund 150 cm Spannweite ist das Erkennen der Fluglage schon nach etwa 300 m schwierig. Die aktuelle Fluglage, -höhe und -geschwindigkeit kann dabei nur geschätzt werden. Beim Starten, Landen und in der Luft kann sich der Pilot nur auf seine Erfahrungswerte, die dem jeweiligen Fluggerät angepasst werden müssen, stützen.

Seit ein paar Jahren gibt es auch im Bereich des Modellflugsports Telemetriesysteme für Modellflugzeuge (siehe z.B. [7]). Dabei werden Informationen zu Strom, Spannung, Flughöhe, Geschwindigkeit, etc. via der für die Modellflugsteuerung heutzutage typischerweise eingesetzten 2,4 GHz Funkstrecke an ein Modul am Boden gesendet und auf einem Display (z.B. auf der Fernsteuerung) ausgegeben. Neuerdings ist darüber hinaus immer häufiger auch eine Sprachausgabe der relevanten Daten (z.B.: Steig- oder Sinkrate) möglich.

Durch die Entwicklung kleiner und leichter inertialer Messsensoren (typischerweise basieren die Sensoren auf der MEMS (*micro-electromechanical system*) -Bauweise) stehen heute Flugstabilisierungssysteme für die verschiedenen Typen der Fluggeräte zur Verfügung. Die Systeme arbeiten meist mit 2- oder 3-Achsen Drehraten- und Beschleunigungssensoren und stabilisieren dementsprechend 2 oder 3 Achsen. Durch diese Sensoren und Regelungstechniken ist ein vereinfachtes bzw. präziseres Fliegen des Piloten möglich. Für Multi-Rotor Systeme, bei denen durch einen Regelkreis eine entsprechende Steuerung der Motoren erfolgt, sind diese Systeme essentiell.

Neben dem manuellen und manuell gestützten Flug stehen heute für den Einsatz im UAV Autopilotensysteme zur Verfügung (siehe z.B.: [8] und [9]). Diese Sensoren nutzen über die Flugstabilisierungssensoren hinaus GNSS Empfänger (typischerweise L1 Empfänger) um neben der Flugstabilisierung ein automatisiertes Abfliegen eines vorgegebenen Flugpfades (oft als Wegpunktflug bezeichnet) zu ermöglichen. Außer dem Wegpunktflug ist auch ein automatisches Starten, Landen bzw. ein Rückflug zur Startposition in einer bestimmten Höhe über Grund möglich. Mittels der eingesetzten Sensorik kann auch eine näherungsweise direkte Georeferenzierung der aufgenommenen Sensordaten erfolgen (siehe [10]). Beim Einsatz von Autopiloten ist jedoch immer ein entsprechendes Telemetriesystem nötig um den aktuellen Zustand des Fluggerätes überwachen zu können. Autopilotensysteme ermöglichen einen automatisierten Betrieb des UAV auf Sicht (VLOS) als auch ein Fliegen ohne direkte Sichtverbindung zum Fluggerät (engl. *Beyond visual line of sight* (BLOS)). Beim Einsatz sind die jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen (siehe dazu auch Kapitel 3.2).

Alternativ zum Fliegen auf Sicht (VLOS) ist heute auch der Immersionsflug oder FPV (*first*

person view) populär (siehe dazu Abbildung 2). Bei dieser Variante der Flugsteuerung wird das Flugobjekt mittels eines live übertragenen Videokamerabildes aus der Perspektive des ferngesteuerten Modells – wie aus der Sicht eines Fahrers/Piloten – gesteuert. Das Live-Video wird dabei typischerweise in eine Videobrille eingespielt und der Pilot hat den Eindruck als ob er selbst in seinem Modell mitfliegen würde. Wenn das Flugobjekt neben der Kamera und der Übertragungstechnik auch mit entsprechenden Sensoren ausgestattet ist, können dem Piloten am Boden diese Sensordaten (Flughöhe, -geschwindigkeit, Position, etc.) direkt in die Datenbrille eingespielt werden. Das Konzept des FPV widerspricht dem Prinzip des Fliegens auf

Sicht (VLOS) und wirft damit neue Fragen an die rechtlichen Regularien auf (siehe dazu auch Kapitel 3.2 und 4).

2.3 Sensoren

Grundsätzlich sind beim UAV-Einsatz zwei Arten von Sensoren zu unterscheiden: Notwendige Einrichtungen für den unbemannten Flugbetrieb selbst (beispielsweise Sensoren für automatische Ausweichmanöver bei Hindernissen im Sinne des „Detect&Avoid“), sowie solche für die jeweilige Arbeitsmission (beispielsweise spezielle Kameras für Luftbildaufnahmen). Jedoch sind beide Arten von Sensoren auch Teil der luftfahrtrechtlichen Zulassung, also auch jene der



Abb. 2: Immersionsflug bzw. FPV (firstpersonview); Links Oben: Pilot mit Videobrille und Empfangsequipment; Rechts Oben: UAV mit Videokamera am Kopf der Pilotenpuppe; Unten: Livebild mit Sensordaten; Bildquelle: <http://fpv-community.de/>.

Arbeitsmission als Bestandteil der so genannten *payload*.

Wie bei allen Komponenten in der Luftfahrt ist auch hier das Gewicht und die Größe sehr wichtig, Stichwort: „Leicht fliegt leicht“. Die Sensoren für die Unterstützung bei der Flugsteuerung (Stabilisierungssysteme und Autopiloten) sind vielfältig und können je nach UAV gewählt werden. Im Vergleich zur zusätzlichen Sensorik für die Geodatenerfassung, wie Kameras und Laserscanner, spielt das Gewicht dieser Sensorik eine geringere und beinahe vernachlässigbare Rolle. Bei der Steuerung per Livebild (FPV) haben sich wenige Gramm schwere Platinenkameras aus der Überwachungstechnik etabliert. Die Auflösung reicht von 600×400 Pixel bis hin zu Full HD. Zusätzlich und je nach Zweck gibt es neben den Platinenkameras eine ganze Reihe sogenannter Action Cams (z.B. der Firma GoPro) mit einem Gewicht unter 0,1 kg.

Für die Erfassung von Luftbildern werden, je nach Fluggerät, digitale Kompaktkameras oder digitale Spiegelreflexkameras eingesetzt. Neben der Gewährleistung einer entsprechenden Bildqualität und den photogrammetrischen Anforderungen für die Folgeauswertung der Bilder (möglichst stabile innere Orientierung, Schärfentiefe, etc.) stellt oftmals die Steuerung der Kamera und die Synchronisierung der Bilddaten mit anderen am UAV befindlichen Sensoren eine große Herausforderung dar. Die aus Gewichtsgründen zur Verfügung stehenden Kamerasysteme wurden im Gegensatz zu den klassischen Luftbildkameras üblicherweise nicht für den Einsatz in UAV Systemen entwickelt. Dementsprechend muss eine Synchronisation, bspw. über die GPS-Zeit mit dem PPS- (pulse per second) Signal, durch Kunstgriffe realisiert werden.

Digitale Kameras eignen sich aufgrund ihrer Größe, der leichten Verfügbarkeit, der internen Stromversorgung und Datenspeicherung und nicht zuletzt aufgrund ihres geringen Gewichts für die Geodatenerfassung mittels UAV. Zusätzlich steht ein breites Spektrum von Kameras mit unterschiedlicher Stabilität und Abbildungsqualität, vor allem in radiometrischer und geometrischer Hinsicht, zur Verfügung. In den letzten Monaten lässt sich auch ein verstärkter Einsatz von Laserscannersystemen auf UAV-Plattformen beobachten, siehe z.B. [11], [12] oder [13]. Das Sensorgewicht ist dabei eine Herausforderung, der durch größere UAVs begegnet werden kann. Darüber hinaus ist bei dieser kinematischen Datenerfassungsmethode aber eine kontinuierliche

und entsprechend genaue Beobachtung der Flugtrajektorie zur Georeferenzierung der Sensordaten essentiell. Die Messgenauigkeit in der äußeren Orientierung (Position und Winkelstellung) des Sensorkoordinatensystemes kann nur durch eine ausreichend genaue Synchronisation der Datenströme der verschiedenen Sensoren realisiert werden.

Zusätzlich zu Kameras und Laserscannern können auch Publikationen mit Multi- und Hyperspektral-Kameras bzw. auch mit Thermal-kameras gefunden werden (siehe dazu z.B. die Präsentationen der UAV-g Konferenz 2013 [14]).

2.4 Funkübertragung

Für den Einsatz von UAV Systemen ist neben der Übertragung der Telemetriedaten des UAVs eine drahtlose Übertragung etwaiger Sensordaten von praktischer Relevanz. Laut dem Dokument Kienmayer und Flühr, 2013 [15] steht allerdings noch kein eigenes für (zivile) UAS-Anwendungen reserviertes Funkfrequenzband für die Flugsteuerung und Sensordatenübertragung zur Verfügung.

Allgemein setzt die Nutzung eines Funksystems in der Regel eine Bewilligung durch die nationale Fernmeldebehörde (unter Berücksichtigung internationaler Vorgaben) voraus. Die in Österreich verwendbaren Funksysteme können dem Frequenznutzungsplan entnommen werden. Neben den reservierten Frequenzen besteht die Möglichkeit, bei der Fernmeldebehörde um eine „private“ Frequenz anzusuchen. Eine solche kann einem Interessenten auf Antrag gegen Gebühr und zeitlich befristet zugestanden werden [15].

International wurde im Rahmen der World Radio Conference 2013 (WRC'13) eine Resolution beschlossen, ein Frequenzband bei 5 GHz für die UAS Nutzung zu reservieren. Diesbezügliche Bauvorschriften für Funkschnittstellen seien allerdings nicht vor dem Jahr 2016 zu erwarten [15].

3. Interessensvertretungen und Rechtslage in Österreich

3.1 Interessensvertretungen

Neben den Verbänden im Bereich des Modellflugs, wie z.B. dem österreichischen Aeroclub [16] oder dem deutschen Modellflugverband (DMFV), gibt es noch einige andere Gruppierungen die zunehmend an Einfluss gewinnen. Dies sind z.B. die Foren RCGroups [17] und die FPVC-Community (FPVC) Deutschland [18]. Die FPVC arbeitet in Deutschland direkt mit DMFV und den deutschen Behörden zusammen um das Thema

FPV Flug bekannter zu machen und um eine gesetzliche Regelung zu erarbeiten.

Über den Modellflug hinaus existieren im Bereich der UAS die Internationale Organisation UVS International [19] und im deutschsprachigen Raum die Organisation UAV DACH [20] als Initiativen zur Integration von UAV Systemen in den zivilen Luftraum.

In Österreich gibt es seit 2012 innerhalb der AAI (Austrian Aeronautics Industries Group) eine sehr aktive UAS-Arbeitsgruppe (AAI-UAS-WG), in der österreichische Produzenten, Entwickler und Forschungseinrichtungen zu allen UAS-Themen zusammenarbeiten, insbesondere im Bereich ziviler Nutzung und Regularien [21]. Dieser Arbeitsgruppe gehören neben größeren und kleineren Firmen auch viele wissenschaftliche Partner an, und sie steht im laufenden Austausch mit den zuständigen nationalen Behörden (BM-VIT, Austro Control GmbH).

Aus behördlicher Sicht ist in Österreich das BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Infrastruktur und Technologie), Gruppe Luft bzw. OZB (Oberste Zivilluftfahrtbehörde) [22] sowie die ausgelagerte Zulassungsbehörde ACG (Austro Control GmbH) [23] zuständig im Bereich UAV. Eine Übertragung einzelner behördlicher Aufgaben an den österreichischen Aeroclub – oder seine Sachverständigen – ist im Bereich sehr kleiner und leichter UAV aktuell in Diskussion.

3.2 Rechtslage

Auf internationaler Ebene sind bei der Entwicklung von Regularien für zivile UAS-Einsätze vor allem die ICAO (International Civil Aviation Organization, [24]) mit ihrer UAS Study Group, sowie das informelle Netzwerk der Luftfahrtbehörden JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems, [25]) aktiv (auch unter österreichischer Beteiligung durch ACG-Experten). Allerdings benötigen diese Gremien viel Zeit und mit international verbindlichen Ergebnissen ist wohl erst in einigen Jahren zu rechnen.

Auf europäischer Ebene ist formell die EU-Kommission (etwa die Generaldirektion DG ENTR, siehe [26]) sowie insbesondere die europäische Agentur für Flugsicherheit EASA (European Aviation Safety Agency, [27]) zuständig, wobei die EASA derzeit nur die Kompetenz für UAS über 150 kg hat, während gemäß aktuellem EU-Recht alle UAS unter 150 kg in die Regelungskompetenz der einzelnen Nationalstaaten fallen (Regulation (EC) No 216/2008).

Die EASA hat einen mehrjährigen Diskussionsprozess zum europäischen Regelwerk für UAS gestartet und ist auf Grund der zahlreichen Rückmeldungen gerade dabei, ihre eigenen Vorschläge (NPA 2012-10 [28]) komplett zu überarbeiten und 2014 einen neuen Entwurf zu präsentieren (siehe CRD 2012-10 [29]). Langfristig will die EASA auch UAS unter 150 kg europaweit einheitlich regeln, derzeit herrschen hier noch große Unterschiede in der Leichtigkeit der technischen Zulassung und beim Erhalt einer Aufstiegsgenehmigung.

Daneben existieren beratende Einrichtungen und Verbände, etwa UVSI (Unmanned Vehicle Systems International) oder EUROCAE (European Organization for Civil Aviation Equipment), die ebenfalls auf diesen Prozess des „rulemaking“ Einfluss nehmen. Details zum Zusammenspiel der drei Ebenen – international, europäisch, national – bei der laufenden Entwicklung der zukünftigen UAS-Regularien finden sich im Vortrag von Mag. Raoul Fortner (AAI) vom 6. Dezember 2013 [30] (siehe insbesondere S. 11ff).

In Österreich war der Einsatz von UAS zur Luftbildfassung bisher im Luftfahrtgesetz (LFG) nicht explizit geregelt, ein UAS mit einer Kamera galt aber als „Luftfahrzeug“ und hätte die für Luftfahrzeuge geltenden Regularien einhalten müssen, um eine technische Zulassung sowie eine Betriebs- und Aufstiegsenehmigung zu erlangen. Die technischen Möglichkeiten und die praktische Verfügbarkeit der Technik waren der Gesetzgebung voraus. Die Rechtsunsicherheit war auch daran zu erkennen, dass seitens der Interessensvertretungen der Modellflieger unterschiedliche Rechtsauslegungen vertreten wurden.

Mit 1. Jänner 2014 herrscht nun auch in Österreich in der nationalen Gesetzgebung eine bessere rechtliche Klarheit über den Einsatz von unbemannten Flugsystemen: Eine entsprechende Änderung des Luftfahrtgesetzes (LFG) wurde vom BMVIT noch im Dezember 2012 zur Begutachtung ausgesandt und nach zahlreichen Überarbeitungen auf Grund der Begutachtung im April 2013 von der Regierung dem Parlament übermittelt. Der Nationalrat beschloss diese LFG-Novelle am 22. Mai 2013 [31], und der Gesetzestext wurde am 20. Juni 2013 im Bundesgesetzblatt veröffentlicht (BGBl I 108/2013, siehe [32]), sodass die Novelle am 1. Jänner 2014 in Kraft treten konnte.

Das neue LFG regelt ab 1. Jänner 2014 im Abschnitt 4 folgende Einteilung unbemannter

	Einsatzgebiet			
	I unbebaut	II unbesiedelt	III besiedelt	IV dicht besiedelt
Betriebsmasse bis einschließlich 5 kg	A	A	B	C
Betriebsmasse bis einschließlich 25 kg	A	B	C	D
Betriebsmasse über 25 kg und bis einschließlich 150 kg	B	C	D	D

Tab. 1: Kategoriezuordnung A,B,C und D anhand der jeweiligen Gewichtsklasse und des Einsatzgebietes (nach-ACG, LBTH 67 siehe [34])

Luftfahrzeuge in Österreich unter 150kg: Über der „Spielzeuggrenze“ (maximal 79 Joule Bewegungsenergie – § 24d LFG) gibt es nun drei Kategorien:

- 1) Flugmodell (ausschließlich unentgeltlich, nicht kommerziell und nur zum Zwecke des Fluges in einem Umkreis von maximal 500 m) – §§ 24d, 24e LFG
- 2) Unbemanntes Luftfahrzeug (uLFZ) der Klasse 1 (mit direkter Sichtverbindung zum Piloten ohne irgendein technisches Hilfsmittel, maximale Höhe 150m über Grund) – §§ 24f, 24h LFG
- 3) Unbemanntes Luftfahrzeug der Klasse 2 (alle anderen UAS, auch ohne direkte Sichtverbindung) – § 24g LFG

Während für die uLFZ der Klasse 1 direkte, ohne technische Hilfsmittel bestehende Sichtverbindung zum Piloten gewährleistet werden muss (VLOS), können uLFZ der Klasse 2 auch ohne Sichtverbindung (BLOS) betrieben werden. Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 und 2 dürfen aber nur mit Bewilligung der Austro Control GmbH oder einer auf Grund einer Übertragung gemäß §140b zuständigen Behörde betrieben werden. Für uLFZ der Klasse 2 sind sämtliche für Zivilluftfahrzeuge und deren Betrieb geltende Bestimmungen (siehe Änderung der Zivilluftfahrzeug- und Luftfahrtgerät-Verordnung 2010 des BMVIT, BGBl. II Nr. 470/2013, [33]).

Die ACG (Austro Control GmbH) hat als beherrschende Behörde des BMVIT – nach einer kurzen Begutachtung mit der Industrie – am 17. Dezember 2013 detaillierte Ausführungsbestimmungen für die Zulassung und den Betrieb von UAS der Klasse 1 in Österreich veröffentlicht – LBTH 67 (Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge bis 150 kg, siehe [34]). Für UAS der Klasse 2 wird

auf die allgemeinen Bestimmungen nach LFG verwiesen, was derzeit eine Zulassung praktisch kaum ermöglicht, wobei hier im Laufe des Jahres 2014 wohl noch detailliertere Regularien erscheinen sollen.

LBTH 67 unterteilt unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 in vier verschiedene Zulassungskategorien (A, B, C, D) mit jeweils unterschiedlich strengen Zulassungsvoraussetzungen, wobei sich die konkrete Zuordnung gemäß Tabelle 1 aus dem Gesamtgewicht inklusive Treibstoff und Beladung ergibt (bis 5kg, 5kg bis 25kg, 25kg bis 150kg) in Verbindung mit der Besiedelungsdichte des Einsatzgebietes (unbebaut, unbesiedelt, besiedelt und dicht besiedelt). Menschenansammlungen sind explizit ausgeschlossen und bedürfen wegen des großen Gefahrenpotentials einer individuellen Prüfung.

Je nachdem, in welchem Gebiet und mit welchem Gesamtgewicht geflogen wird, entspricht die technische Zulassung des UAS Klasse 1 dann eher einer Modellbauzulassung (Kategorien A und B, wobei für B sogar explizit auf Bauvorschriften für Großmodelle zurückgegriffen wird), oder es findet eine strenge technische Überprüfung des Gerätes und all seiner ausfallgefährdeten Komponenten statt (Kategorie C und D). Auch die Auflagen für die PilotInnen sind entsprechend abgestuft.

Relevante Beilagen des LBTH 67 sind – neben dem Antragsformular und dem verpflichtenden Datenschild (Anlage D) für das Gerät – insbesondere die Betriebsvorschriften (Anlage E), Vorgaben zur Lärmzulässigkeit (Anlage N) sowie technische Bauvorschriften (für Kat. B ist dies Anlage B, für Kat. C und D ist dies Anlage C) und Vorgaben zur Analyse der Betriebssicherheit beim Ausfall kritischer Komponenten (Anlage F). Weiters wird im LBTH 67 noch auf zugehörige relevante Rechtsgrundlagen verwiesen, die vom

Betreiber einzuhalten sind, das sind neben dem LFG selbst insbesondere die LVR (Luftverkehrsregeln, eine Verordnung des BMVIT [35]).

Neben den luftfahrtrechtlichen Regularien sind natürlich auch noch andere Bestimmungen einzuhalten, insbesondere das Datenschutzgesetz und der allgemeine zivilrechtliche Schutz der Privatsphäre (insbesondere bei Kameraeinsätzen – siehe dazu auch § 24I LFG), Rechte der Grundstückseigentümer bei Start und Landung sowie auch versicherungsrechtliche Aspekte.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten Jahren haben sich die technologischen Entwicklungen im zivilen Bereich der UAV signifikant weiterentwickelt. Somit stehen UAV heutzutage als eine interessante Plattform zur Geodatenerfassung zur Verfügung. Die geeignete Auswahl der Flugplattform ist allerdings schwierig und muss je nach Anwendungsfall (Missionsprofil) erfolgen.

Abschließend soll nur kurz auf unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten überblicksmäßig eingegangen werden. Einige Artikel zu diesen Themen findet man in den bereits in der Einleitung erwähnten Konferenzen bzw. im vorliegenden VGI Heft. UAV können als spannende Plattform für die Nahbereichs-Aerophotogrammetrie angesehen werden. Dabei kann man die Anwendungen in 3 Gruppen unterteilen: (1) (näherungsweise) vertikale Luftbildmessung (2) (näherungsweise) horizontale Luftbilderfassung und (3) 3D Anwendungsfälle mit vertikalen und horizontalen Luftbildern. Diese Unterteilung ist für die Wahl der geeigneten Flugplattform und der Steuerung der Sensorausrichtung (z.B. Ausrichtung der Kamera) relevant.

In den Bereich der ersten Gruppe mit (näherungsweise) vertikaler Luftbilderfassung fallen Anwendungsfälle wie die Erfassung von Verkehrsunfallsituationen, lokale Geländemodellierung und Volumsdifferenzermittlung, sowie das multi-temporale Monitoring von z.B. einer archäologischen Ausgrabung. Auch für Anwendungen in der Geologie, der multi-temporalen Gletschererfassung und des Habitatmonitorings kann die UAV Datenerfassung hochauflösende Sensordaten bereitstellen. In der Schweiz wird darüber hinaus auch der Einsatz von UAS zur Katastervermessung untersucht. Je nach Anwendung können aktive oder passive Sensoren als am geeignetsten erscheinen. In den zweiten Bereich der (näherungsweise) horizontalen Luftbilderfassung fällt der Bereich des Monitorings von Infrastrukturobjekten (wie z.B. Windrä-

der und Staumauern), die Erfassung historischer Objekte (wie z.B. Fassaden und Gebäude) aber auch das Monitoring von vertikalen und horizontalen Luftbildern ist für die vollständige Erfassung von 3D Objekten im Innen- und Außenraum relevant.

Neben dem Einsatz von UAV zur Geodatenerfassung werden diese Plattformen bereits häufig für Film- und Videoproduktionen, in der Tourismusbranche für Landschaftspanoramen (z.B.: auch Kugelpanoramen), zu Dokumentationszwecken des Baufortschrittes oder auch in der Robotik eingesetzt. Weitere Anmerkungen zur praktischen Anwendung von UAV Systemen können dem Artikel Briese und Otepka, 2013 [36] entnommen werden.

Zur laufenden Entwicklung der Rechtslage ist zusammenfassend festzustellen, dass es mit der LFG-Novelle und dem LBTH 67 zwar ab 1. Jänner 2014 erstmals grundlegende Regularien für den Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge der Klasse 1 (direkte Sichtverbindung, VLOS) in Österreich gibt, und viele Unklarheiten der letzten Jahre beseitigt wurden. Zugleich sind aber folgende Herausforderungen bei der kombinierten Zulassung der Geräte (technische Lufttüchtigkeitszulassung) und des konkreten Einsatzes (Betriebszulassung) zu erwarten:

- Sowohl die zuständigen Behörden (BMVIT und ACG) als auch die Industrie, die Entwickler und die Betreiber betreten ab 1. Jänner 2014 erstmal regulatorisches Neuland in Österreich. Dabei sind wohl Anlaufschwierigkeiten zu erwarten, bis sich dieses neue Regelungssystem eingespielt hat oder gar nochmals überarbeitet wird.
- Möglicherweise wird auch dem Aeroclub – respektive seinen Sachverständigen – eine unterstützende Rolle bei der Zulassung von gewerblichen UAS (etwa der Kategorie A und B) zukommen, auch dort wird sich diese neue Aufgabe erst einspielen müssen.
- Besonders relevant für den einzelnen Antragsteller wird daher die Frage sein, ob die ACG die nötigen Ressourcen zum Abarbeiten hunderter oder gar tausender Einzelanträge hat, und wie umgekehrt die Verfolgung „illegaler“ Flüge (durch die Bezirksverwaltungsbehörden) aussieht.
- Zugleich sind die Fragen für UAS der Klasse 2 – ohne direkte Sichtverbindung (BLOS) – noch sehr offen.

■ Der Einsatz von FPV ist außerdem derzeit explizit nicht unter Klasse 1 geregelt (vgl. LFG-Definition „Sichtverbindung ohne technisches Hilfsmittel“), die diesbezüglich unterschiedlichen Rechtsmeinungen bedürfen daher noch weiterer Klarstellungen durch BMVIT und ACG sowie allfällig erleichterter Sonderregeln zum FPV-Einsatz als UAS der Klasse 2.

Für den praktischen Einsatz von UAV ist daher eine frühzeitige Information über den aktuellen Stand der Regularien für Zulassung und Betrieb empfohlen, ebenso wie der Austausch mit der österreichweiten Community (etwa via AAI oder Aeroclub) zum praktischen Ablauf im Umgang mit der Behörde.

Die aktuell verfügbaren UAS haben mit ihren Flugassistenzsystemen bereits einen beachtlichen Grad an Zuverlässigkeit erreicht, werden aber sicherlich in den nächsten Jahren stark weiterentwickelt werden. Dabei werden v.a. redundante Sensoren, höher genaue GNSS Systeme in Kombination mit verbesserten Algorithmen zur Echtzeitnavigation und zur Trajektorienbestimmung im Postprocessing zum Einsatz kommen. Durch die technischen Entwicklungen die heutzutage eine systematische Geodaten-erfassung ermöglichen und die nun fortschreitende rechtliche Regulierung haben UAV in den nächsten Jahren nun tatsächlich die Möglichkeit die Datenerfassungslücke zwischen der terrestrischen Vermessung und der manntragenden luftgestützten Datenerfassung zu schließen.

Danksagung

Das Ludwig Boltzmann Institut für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie (archpro.lbg.ac.at) basiert auf der internationalen Kooperation der Ludwig Boltzmann Gesellschaft (A), der Universität Wien (A), der Technischen Universität Wien (A), der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (A), dem Land Niederösterreich (A), Airborne Technologies GmbH (A), RGZM-Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz (D), RAÄ-Swedish National Heritage Board (S), IBM VISTA Universität Birmingham (GB) und NIKU-Norwegian Institute for Cultural Heritage Research (N).

Widmung

Wir widmen diesen Beitrag unserem lieben Kollegen DI Bruno Wiesler. Als Leiter des Studienganges Luftfahrt/Aviation an der Fachhochschule Joanneum in Graz hat er in den letzten Jahren ganz besonders zur Forschung und Vernetzung im Bereich der zivilen UAS-Nutzung in Österreich beigetragen, die Entwicklung nationaler Regularien sowie nationale wie auch internationale Kooperationen maßgeblich vorangetrieben. Bruno Wiesler ist im Dezember 2013 völlig unerwartet durch einen Schlaganfall aus dem Leben gerissen worden.

Referenzen

- [1] *Luftfahrtarchiv*, <http://www.luftfahrtarchiv.eu>, 2.10.2013.
- [2] *Wikipedia*, *Luftbild*, <http://de.wikipedia.org/wiki/Luftbild>, 2.10.2013.
- [3] *Wikipedia*, *IgoEtrich*, http://de.wikipedia.org/wiki/Igo_Etrich, 2.10.2013.
- [4] *Lubowski, G., Waldhäusl, P., Ballonphotogrammetrie. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie*, 68. Jahrgang, Heft 1, 1980 S.30-39.
- [5] *Heckes, J., 1984: Überblick über Flugsysteme für photogrammetrische Luftaufnahmen im Nahbereich*, Volume XXV Part A5, 1984, XVth ISPRS Congress, Technical Commission V: OTHER APPLICATIONS OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 17-29 June 1984, Rio de Janeiro, Brasil, 392-401.
- [6] *EGU 2014 Session: „Unmanned aerial vehicles for high resolution sensing in the geosciences“*, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/session/15488>, 2.10.2013.
- [7] *MULTIPLEX Modellsport GmbH & Co.KG*, <http://www.multiplex-rc.de>, → Produkte, Zubehör, Fernsteuerungen, Sensorik, 2.10.2013.
- [8] *DIY Drones, Community for amateur Unmanned Aerial Vehicles*, <http://diydrones.com/>, 2.10.2013.
- [9] *Sky Circuits Ltd*, <http://www.skycircuits.com>, 19.12.2013.
- [10] *Glira, P., Briese, C., Pfeifer, N., 2013: Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren*, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 2013.
- [11] *Integration eines Riegl Scanners in einen Schiebel Helikopter*, <http://riegl.com/media-events/single-news/article/iriegli-vq-820-gu-successfully-integrated-in-schiebel-camcopter-s-100>, 2.10.2013.
- [12] *Aeroscout Laser Integration*, <http://www.aeroscout.ch/index.php/consulting>, 2.10.2013.
- [13] *Scan-copter*, <http://scan-copter.com>, 8.11.2013.
- [14] *UAV-g Konferenz 2013*, http://www.uav-g.org/presentations_online.htm, 8.11.2013.
- [15] *Kienmayer, C. und Flühr, H., 2013: Definition der Luftschnittstelle für RPAS nach LFG2013 in Österreich*, ein Dokument das im Rahmen der AAI-UAS-WG vorgelegt wurde und auch bei der Austrian Aeronautics Industries Group (AAI), <https://www.aag.at> erhältlich ist.
- [16] *Aeroclub*, <http://aeroclub.at>, 19.12.2013.
- [17] *RCGroups*, www.rcgroups.com, 19.12.2013.
- [18] *FPV-Community Deutschland*, www.fpv-community.de, 19.12.2013.
- [19] *UVS International*, <http://www.uvs-international.org>, 19.12.2013.
- [20] *UAV DACH*, <http://www.uavdach.org>, 19.12.2013.
- [21] *Arbeitsgruppe UAS der Austrian Aeronautics Industries Group (AAI)*, <https://www.aag.at/uas>, 19.12.2013.
- [22] *BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Infrastruktur und Technologie), Gruppe Luft bzw. OZB (Oberste Zivilluftfahrtbehörde)*, <http://www.bmvit.gv.at/verkehr/luftfahrt/index.html>, 19.12.2013.

- [23] *Austro Control Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt mbH*, <http://www.austrocontrol.at>, 19.12.2013.
- [24] *International Civil Aviation Organization*, www.icao.int, 19.12.2013.
- [25] *Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems (JARUS)*, www.jarus-rpas.org, 19.12.2013.
- [26] *EU-Kommission – DG ENTR*, http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/aerospace/uas/index_en.htm, 19.12.2013.
- [27] *EASA*, <http://www.easa.europa.eu/regulations/regulations-structure.php>, 19.12.2013.
- [28] *EASA, NPA 2012-10*, <http://www.easa.europa.eu/rulemaking/docs/npa/2012/NPA%202012-10.pdf>, 19.12.2013.
- [29] *EASA, CRD 2012-10*, <http://www.easa.europa.eu/rulemaking/docs/crd/2012/CRD%202012-10.pdf>, 19.12.2013.
- [30] *Fortner, R. (AAI), 2013, Drohnen in Österreich – Recht trifft Forschung und Technik, HVR Seminar: „Drohnen im Anflug auf Österreich“*, 6. Dezember 2013, <http://www.rotekreuz.at/site/hvr-kommission/hvr-seminare/2013-drohnen-im-anflug-auf-oesterreich/>, 28.12.2013.
- [31] *Beschluss zur Änderung des Luftfahrtgesetzes im Nationalrat*, http://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXIV/I/I_02299/index.shtml, 8.11.2013.
- [32] *Bundesgesetz: Änderung des Luftfahrtgesetzes*, Bundesgesetzblatt I Nr. 108/2013, http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2013_I_108/BGBLA_2013_I_108.pdf, 8.11.2013.
- [33] *Änderung der Zivilluftfahrzeug- und Luftfahrtgerät-Verordnung 2010*, Bundesgesetzblatt II Nr. 470/2013, http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2013_II_470/BGBLA_2013_II_470.pdf, 19.12.2013.
- [34] *Austro Control GmbH, 2013, Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67*, http://www.austrocontrol.at/luftfahrtbehoerde/lizenzen_bewilligungen/flugbewilligungen/unbemannte_lfz, 19.12.2013.
- [35] *Luftverkehrsregeln 2010*: Bundesgesetzblatt II Nr. 80/2010, <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20006720>, 19.12.2013.
- [36] *Briese, C., Otepka, G., Zum Einsatz von Multikoptern als Kameraplattform in der Nahbereichs-Luftbildmessung*, Zeitschrift SACHVERSTÄNDIGE (SV) 2013/4.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Briese, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie E120.7, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien.

Ludwig Boltzmann Institut für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie, Hohe Warte 38, 1190 Wien.
E-Mail: christian.briese@geo.tuwien.ac.at

Mag. Raoul Fortner, Austrian Aeronautics Industries Group (AAI), Kramergasse 1/3, A-1010 Wien.
E-Mail: r.fortner@aai.gv.at

Ing. Philip Sager, Österreichischer Aeroclub (ÖAeC), Sektion Modellflug, Fachreferent FPV, Prinz-Eugenstraße 12, 1040 Wien.
E-Mail: philip_sager@hotmail.com

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Pfeifer, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie E120.7, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien.
E-Mail: norbert.pfeifer@geo.tuwien.ac.at

Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren



Philipp Glira, Christian Briese, Norbert Pfeifer, Wien

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Unbemannte Luftfahrzeuge können mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Bordsensoren ausgestattet werden. Dazu zählen typischerweise ein GNSS-Empfänger, eine inertielle Messeinheit, ein Magnetometer und ein Luftdrucksensor. Diese Sensoren dienen dazu, den Piloten bei seiner Flugmission zu unterstützen und ermöglichen die Durchführung von autonomen Flügen. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass diese Sensoren außerdem dazu verwendet werden können, um Bilder einer Kamera direkt zu georeferenzieren. Darunter versteht man die direkte Bestimmung (d.h. ohne Nutzung des Bildinhaltes) der Position (drei Koordinaten) und der Orientierung (drei Drehwinkel) der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt der Bilder. Die Einführung dieser Beobachtungen in die Bündelblockausgleichung (integrierte Sensororientierung) vermeidet weitgehend Deformationen des Bildblockes, wie sie bei der Nutzung von nur wenigen Passpunkten auftreten können.

Als Flugplattform wurde ein Multikopter, basierend auf der *MikroKopter*-Plattform, eingesetzt. Die Flugplattform ist als offenes System konzipiert und erlaubt somit Modifikationen, welche die Aufzeichnung der Sensorrohdaten und deren Synchronisation mit der Kamera möglich machten.

Normalerweise werden für die direkte Georeferenzierung von Luftbildern nur der GNSS-Empfänger und die Sensoren der inertialen Messeinheit verwendet. Die in unbemannten Luftfahrzeugen typischerweise dafür eingesetzten MEMS-Sensoren zeichnen sich zwar durch ein geringes Gewicht aus, liefern aber nur eine geringe Messgenauigkeit. Daher ist die Erweiterung von GNSS und inertialer Messeinheit mit einem Magnetometer und einem Luftdrucksensor notwendig. Durch die Integration aller Sensoren zu einem Gesamtsystem kann damit die Genauigkeit der Positions- und Orientierungsbestimmung entscheidend verbessert werden.

Die Evaluierung der vorgeschlagenen Methode zeigt, dass die Position der Bilder mit einer Präzision von ca. 0.5 m (Lage) bzw. 1.0 m (Höhe) bestimmt werden kann. Die Orientierungswinkel können mit einer Präzision von ca. 1° (Roll und Nick) und 2° (Gier) bestimmt werden. Es kamen dazu ausschließlich die zur Flugsteuerung bereits vorhandenen Bordsensoren zum Einsatz.

Schlüsselwörter: Unbemannte Luftfahrzeuge, direkte Georeferenzierung, Orientierung, GNSS, IMU

Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAV) can be equipped with a large variety of different on-board sensors. The typical UAV setup consists of a GNSS antenna with a receiver, an inertial measurement unit (IMU), a magnetometer and an air pressure sensor. These sensors allow to assist the pilot on the ground and to carry out autonomous flights. This article demonstrates that these sensors can be additionally used to directly georeference the imagery taken from the UAV platform. This results in the estimation of the position (three coordinates) and orientation (three rotation angles) of the images without the usage of the image content. The integration of these observations into a bundle block adjustment (integrated sensor orientation) avoids a deformation of the image block, as it can occur if only few control points were used.

Within the practical examples, a multi-rotor system based on the *MikroKopter* platform was utilized. The open source character of the project allowed some minor code modification that allowed recording the raw sensor data and made the synchronisation with the camera trigger signal possible.

The direct georeferencing of aerial images is typically just based on GNSS and IMU observations. Due to the low measurement quality of the utilized MEMS sensors, the additional usage of a magnetometer and an air pressure sensor is essential to support the GNSS and IMU observations. By the integration of the observations of all sensors a significant increase of accuracy and reliability of the determined positions and orientations can be achieved.

The evaluation of the proposed method shows that the estimated position of the image can be determined with a precession of approx. 0.5 m (planar) and 1 m (height). The rotation angles can be determined with a precision of approx. 1° (roll and nick) and 2° (yaw). The direct georeferencing of the images of this practical test is just based on the sensor equipment that is already available on-board of the *MikroKopter* platform.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, direct georeferencing, orientation, GNSS, IMU

1. Einleitung

Unbemannte Luftfahrzeuge (*unmanned aerial vehicles – UAV*) stellen für die Aufnahme von kleinräumigen Gebieten eine kostengünstige Alternative zur klassischen bemannten Luftbild-photogrammetrie dar.

Der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen als Kameraträger für Luftaufnahmen im Nahbereich, begann bereits Ende der 70er-Jahre (Przybilla und Wester-Ebbinghaus, 1979) (Heckes, 1984). Dem routinemäßigen Einsatz standen damals noch Navigationsprobleme entgegen, die eine lückenlose Erfassung des aufzunehmenden Gebietes erschwerten. Zur Lösung dieses Problems, schlug Heckes damals vor: „Abhilfe würden im Flugkörper eingebaute elektronische Systeme bringen, die dem Piloten Informationen über die Position des Kameraträgers übermitteln (...)“. Diese Vision konnte dank der seitdem stattgefundenen Entwicklungen realisiert werden, wovon in diesem Kontext als am Wichtigsten zu nennen sind:

- (a) die Miniaturisierung von Sensoren,
- (b) der Aufbau von globalen Navigationssystemen,
- (c) die Entwicklung digitaler Kameras.

Die damals festgehaltene Navigationsproblematik konnte durch die Entwicklungen (a) und (b) gelöst werden. In Verbindung mit Entwicklung (c) genügen unbemannte Luftfahrzeuge heutzutage nahezu allen photogrammetrischen Anforderungen, sodass deren Einsatz in den letzten Jahren einen starken Aufschwung erlebt.

Das gegenwärtige Spektrum an potentiellen Aufnahmeplattformen ist sehr breit. Die verfügbaren Systeme unterscheiden sich stark in Bezug auf die mögliche Nutzlast, die max. Flugdauer, die max. und min. Flughöhe, die max. Reichweite, die Manövrierfähigkeit, die Fluggeschwindigkeit, den Start- und Landemodus, den automatisierten Flugmodus, die Transportfähigkeit, dem Windverhalten, den Vibrationen und natürlich die Kosten (UVS-International, 2013) (Eisenbeiss, 2009). Für photogrammetrische Aufnahmen werden überwiegend zwei Plattformarten eingesetzt: Flächenflieger und Multikopter. Flächenflieger fliegen verhältnismäßig schnell und hoch, womit sie sich für die Aufnahme großräumiger Gebiete (einige 100 m) sehr gut eignen. Dem gegenübergestellt fliegen Multikopter verhältnismäßig langsam und niedrig, sind sehr wendig und ermöglichen es typischerweise die Kamera an einer beliebigen Position in beliebige Richtungen zu schwenken. Damit ist nicht nur eine präzi-

sere Aufnahme kleinräumiger Gebiete möglich, sondern auch die von stark dreidimensionalen Objekten, wie etwa Gebäuden.

Von wichtigem Nutzen für die Photogrammetrie, ist die oft bereits vorhandene Ausstattung von unbemannten Luftfahrzeugen mit diversen Bordsensoren. Da die meisten unbemannten Luftfahrzeuge nur eine geringe Nutzlast erlauben, sind diese vorwiegend in MEMS-Technologie gefertigt (Micro-Electro-Mechanical Systems). Im Vergleich zu Sensoren bemannter Aufnahmeplattformen, verfügen sie daher nur über eine geringe Messgenauigkeit. In ihrer Minimalkonfiguration besteht die Bordsensorik typischerweise aus einem GNSS-Empfänger, einer inertialen Messeinheit (*Inertial Measurement Unit – IMU*), ein Magnetometer und einem Luftdrucksensor. Diese Sensoren schaffen die Voraussetzung zur Durchführung automatischer Flüge. Bei diesen werden im Zuge einer Flugplanung Wegpunkte definiert, die während der Bilderfassung sequentiell angeflogen werden. Bei Erreichen eines Wegpunktes ist die gezielte Auslösung der Kamera möglich, womit eine lückenlose Erfassung des aufzunehmenden Objekts gewährleistet werden kann. Ergänzende Aufnahmen zwischen diesen Punkten können zu einer weiteren Vervollständigung der Datenerfassung genutzt werden.

Die bereits vorhandene Bordsensorik kann aber auch dazu verwendet werden, die aufgenommenen Bilder direkt zu georeferenzieren. Darunter versteht man die direkte Bestimmung (d.h. ohne Nutzung des Bildinhaltes) von Position (Koordinaten X, Y und Z) und Orientierung (Drehwinkel Roll, Nick und Gier) der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt der Bilder unter ausschließlicher Nutzung von Sensoren an Bord der Aufnahmeplattform.

Die bestimmten Positionen und Orientierungen der Bilder werden in die Bündelblockausgleichung auf zwei Arten eingeführt:

1. als Näherungen für die Parameter
2. als beobachtete Parameter unter Berücksichtigung ihrer Genauigkeit (integrierte Sensororientierung) (Kraus, 1996)

Trotz der moderaten Genauigkeit, mit der die Positionen und die Orientierungen bestimmt werden können, ist der zweite Punkt für die Bündelblockausgleichung von essentieller Bedeutung: Die Berücksichtigung als beobachtete Parameter, führt zu einer Stabilisierung des gesamten Bildblockes. Damit können Deformationen, wie sie in SfM-Ansätzen (*Structure from*

Motion) unter Nutzung nur weniger Passpunkte auftreten (Kraus, 2004), weitgehend vermieden werden. Ausdrücklich soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass das Ziel dieses Beitrages daher nicht die direkte Bestimmung von Objektpunkten (über Vorwärtsschnitt) ist, sondern die Beschaffung von Beobachtungen für die Bündelblockausgleichung, um eben derartigen Deformationen entgegenwirken zu können.

Der vorliegende Artikel versucht v.a. auf die folgenden beiden Fragen näher einzugehen:

1. Wie können die Bordsensoren zur direkten Georeferenzierung von Bildern genutzt werden?
2. Wie genau sind die damit geschätzten Positionen und Orientierungen der Bilder?

Im folgenden Abschnitt 1.1 werden verwandte Arbeiten zum Thema der Georeferenzierung von Bilddaten mit unbemannten Luftfahrzeugen vorgestellt.

Kap. 2 liefert einen Überblick zum eingesetzten Fluggerät. Darin werden die zur Verfügung stehenden Bordsensoren, sowie die eingesetzte Kamera und deren Kalibrierung beschrieben.

Kap. 3 beschreibt das Verfahren der direkten Georeferenzierung und die dazu eingesetzte Methode, bei der es sich um eine modifizierte Version der Strapdown-Rechnung handelt.

Kap. 4 enthält die Evaluierung der vorgestellten Methode. Diese erfolgt durch Vergleich der direkten Georeferenzierung mit der über Passpunkten durchgeführten indirekten Georeferenzierung der Bilder.

Kap. 5 liefert eine Zusammenfassung des Beitrags.

1.1 Forschungsstand

In ähnlichen Untersuchungen mit unbemannten Luftfahrzeugen, wurde bisher nur die Position mit Hilfe von Bordsensoren bestimmt, jedoch nicht die Orientierung der Aufnahmeplattform.

In H. Eisenbeiss u. Kolb (2009) wurde zur Ermittlung der Positionierungsgenauigkeit ein Rundprisma an einem unbemannten Helikopter (*SurveyCopter 1B*) montiert. Während des Fluges wurde dessen Position von einem zielverfolgenden Tachymeter (für eine unabhängige Trajektorienbestimmung) bestimmt. Die Positionsbestimmung mit Bordsensoren erfolgte durch die Integration von GNSS und inertialer Messeinheit in einem Kalman-Filter. Die aus dem Trajektorienvergleich ermittelten Präzisionen der

Positionskoordinaten sind 0.70 m für x, 0.40 m für y und 0.20 m für z. Der im Verhältnis größere Fehler in x-Richtung, wurde einem Synchronisationsfehler zugeschrieben. Die systematischen Fehler betragen bis zu 2 m.

In Bláha u. a. (2011) wurde für die Ermittlung der Referenztrajektorie ebenfalls ein Tachymeter eingesetzt. Für den Vergleich wurden die GNSS-Messungen im *post processing* mittels differentiellem GNSS ausgewertet. Dadurch konnte die Trajektorie mit einer Präzision von 0.35 m, 0.28 m und 0.38 m in x, y und z bestimmt werden. Die systematischen Fehler betragen für alle drei Koordinatenrichtungen etwa 0.40 m. Auch in dieser Studie wurde ein Multikopter eingesetzt (*AscTec Falcon 8*).

In Haala u. a. (2011) wurde ebenfalls nur die Position der Bilder mit Hilfe des GNSS-Empfängers bestimmt. Wie im vorliegenden Bericht werden die Präzisionen der Positionskoordinaten durch Gegenüberstellung mit einer Bündelblockausgleichung bestimmt; diese betragen 3.11 m für x/y, und 3.24 m für z. Ein Grund für die im Vergleich zu den obigen Untersuchungen schlechtere Präzision der Positionsbestimmung, könnte der Einsatz eines (im Vergleich zu Helikoptern bzw. Multikoptern) schnellen Flächenfliegers sein.

In Cramer u. a. (2013) wurden die GNSS-Rohdaten im *post processing* mittels differentiellem GNSS ausgewertet. Als GNSS-Empfänger kam dabei ein *u-blox LEA-6t* Modul zum Einsatz. Auch hier wurden die Positionskoordinaten mit den Werten der Bündelblockausgleichung verglichen. Dabei konnte eine Präzision der Positionskoordinaten von etwa 0.50 m in allen drei Koordinatenrichtungen festgestellt werden. Die systematischen Fehler betragen bis zu 6 m und waren stark flugstreifenabhängig; der Grund hierfür konnte nicht eindeutig festgestellt werden.

2. Das Fluggerät

2.1 Allgemeines

Die vorliegende Untersuchung wurden mit einem kostengünstigen unbemannten Helikopter, dem *MikroKopter*, durchgeführt (Abb. 1) (Busker u. Buss, 2013) (Briese u. Glira, 2011). Aufgrund seines Konstruktionsprinzips lässt sich der *MikroKopter* den sogenannten Multikoptern zuordnen. Diese zeichnen sich durch eine Anordnung von mehreren Rotoren in einer Horizontalebene aus. Die senkrecht nach unten wirkenden Rotoren erzeugen einen Auftrieb, der es erlaubt das Fluggerät senkrecht zu starten und zu landen. Während des Fluges wird die Rotorebene mit

Hilfe der Bordsensorik kontinuierlich horizontalisiert, womit das Fluggerät – Windstille vorausgesetzt – seine Lage beibehält. Um Vortrieb zu erzeugen wird die Rotorebene geneigt. Derartig konstruierte Fluggeräte sind, im Vergleich zu üblichen Helikoptern, für den Laien leichter manövrierbar und weisen eine geringere Absturzgefahr auf. Diese lässt sich noch weiter reduzieren, indem redundante Rotoren eingesetzt werden, z.B. statt nur vier Rotoren (Quadrokopter), sechs (Hexakopter) oder acht Rotoren (Oktokopter). Auch beim Ausfall eines Rotors ist somit noch eine sichere Landung des Fluggerätes möglich.

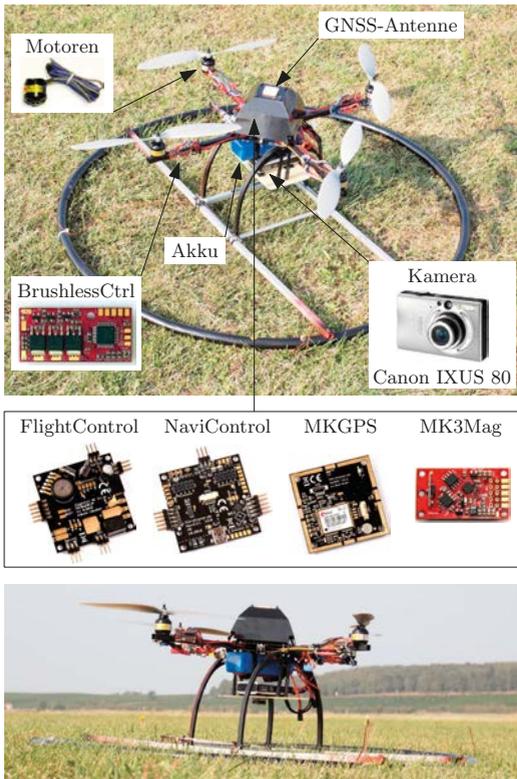


Abb. 1: Der MikroKopter mit Kennzeichnung seiner wichtigsten Komponenten. In mittleren Teil sind die vier Platinen dargestellt, deren Sensoren für die direkte Georeferenzierung der Bilder verwendet wurden.

Der MikroKopter ist eines von mehreren am Markt erhältlichen Open-Source-Flugsystemen. *Open Source* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der zur Steuerung eingesetzte Quelltext (zumindest teilweise) offen ist, womit für diese Systeme die Erstellung von unzähligen software- und hardwareseitigen Erweiterungen möglich wird. Eine Vergleichstabelle der derzeit am Markt erhältlichen Open-Source-Flugsysteme findet man unter www.multikopter.org.

2.2 Die Sensoren

Der MikroKopter verfügt auf insgesamt vier Platinen (Abb. 1) über eine Vielzahl an bordseitigen Sensoren. Für die direkte Georeferenzierung von Bildern können davon genutzt werden:

- (1) ein GNSS-Empfänger (*u-blox LEA-6s*)
- (2) eine inertielle Messeinheit bestehend aus:
 - 3 Beschleunigungssensoren (*STMicroelectronics LIS344ALH*)
 - 3 Drehratensensoren (*Analog Devices ADXR5610*)
- (3) ein Magnetometer (*Philips KMZ51*)
- (4) ein Luftdrucksensor (*Freescale MPX 4115A*)

Üblicherweise werden in der Photogrammetrie zum Zwecke der direkten Georeferenzierung nur der GNSS-Empfänger und die Sensoren der inertialen Messeinheit verwendet. Handelt es sich aber, wie in diesem Fall, um sehr kostengünstige Sensoren, wird die Erweiterung mit ein Magnetometer und einem Luftdrucksensor notwendig. Bei Integration aller Sensoren zu einem Gesamtsystem, kann damit die Genauigkeit der Positions- und Orientierungsbestimmung entscheidend verbessert werden.

Beim DGPS-Empfänger (1) wird die Positionierungsgenauigkeit durch den Empfang von EGNOS-Korrekturdaten auf 1 bis 3m erhöht.

Die inertielle Messeinheit (2) setzt sich aus jeweils drei orthogonal zueinander angeordneten Drehratensensoren und Beschleunigungssensoren zusammen. Diese werden in Multikoptern ausschließlich zur Orientierungsbestimmung der Flugplattform eingesetzt. Für eine Anwendung der Trägheitsnavigation, zur Bestimmung von Positionsänderungen zwischen den GNSS-Realisierungen, liefern diese Sensoren eine zu geringe Genauigkeit (Kap. 3.2.1).

Die Orientierungsbestimmung kann durch die Kopplung mit ein Magnetometer (3) verbessert werden. Das Magnetometer misst die magnetische Flussdichte des Erdmagnetfeldes entlang dreier Koordinatenachsen, woraus das magnetische Azimut abgeleitet werden kann. Mit der über GNSS bestimmten Position kann dieses in ein geodätisches Azimut überführt werden.

Die Höhenkomponente der mit GNSS bestimmten Position kann durch die Kopplung mit einem Luftdrucksensor (4) verbessert werden. Aus den gemessenen Luftdruckänderungen kann über die barometrische Höhenformel eine Änderung der Flughöhe bestimmt werden.

Das Aufzeichnen der originären Messwerte (Rohdaten) der Sensoren ist in der ausgelieferten Version des *MikroKopters* nicht vorgesehen. Aufgrund des Open-Source-Charakters des Projekts konnten jedoch Modifikationen am Quelltext vorgenommen werden, durch die eine Aufzeichnung der Rohdaten für die Sensoren (2), (3) und (4) mit einer Messfrequenz von 20 Hz möglich wurde. Für den GNSS-Empfänger (1) ist dies nicht gelungen, womit auch keine Basislinienauswertung im post processing möglich war. Stattdessen musste auf die bereits vorhandene Ausgabe der Positionen in einer Messfrequenz von 2 Hz zurückgegriffen werden.

Bei den hier beschriebenen Sensoren handelt es sich um sogenannte MEMS (El-Sheimy, 2009). In Relation zu Makrosensoren, weisen Sensoren in MEMS-Bauweise ein geringes Signal/Rausch-Verhältnis auf; zudem unterliegt der Nullpunkt der Messwertausgabe in der Regel einer starken Drift. In Summe führt das zu einer vergleichsweise geringen Messgenauigkeit.

2.3 Die Kamera

Aufgrund ihres geringen Gewichts, wurde als bildgebender Sensor die Kompaktkamera *Canon IXUS 80* gewählt. Diese verfügt u.a. über einen CCD-Sensor mit 8 Megapixel und ein 3-faches optisches Zoomobjektiv mit Bildstabilisator. In Hinblick auf einen photogrammetrischen Flugeinsatz, ist vor allem die Kompatibilität der Kamera zum *Canon Hack Development Kit*¹⁾ wichtig. Dieses erweitert die Firmware der Kamera mit unzähligen Funktionen, von denen die Folgenden am wichtigsten sind:

- Speicherung des Bildsensorinhaltes im RAW-Dateiformat.
- Manuell einstellbare Belichtungszeit, Blendenwert, Fokusdistanz und ISO-Wert.
- Fernauslösung der Kamera über den Sender des Flugmodells oder andere Quellen.
- Wiederholte Kameraauslösung mit definierbarem Zeitintervall.

Die in diesem Experiment eingesetzte Kamerahalterung ist fest mit dem Rahmen der Flugplattform verbunden und erlaubt nur Aufnahmen in Nadir-Richtung, d.h. die Kamera kann nicht unabhängig von der Plattformorientierung geneigt werden. Die zu bestimmenden Verdrehungen (*misalignment*) zwischen der Kamera und der inertialen Messeinheit sind somit zeitlich konstant. Um die Schärfe der Bilder zu erhöhen, wurden die Verbindungen zwischen Kamerahalterung

und Flugkörper vibrationsgedämpft ausgeführt. Das Objektiv der Kamera wurde direkt unter dem GNSS-Modul platziert, sodass beim *lever-arm* der *boresight alignment* (Kap. 3) nur die Höhendifferenz zum Phasenzentrum der Antenne berücksichtigt werden muss.

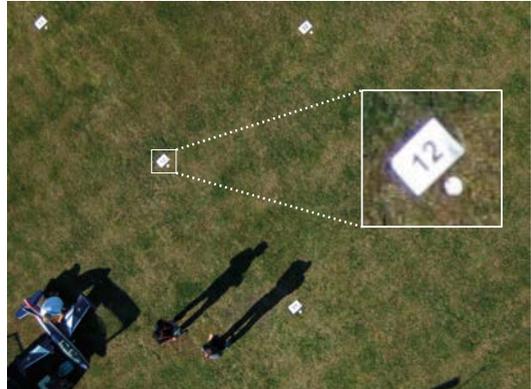


Abb. 2: Beispiel eines aufgenommenen Bildes bei einer Flughöhe von etwa 25 m. Die Belichtungszeit beträgt $1/1000$ s. Die Vergrößerung zeigt einen für die Evaluierung vermarkten Passpunkt.

Die Auslösung der Kamera erfolgt über ein mit dem *MikroKopter* verbundenes Kabel. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Quelltextmodifikationen am *MikroKopter*, ermöglichen die Festlegung eines beliebigen Aufnahmeintervalls, sowie die für die Synchronisation mit den Sensordaten notwendige Registrierung der Aufnahmezeitpunkte der Bilder. In Abb. 2 ist ein Beispielbild dargestellt.

2.3.1 Kamerakalibrierung

Die Kamera wurde mit Hilfe eines 3D-Testfeldes kalibriert. Dieses besteht aus 60 retroreflektierenden Passpunkten, deren Position mit einer Genauigkeit von 1 mm bekannt ist. Insgesamt wurden 36 Aufnahmen dieses Testfeldes gemacht. Die Bestimmung der Kalibrierungsparameter (Elemente der inneren Orientierung und Verzeichnungsparameter) erfolgte im Zuge einer Bündelblockausgleichung. Hierzu wurden in der Ausgleichung die zu bestimmenden Kalibrierungsparameter als freie Parameter behandelt. Die gemessenen Bildpunkte liefern die, für die Parameterbestimmung notwendigen, Beobachtungen.

In früheren Arbeiten (Kienast, 2006) wurde eine Instabilität der Kalibrierungsparameter in Abhängigkeit der Wirkungsrichtung der Gravitationskraft festgestellt. Daher wurde auch dieser Aspekt untersucht. Dazu wurde die Kamera, zwischen jeweils zwei Aufnahmen des Testfeldes, in

1) <http://chdk.wikia.com>

90°-Schritten um die horizontale Aufnahmeachse gedreht. Insgesamt wurden so, in jeder Winkelstellung (0°, 90°, 180°, 270°), neun Aufnahmen gemacht.

Die für die Kamerakonstante c und den Bildhauptpunktskoordinaten x_0 und y_0 ermittelten Werte sind in Tab. 1 dargestellt. Eine signifikante Abhängigkeit der geschätzten Parameter von der Wirkungsrichtung der Gravitationskraft konnte nicht festgestellt werden.

	Wert	σ
x_0 [px]	1284.58	0.79
y_0 [px]	-941.22	0.64
c [px]	2786.03	1.60

Tab. 1: Ergebnisse der Kamerakalibrierung. Der Bildhauptpunkt H ist durch seine Koordinaten x_0 und y_0 beschrieben (siehe auch Abb. 4). Die Kamerakonstante c beschreibt den senkrechten Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene.

Die Residuen der Bildkoordinaten haben eine Standardabweichung von 0.2 px. Der ebenfalls bestimmte Effekt der radialen und tangentialen Verzerrung ist in Abb. 3 dargestellt.

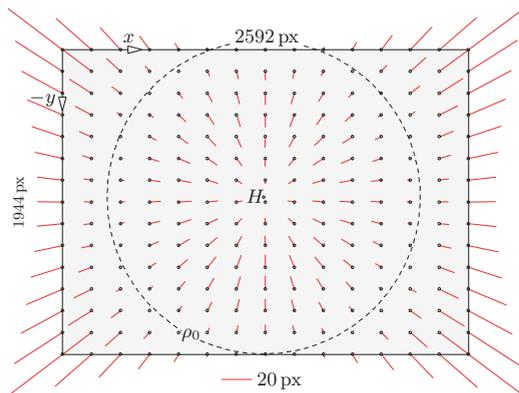


Abb. 3: Wirkungsfigur der radialen und tangentialen Verzerrung für die eingesetzte Kamera Canon IXUS 80 in 10-facher Skalierung (H ...Bildhauptpunkt, Normalisierungsradius $\rho_0 = 1000$ px)

3. Direkte Georeferenzierung

3.1 Allgemeines

Als direkte Georeferenzierung bezeichnet man die direkte Messung von Position und Orientierung (Elemente der äußeren Orientierung) der Kamera unter ausschließlicher Nutzung von Bordsensoren der Aufnahmeplattform.

Die Position bezieht sich auf das Projektionszentrum der Kamera und wird, als Koordinaten-triplet (X_0^n, Y_0^n, Z_0^n) , in einem übergeordneten Koordinatensystem, dem Navigationskoordinatensystem (Hochindex n), angegeben (Abb. 4). Die Orientierung beschreibt die Verdrehung der Kamera bezüglich des Navigationskoordinatensystems und kann in Form dreier eulerscher Winkel angegeben werden. In der Navigation verwendet man dazu üblicherweise die Winkel Roll, Nick und Gier (r_0^n, n_0^n, g_0^n) (engl. roll, pitch, yaw). Der zeitliche Bezug von Position und Orientierung ist der Belichtungszeitpunkt der Bilder.

natensystem (Hochindex n), angegeben (Abb. 4). Die Orientierung beschreibt die Verdrehung der Kamera bezüglich des Navigationskoordinatensystems und kann in Form dreier eulerscher Winkel angegeben werden. In der Navigation verwendet man dazu üblicherweise die Winkel Roll, Nick und Gier (r_0^n, n_0^n, g_0^n) (engl. roll, pitch, yaw). Der zeitliche Bezug von Position und Orientierung ist der Belichtungszeitpunkt der Bilder.

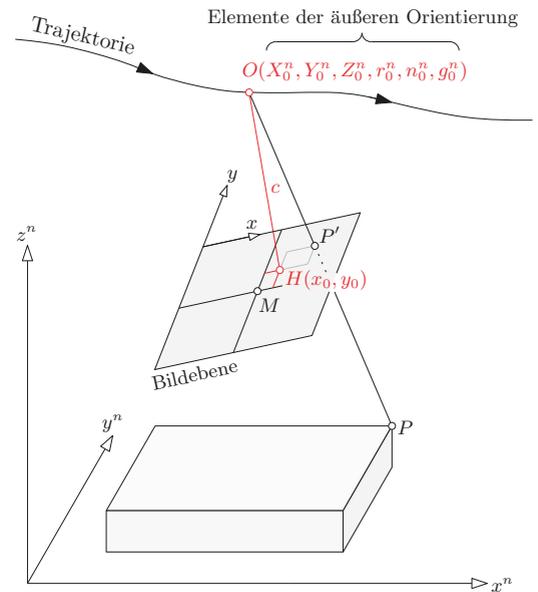


Abb. 4: Bei der direkten Georeferenzierung werden die Elemente der äußeren Orientierung mit Sensoren an Bord der Flugplattform bestimmt. Diese beschreiben Position und Orientierung der Kamera zum Zeitpunkt der Bildaufnahme.

Gemeinsam mit den Elementen der inneren Orientierung (c, x_0, y_0) kann damit, über die Kollinearitätsgleichungen, der photogrammetrische Abbildungsprozess von Objektpunkten P in die Bildebene P' beschrieben werden.

Bei der direkten Georeferenzierung müssen die Abstände und Verdrehungen zwischen allen Sensoren im Rahmen einer Gesamtsystemkalibrierung bestimmt werden (*boresight alignment*). Nur dann können die bestimmten Positionen und Orientierungen auf das Projektionszentrum der Kamera reduziert werden. Wegen ihrem Hebeleffekt, sind laut Cramer u. a. (2000), vor allem die sogenannten *misalignment*-Winkel kritisch, die die Verdrehung zwischen den zur Winkelbestimmung eingesetzten Sensoren und der Kamera beschreiben.

Im Gegensatz zur direkten Georeferenzierung werden bei der indirekten Georeferenzierung

die Elemente der äußeren Orientierung über die Beobachtung von Passpunkten in den Bildern bestimmt.

3.2 Methode

In Abb. 5 sind die eingesetzten Sensoren und deren Integration, zur Bestimmung von Position und Orientierung, schematisch dargestellt. Es wird zunächst der zeitliche Verlauf dieser Größen bestimmt. Durch Berücksichtigung des *bore-sight alignments* werden diese auf die Kamera bezogen. Die anschließende Interpolation zu den Belichtungszeitpunkten der Bilder, liefert die gesuchten Elemente der äußeren Orientierung für jedes einzelne Bild.

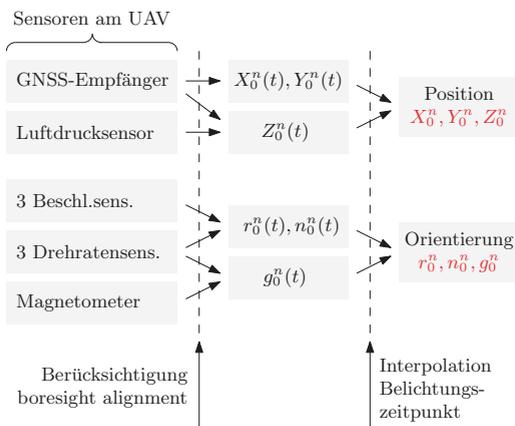


Abb. 5: Für die Positionsbestimmung wurden die Messungen des GNSS-Empfängers und des Luftsdrucksensors verwendet. Für die Orientierungsbestimmung hingegen jene der inertialen Messeinheit und des Magnetometers. Anhand der Pfeile kann erkannt werden, welche Sensormesswerte für die Parameterschätzung kombiniert wurden.

3.2.1 Positionsbestimmung

Für die Positionsbestimmung wurden ausschließlich die Messdaten des GNSS-Empfängers und des Luftsdrucksensors verwendet. Die gemessenen Luftsdruckänderungen stehen in direktem Zusammenhang zur Flughöhenänderung. Dieser Zusammenhang wird durch die barometrische Höhenformel beschrieben. Die aus den Luftsdruckmessungen abgeleiteten Höhenänderungen, können daher dazu verwendet werden, um die Genauigkeit, der vom GNSS-Empfänger gemessenen Höhe, zu verbessern. Diese Verbesserung wird bereits geräteintern vorgenommen und kann daher nicht näher beschrieben werden.

Die Integration mit der inertialen Messeinheit, unter Anwendung der Trägheitsnavigation,

führte bei der Trajektorienbestimmung zu keiner Genauigkeitssteigerung. Dies lässt sich auf die geringe Messgenauigkeit, der am *MikroKopter* eingesetzten MEMS-Sensoren zurückführen. Wie bereits in (Woodman, 2007) demonstriert, konnten daher die komplementären Eigenschaften von GNSS und inertialer Messeinheit, nicht zur Verfeinerung der Trajektorie genutzt werden. (Anmerkung: diese Erkenntnis steht im Widerspruch zur Publikation von El-Sheimy (2009), bei der die Integration von GNSS und inertialer Messeinheit zu akzeptablen Ergebnissen führte.)

3.2.2 Orientierungsbestimmung

Für die Orientierungsbestimmung wurden die Messdaten der inertialen Messeinheit und des Magnetometers verwendet (Abb. 6).

Die inertielle Messeinheit besteht aus drei jeweils orthogonal zueinander angeordneten Drehraten- und Beschleunigungssensoren. In einem körpergebundenen Koordinatensystem (*body-System* – Hochindex *b*) werden die Drehraten ($\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$ -Einheit [°/s]) um den drei Achsen und die Beschleunigungen (a_x^b, a_y^b, a_z^b -Einheit [m/s²]) entlang der drei Achsen erfasst. Damit werden alle rotatorischen und translatorischen Bewegungen der Plattform bestimmt.

In der Trägheitsnavigation wird die Orientierung üblicherweise nur unter Nutzung der Drehratsensoren bestimmt: ausgehend von bekannten Initialisierungswerten ($r^n(0), n^n(0), g^n(0)$) erhält man die zu bestimmende Orientierung durch die fortlaufende Integration der gemessenen Drehraten ($\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$). Aufgrund der verhältnismäßig geringen Messgenauigkeit von MEMS-Sensoren, liefert diese Integration der Drehraten bereits nach kurzer Zeit eine inakzeptable Genauigkeit (*angle random walk*) (Woodman, 2007). Daher ist es notwendig das Integral durch absolute Winkelmessungen zu stützen. Roll- und Nickwinkel können dazu im Ruhezustand der inertialen Messeinheit von den gemessenen Beschleunigungen abgeleitet werden; für den Gierwinkel ist dies nicht möglich. Dieser kann aber von den Messungen des Magnetometers abgeleitet werden, indem das gemessene magnetische Azimut in ein geodätisches Azimut – das dem Gierwinkel entspricht – umgerechnet wird.

Für die Nullpunktsbestimmung der Beschleunigungssensoren und des Magnetometers wurde ein Winkelmesstisch konstruiert, mit dem beliebige Winkelkombinationen simuliert werden können. Der konstante Anteil des Nullpunktfehlers wurde als Differenz zwischen Soll- und

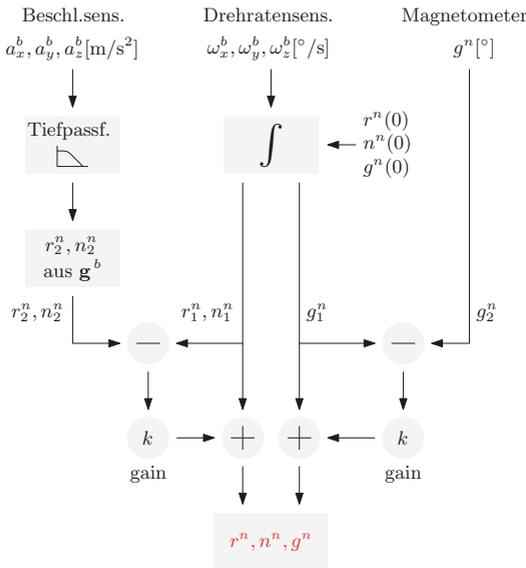


Abb. 6: Schematischer Ablauf zur Schätzung der Orientierungswinkel Roll, Nick und Gier. Der beim Integrieren der Drehraten wachsende Fehler, wird durch Absolutwinkelbestimmungen korrigiert (Stützung). Für Roll und Nick werden diese aus den Beschleunigungen abgeleitet. Das Magnetometer liefert den für die Stützung notwendigen Gierwinkel direkt.

Istwinkel im Ruhezustand bestimmt. Der kleinere zeitlich variierende Anteil wurde vernachlässigt. (Eine Alternative zum Winkelmesstisch ist die Montage der inertialen Messeinheit auf einem Tachymeter.)

Die Stützung des Integrals durch Absolutwerte für Roll-, Nick- und Gierwinkel ist in Abb. 6 dargestellt. Die aus der Integration der Drehraten bestimmten Winkel, werden mit (r_1^n, n_1^n, g_1^n) bezeichnet. Der vom Magnetometer stammende Gierwinkel wurde als g_2^n bezeichnet.

Die Ableitung von Absolutwerten für Roll- und Nickwinkel (r_2^n, n_2^n) basiert darauf, dass im Ruhezustand die Beschleunigungssensoren einer inertialen Messeinheit vorwiegend den Gravitationsvektor \mathbf{g} messen (Abb. 7), m. a. W., die Beschleunigungssensoren werden als Neigungsmesser eingesetzt. Aus den gemessenen Komponenten der Gravitation (g_x^b, g_y^b, g_z^b) können die gesuchten Winkel durch Anwendung der trigonometrischen Funktionen bestimmt werden.

Dazu wird zunächst der z-Einheitsvektor des Navigationskoordinatensystems \mathbf{e}_{z_n} , ausgedrückt im körpergebundenen Koordinatensystem, berechnet:

$$\mathbf{e}_{z_n}^b = -\frac{\mathbf{g}^b}{\|\mathbf{g}^b\|} \tag{1}$$

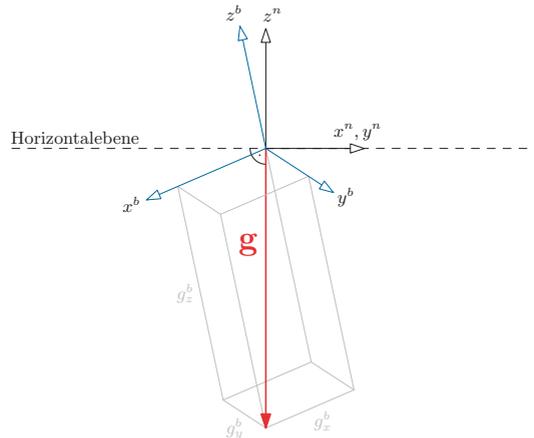


Abb. 7: Die drei zueinander orthogonal angeordneten Beschleunigungssensoren messen im körpergebundenen Koordinatensystem die Komponenten der Gravitation \mathbf{g} . Daraus können die Winkel Roll und Nick abgeleitet werden.

Für die in Hofmann-Wellenhof u. a. (2003) beschriebene Parametrisierung der Rotationswinkel, erhält man daraus Roll- und Nickwinkel wie folgt:

$$n_2^n = \arcsin\left(-\frac{e_{z_n, x}^b}{g_z^b}\right) \tag{2}$$

$$r_2^n = \arcsin\left(\frac{e_{z_n, y}^b}{\cos n_2^n}\right) \tag{3}$$

Unbemannte Luftfahrzeuge – und im Speziellen unbemannte Helikopter – vibrieren während des Fluges typischerweise sehr stark. Diese Vibrationen werden von den Beschleunigungssensoren als hochfrequentes Rauschen aufgezeichnet. Aus diesem Grund ist die Anwendung eines Tiefpassfilters auf die gemessenen Beschleunigungen vor der Ableitung von Roll- und Nickwinkel unbedingt notwendig. In Crossbow (2012) wird dafür empfohlen, die Grenzfrequenz bei etwa 100 Hz oder kleiner zu wählen.

Wie in Abb. 6 ersichtlich, kann nun die Differenz zwischen den durch Integration der Drehraten bestimmten Winkel und denen, die aus den Beschleunigungen abgeleitet wurden, gebildet werden:

$$\begin{pmatrix} \Delta r^n \\ \Delta n^n \\ \Delta g^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_2^n \\ n_2^n \\ g_2^n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r_1^n \\ n_1^n \\ g_1^n \end{pmatrix} \tag{4}$$

Um das Integral zu stützen, kann ein – durch den Faktor k (gain) definierter – Teil dieser Differenzen zu r_1^n bzw. n_1^n addiert werden:

$$\begin{pmatrix} r^n \\ n^n \\ g^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1^n \\ n_1^n \\ g_1^n \end{pmatrix} + k \cdot \begin{pmatrix} \Delta r^n \\ \Delta n^n \\ \Delta g^n \end{pmatrix} \tag{5}$$

Der Faktor k legt also fest, wie stark die Stützung durch die Beschleunigungssensoren sein soll. Wählt man bspw. $k=0$, erfolgt keine Stützung und die Werte für Roll- und Nickwinkel werden ausschließlich aus der Integration der Drehraten abgeleitet. Bei Wahl von $k=1$ hingegen werden die Winkel nur aus den gemessenen Beschleunigungen abgeleitet. Legt man k jedoch zwischen 0 und 1 fest, können die Vorteile beider Sensoren kombiniert werden – man spricht von einer Sensorfusion. Empfehlenswert ist eine Festlegung von k sehr nahe bei Null, denn dann liefern die Drehratensensoren die kurzzeitigen Winkeländerungen, während die Beschleunigungssensoren über längere Zeiträume das Integral korrigieren. Einen Vorschlag für die Wahl von k findet man in (Crossbow 2012). Für den in dieser Studie eingesetzten Multikopter, wurde $k=0.02$ gewählt.

Wie eingangs bereits erwähnt, kann die Neigung aus Beschleunigungen nur dann bestimmt werden, wenn sich die inertielle Messeinheit im Ruhezustand befindet. Näherungsweise trifft das bei Multikoptern dann zu, wenn sich das Fluggerät in Schwebelage (also bspw. an einem programmierten Wegpunkt) befindet oder sich nur sehr langsam bewegt. Bei hoch dynamischen Flugplattformen hingegen wird in (Wendel, 2007) vorgeschlagen, die trajektorienbedingten Beschleunigungen mit Hilfe der GNSS-Positions- und Geschwindigkeitsmessungen zu schätzen und diese dann von den gemessenen Beschleunigungen zu subtrahieren, womit nur noch der Gravitationseinfluss überbleibt. Die Stützung durch den vom Magnetometer stammenden Gierwinkel hingegen ist immer möglich, da dieser unabhängig von der Dynamik des Flugkörpers Gültigkeit hat.

4. Evaluierung

4.1 Allgemeines

Für die Evaluierung wurde ein aus 24 Punkten bestehendes Passpunktfeld in Siegendorf (Burgenland) eingerichtet (Abb. 8). Die Passpunkte ermöglichen die (von der direkten Georeferenzierung unabhängige) Bestimmung von Position und Orientierung der Bilder im Zuge einer Bündelblockausgleichung (indirekte Georeferenzierung). Aufgrund der geringen Messgenauigkeit der eingesetzten MEMS-Sensoren, können die

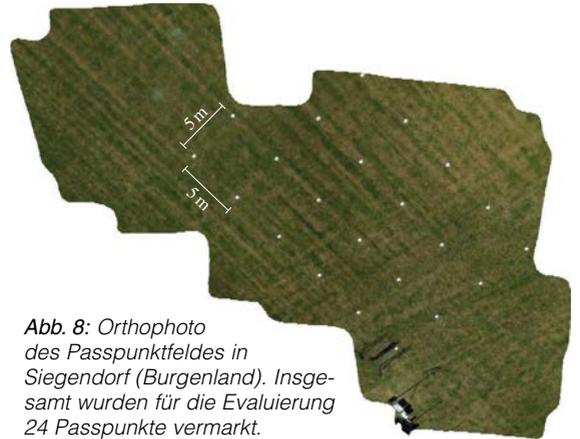


Abb. 8: Orthophoto des Passpunktfeldes in Siegendorf (Burgenland). Insgesamt wurden für die Evaluierung 24 Passpunkte vermarket.

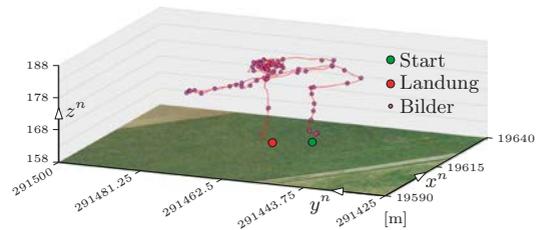


Abb. 9: Trajektorie des Evaluierungsfluges. Vermutlich wegen eines Kalibrierungsfehlers des Magnetometers wurde nur die ersten drei programmierten Wegpunkte angefliegen. Start und Landung wurden manuell vom Piloten durchgeführt.

über die Bündelblockausgleichung bestimmten Werte als Referenz für eine quantitative Beurteilung der direkten Georeferenzierung herangezogen werden.

4.2 Die Datenaufnahme

Die für die Aufnahme geflogene Trajektorie ist in Abb. 9 dargestellt. Die Vorgabe eines Wegpunktfluges sollte sicherstellen, dass das Passpunktfeld vollständig und mit homogener Überlappung aufgenommen wird. Der Wegpunktflug wurde aber – vermutlich wegen einer Fehlkalibrierung des Magnetometers – nach dem dritten Wegpunkt abgebrochen. Somit ist die angestrebte vollständige Erfassung nicht gelungen, wie auch an den zwei fehlenden Passpunkten in Abb. 8 erkannt werden kann. Kennwerte zum Flug sind in Tab. 2 enthalten.

Flugzeit	412 s
Anzahl direkt georef. Bilder	72
Anzahl indirekt georef. Bilder	53
Trajektorie Δx^n	34.7 m
Trajektorie Δy^n	27.4 m
max. Flughöhe	25.5 m
Belichtungszeit der Bilder	1/1000 s

Tab. 2: Kennwerte der Passpunktfeldbefliegung

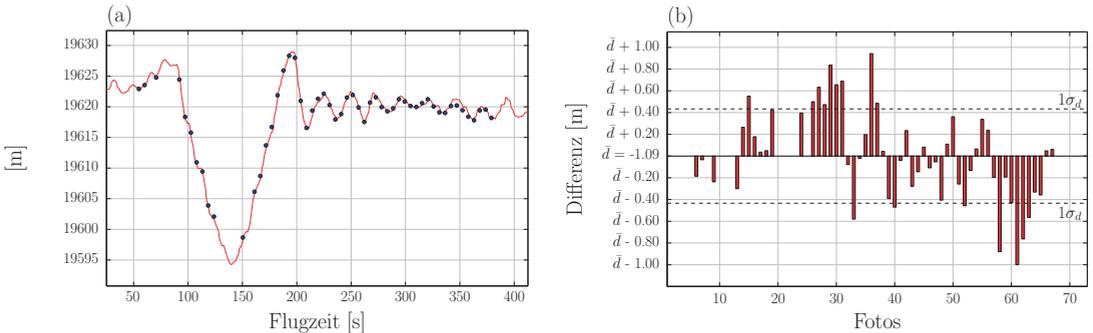


Abb. 10: (a) Zeitlicher Verlauf der X-Koordinate während des Fluges. Die rote Linie entspricht den aus der direkten Georeferenzierung bestimmten Werte. Die blauen Punkte markieren die Sollwerte aus der indirekten Georeferenzierung der Bilder. Der systematische Fehleranteil der Differenzen (Mittel) wurde hier – zwecks besserer Vergleichbarkeit – bereits korrigiert. (b) Differenzen der einzelnen Fotos bezüglich des Mittelwertes \bar{d} .

4.3 Gegenüberstellung von direkter und indirekter Georeferenzierung

Die, für die Bestimmung von Referenzdaten durchgeführte Bündelblockausgleichung, wurde im Programm Orpheus (Kager u.a., 2002) berechnet. Die Präzisionen der bestimmten Positionskordinaten der Bilder X_0^n , Y_0^n und Z_0^n betragen im Mittel 2.2, 2.6 und 0.8 cm. Die Orientierungswinkel der Bilder r_0^n , n_0^n und g_0^n haben im Mittel Präzisionen von 0.075°, 0.064° und 0.015°. Die Näherungswerte für die Ausgleichung wurden durch Anwendung des Rückwärtsschnittes nach Müller-Killian (Kraus, 2004) bestimmt. Insgesamt konnten so 53 der 72 aufgenommenen Bilder über Passpunkte indirekt georeferenziert werden. Auf eine Orientierung der restlichen 19 Bilder über Verknüpfungspunkte wurde bewusst verzichtet, da sich deren Messung in der aufgenommenen Wiese als zu unsicher erwies.

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen exemplarisch den Verlauf von X_0^n und r_0^n . Der durch direkte Georeferenzierung ermittelte zeitliche Verlauf dieser Parameter ist in rot dargestellt. Die aus der Bündelblockausgleichung stammenden Sollwerte sind als blaue Punkte dargestellt. Für die Evaluierung der in Kap. 3.2 beschriebenen Methode, wurden die Differenzen dieser Sollwerte zum bestimmten zeitlichen Verlauf gebildet (siehe dazu auch Glira (2012), S.88-99). In Tab. 3 sind die Standardabweichung und das Mittel dieser Differenzen aufgelistet.

4.3.1 Beurteilung der Positionsgenauigkeit

Die Lagekoordinaten konnten mit einer Präzision von etwa einem halben Meter bestimmt werden. Die Präzision der Höhenkoordinate ist um etwa Faktor 2 schlechter als jene der Lagekoordinaten. Dies entspricht den Erwartungen. Die Mittel der

Differenzen sind als Datumsfehler des GNSS-Empfängers zu deuten. Diese liegen innerhalb der im Datenblatt des GNSS-Empfängers angegebenen Genauigkeit von 2.5 m. Der im Mittel ebenfalls enthaltene Effekt des *boresight alignments* ist im Vergleich zum Datumsfehler sehr klein. Eine Trennung dieser Systematiken anhand der erhobenen Daten, ist aufgrund der hohen Korrelation, nicht möglich.

	σ_d	Mittel \bar{d}
X_0^n	0.43 m	-1.09 m
Y_0^n	0.57 m	0.36 m
Z_0^n	0.87 m	-1.40 m
r_0^n	0.91°	0.12°
n_0^n	0.94°	-1.92°
g_0^n	2.43°	-18.24°

Tab. 3: Standardabweichung σ und Mittel der Differenzen \bar{d} zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung

4.3.2 Beurteilung der Orientierungsgenauigkeit

Die Orientierungswinkel Roll und Nick konnten mit einer Präzision von etwa 1° bestimmt werden. Die signifikant schlechtere Präzision des Gierwinkels ist u.a. darauf zurückzuführen, dass das Magnetometer nur ganzzahlige Azimutwerte aufzeichnet. Die mittleren Differenzen für Roll und Nick konnten in weiteren Untersuchungen bestätigt werden und können daher als Verdrehungen des *boresight alignments* gedeutet werden. Die große mittlere Abweichung des Gierwinkels ist auf die bereits erwähnte Fehlkalibrierung des Magnetometers zurückzuführen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Schätzung der systematischen Fehler mit Hilfe von Pass-

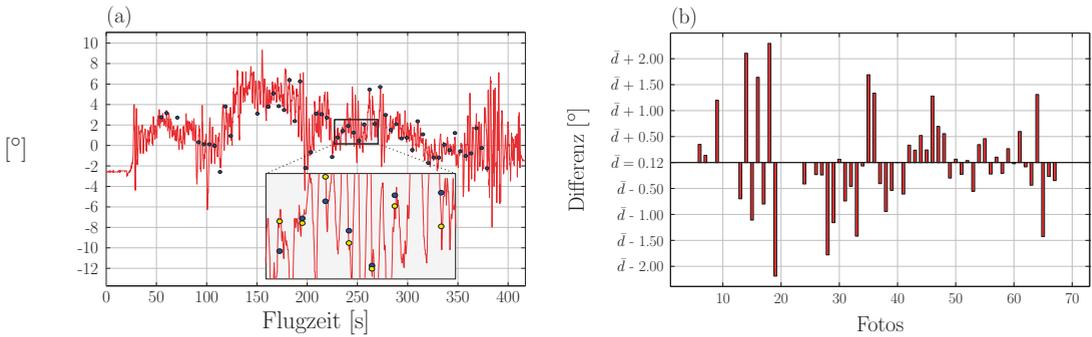


Abb. 11: (a) Zeitlicher Verlauf des Rollwinkels während des Fluges. In der Vergrößerung erkennt man die Problematik der Synchronisation: die gelben Punkte sind die ermittelten Werte der direkten Georeferenzierung. Bei starker Flugdynamik führt eine ungenaue Synchronisation mitunter zu sehr großen Fehlern, da diese Werte zu einem leicht falschen Zeitpunkt interpoliert werden (gut zu erkennen z.B. beim äußersten rechten Punkt). (b) Differenzen der einzelnen Fotos bezüglich des Mittelwertes \bar{d} .

punkten zu einer entscheidenden Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der direkten Georeferenzierung führen. Der vollständige Verzicht auf Passpunkten ist daher – trotz direkter Georeferenzierung der Bilder – nicht zu empfehlen.

Für die eingesetzte Kamera führt ein 1° falscher Roll- oder Nickwinkel (bei einer typischen Flughöhe von 25 m – siehe Tab. 2) im Nadir zu einem Lageversatz von 0.43 m. Entsprechend bewirkt ein 2° falscher Gierwinkel einen Lageversatz von 1.30 m im Bildeck.

5. Zusammenfassung

Unbemannte Luftfahrzeuge stellen für die Aufnahme von kleinräumigen Gebieten eine interessante Alternative zur klassischen bemannten Luftbildphotogrammetrie dar. Sie sind kostengünstig, flexibel einsetzbar, können automatisiert fliegen und ermöglichen Aufnahmen hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung.

Aufgrund einiger guter Eigenschaften werden in der Photogrammetrie oft unbemannte Helikopter eingesetzt. Mehrere Sensoren an Bord erfüllen hier flugunterstützende Funktionen und ermöglichen zudem die autonome Befliegung des aufzunehmenden Gebiets. Diese Sensoren können aber auch dazu „missbraucht“ werden um die aufgenommenen Bilder direkt zu georeferenzieren. Darunter versteht man die Bestimmung von Position und Orientierung der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt der Bilder.

Diese Untersuchung wurde mit einem kostengünstigen Multikopter durchgeführt, dem *Mikro-Kopter*. Die Offenlegung des Quelltextes dieses Systems erlaubte diverse Quelltextadaptionen, wodurch u.a. die Aufzeichnung der Sensorroh-

daten und deren Synchronisation mit der Kamera möglich war.

Für die direkte Georeferenzierung werden in der Regel nur Messdaten des GNSS-Empfängers und der Sensoren der inertialen Messeinheit herangezogen. Aufgrund der geringen Messgüte der eingesetzten MEMS-Sensoren, ist aber die Erweiterung mit ein Magnetometer und einem Luftdrucksensor notwendig. Durch Integration aller Sensoren zu einem Gesamtsystem kann damit die Genauigkeit der Positions- und Orientierungsbestimmung entscheidend verbessert werden. Als Kamera wurde eine handelsübliche Kompaktkamera der Fa. *Canon* eingesetzt. Die Kamerakalibrierung erfolgte mit Hilfe eines 3D-Passpunktfeldes.

Die Positionen der Bilder werden durch Integration des GNSS-Empfängers mit dem Luftdrucksensor bestimmt. Der Luftdrucksensor wird verwendet um die GNSS-Höhenkomponente zu verbessern. Diese Verbesserung wird bereits geräteintern vorgenommen.

Die Orientierungen der Bilder werden durch die Integration der Sensoren der inertialen Messeinheit und dem Magnetometer bestimmt. Die Beschleunigungssensoren und das Magnetometer liefern die zur Stützung des Drehratenintegrals notwendigen Absolutmessungen. Der Grad der Stützung kann so gewählt werden, dass die kurzzeitigen Winkeländerungen von den Drehratensensoren stammen, währenddessen die Stützung durch Absolutmessungen über längere Zeiträume erfolgt.

Die Integration der gemessenen Positionen und Orientierungen in die Bündelblockausgleichung (unter Berücksichtigung ihrer Genauigkeit) als Beobachtungen, vermeidet eine Deformation

des Bildblockes, wie sie bei der Verwendung von nur wenigen Passpunkten aufgrund unkompenzierter Systematiken auftreten kann (integrierte Sensororientierung).

Die Evaluierung der vorgeschlagenen Methode erfolgte durch die Gegenüberstellung von direkter und indirekter Georeferenzierung der Bilder. Für die indirekte Georeferenzierung wurde ein Passpunktfeld eingerichtet. Während eines 412 s langen Fluges wurden 72 Bilder aufgenommen, wovon 53 indirekt georeferenziert werden konnten. Die Positionen der Bilder konnten mit einer Präzision von ca. 0.5 m (Lage) bzw. 1.0 m (Höhe) bestimmt werden. Die Orientierungen der Bilder konnten mit einer Präzision von ca. 1° (Roll und Nick) bzw. 2° (Gier) bestimmt werden. Der systematische Fehleranteil sollte mit Hilfe von wenigen Passpunkten korrigiert werden.

Zukünftige Untersuchungen sollen klären, ob und wie die erzielten Genauigkeiten verbessert werden können. Neben dem Einsatz von unbemannten Helikoptern ist auch der Einsatz von Flächenflugzeugen, zur Aufnahme von großräumigen Gebieten, geplant.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projektes PRO-SA („Hochaufgelöste Messungen der Geomorphodynamik in sich schnell verändernden proglazialen Systemen der Alpen“). Es handelt sich dabei um ein geowissenschaftliches Gemeinschaftsprojekt, das von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft – Projektnr. BE 1118/27-1) und dem FWF (Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung – Projektnr. 1893) gefördert wird.

Das Ludwig Boltzmann Institut für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie (archpro.lbg.ac.at) basiert auf der internationalen Kooperation der Ludwig Boltzmann Gesellschaft (A), der Universität Wien (A), der Technischen Universität Wien (A), der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (A), dem Land Niederösterreich (A), Airborne Technologies GmbH (A), RGZM-Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz (D), RAÄ-Swedish National Heritage Board (S), IBM VISTA Universität Birmingham (GB) und NIKU-Norwegian Institute for Cultural Heritage Research (N).

Literaturverzeichnis

[Bláha u. a. 2011] *Bláha, M.; Eisenbeiss, H.; Grimm, D.; Limpach, P.*: Direct Georeferencing of UAVs. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22, UAVg 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland (2011)

[Briese u. Glira 2011] *Briese, C.; Glira, P.*: Reed mapping by unmanned aerial vehicles. In: International Symposium on Advanced Methods of Monitoring Reed Habitats in Europe (2011)

[Busker u. Buss 2013] *Busker, I.; Buss, H.*: MikroKopter. www.mikrokopter.de. Version: Juli 2013

[Cramer u. a. 2013] *Cramer, M.; Haala, N.; Rothermel, M.; Leinss, B.; Fritsch, D.*: UAV- gestützte Datenerfassung für Anwendungen der Landesvermessung – das Hessigheim-Projekt. In: DGPF Tagungsband 22 / 2013 – Dreiländertagung DGPF, OVG, SGPF (2013)

[Cramer u. a. 2000] *Cramer, M.; Stallmann, D.; Haala, N.*: Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33 Part B3 (2000)

[Crossbow 2012] *Crossbow*: IMU Application Note. www.xbow.com. Version: Januar 2012

[Eisenbeiss 2009] *Eisenbeiss, H.*: UAV Photogrammetry, ETH Zürich, Diss., 2009

[El-Sheimy 2009] *El-Sheimy, N.*: Emerging MEMS IMU and Its Impact on Mapping Applications. In: Photogrammetric Week 2009, 2009

[Glira 2012] *Glira, P.*: Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren, Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 2012. http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_207408.pdf

[H. Eisenbeiss u. Kolb 2009] *H. Eisenbeiss, W. S.; Kolb, M.*: Genauigkeitsanalyse der 3D- Trajektorie von Mini-UAVs. In: DGPF Tagungsband 18 / 2009 (2009)

[Haala u. a. 2011] *Haala, N.; Cramer, M.; Weimer, F.; Trittler, M.*: Performance Test on UAV-based Photogrammetric Data Collection. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, Switzerland (2011)

[Heckes 1984] *Heckes, J.*: Überblick über Flugsysteme für photogrammetrische Luftaufnahmen im Nahbereich. (1984)

[Hofmann-Wellenhof u. a. 2003] *Hofmann- Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J.*: Navigation. Springer-Verlag Wien New York, 2003

[Kager u. a. 2002] *Kager, H.; Rottensteiner, F.; Kerschner, M.; Stadler, P.*: Orpheus 3.2.1 – User Manual. 2002

[Kienast 2006] *Kienast, J.*: Untersuchung einer relativ zum terrestrischen Laserscanner Riegl LMS- Z420i kalibrierten Kamera hinsichtlich Stabilität dieser Kalibrierung., Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 2006

[Kraus 1996] *Kraus, K.*: Photogrammetrie Band 2: Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Ferd. Dümmlers Verlag, 1996

[Kraus 2004] *Kraus, K.*: Photogrammetrie Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. deGruyter Verlag, Berlin, 2004

[Przybilla u. Wester-Ebbinghaus 1979] *Przybilla, H.-J.; Wester-Ebbinghaus, W.*: Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. In: Bildmessung und Luftbildwesen. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung. (1979)

[UVS-International 2013] *UVS-International*: RPAS - Remotely Piloted Aircraft Systems – The Global Perspective. Yearbook 2013/2014. 2013

[Wendel 2007] *Wendel, J.*: Integrierte Navigationssysteme – Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation. Oldenbourg Verlag München Wien, 2007

[Woodman 2007] *Woodman, O. J.*: An introduction to inertial navigation. In: Technical Report (Number 696) – University of Cambridge (Computer Laboratory) (2007)

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Philipp Glira, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie E120.7, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien.

E-Mail: philipp.glira@geo.tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Briese, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie E120.7, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien.

LBI for Archaeological Prospection & Virtual Archaeology, Hohe Warte 38, A-1190 Wien.

E-Mail: christian.briese@geo.tuwien.ac.at

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Pfeifer, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie E120.7, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien.

E-Mail: norbert.pfeifer@geo.tuwien.ac.at



Echtzeit-Qualitätsüberprüfung für zuverlässige UAV-gestützte Bilddatenerfassung und exakte, automatisierte Mehrbildauswertung



Markus Rumpler,
Christof Hoppe,
Andreas Wendel,
Graz;
Gerhard Mayer,
Leoben;
Horst Bischof, Graz

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Photogrammetrische Verfahren werden bereits seit vielen Jahrzehnten für Vermessungsaufgaben verwendet. Durch die Weiterentwicklung von unbemannten Flugsystemen (engl. Unmanned Aerial Vehicle, UAV) und der leistungsfähigen, automatisierten Bildauswertung ergeben sich neue Einsatzbereiche wie z.B. die vermessungstechnische Unterstützung eines Tagebaus. In diesem Artikel beschreiben wir, wie mittels Photogrammetrie auf Basis von Bildern, die von einem Oktokopter aus aufgenommen wurden, eine exakte Rekonstruktion und Vermessung einer im Tagebau typischen Bruchwand durchgeführt werden kann. Für die Genauigkeit und die Vollständigkeit ausschlaggebend sind dabei unter anderem die Redundanz und die Bodenauflösung der aufgenommenen Bilder. Da diese Parameter während der Bildaufnahme ohne Hilfsmittel schwer zu kontrollieren sind, stellen wir ein Verfahren vor, mit dem bereits während des Fluges in Echtzeit sichergestellt wird, dass die aufgenommenen Bilder für die nachfolgende automatisierte, photogrammetrische Auswertung verwendbar sind und die Qualitätsanforderungen erfüllen. Damit verringert sich die Gefahr, den Bildflug wiederholen zu müssen. Wir zeigen, dass mit den so aufgenommen Bildern in Kombination mit einer automatisierten Mehrbildauswertung ohne Zuhilfenahme von externen Pass- und Kontrollpunktmessungen eine Messunsicherheit von unter 0.1% auf einer Länge von 100 m erreicht wird.

Schlüsselwörter: Photogrammetrie, unbemannte Flugsysteme, Luftbild-Datenerfassung, bildbasierte 3D Rekonstruktion, Echtzeit-Qualitätskontrolle, Genauigkeitsauswertung

Abstract

Photogrammetric systems are used for several tasks since decades. The development of small and lightweight Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) that are suited to carry a consumer-grade camera, in conjunction with fully automatic 3D reconstruction systems, supports applications such as recurrent topographical surveys in open pit mining. In this article we describe that a fully automatic photogrammetric system can be used to measure distances on a quarry wall using images acquired by an octo-rotor helicopter. To make the reconstruction more reliable in terms of accuracy and completeness, we propose a method that allows to assess already during the flight if the acquired images are sufficient to achieve the required properties of the offline photogrammetric reconstruction. This method provides online feedback to the user such that he or she can adopt the image acquisition strategy to obtain a complete and accurate reconstruction. We show that based on these images a fully automatic reconstruction pipeline is able to obtain object points with an uncertainty of less than 0.1% of a 100 m quarry wall without the aid of external ground control points.

Keywords: Photogrammetry, Unmanned Aerial Vehicles, Structure-from-Motion, Aerial Imaging, Image-based 3D Reconstruction, Online Feedback, Accuracy Evaluation

1. Einleitung

Photogrammetrische Verfahren werden bereits seit Jahrzehnten in verschiedensten Bereichen der Vermessung eingesetzt. Aus Luftbildern können großflächige Oberflächenmodelle erstellt werden, während terrestrisch aufgenommene Bilder für Detailvermessungen verwendet werden. Ein Anwendungsbereich für diese beiden Arten der Photogrammetrie ist zum Beispiel die bergmännische Vermessung eines Tagebaus.

Die bergmännische Vermessung hat das Ziel und die Aufgabe, in allen Phasen eines Mineralrohstoffprojektes beginnend von der Erkundung über die Erschließung und Gewinnung bis hin zur Nachsorge, die benötigten raumbezogenen Informationen zur Verfügung zu stellen. Dabei werden neben klassischen Vermessungsgeräten wie der Totalstation oder des Laserscanners zunehmend photogrammetrische Methoden eingesetzt. Kombiniert mit der UAV-gestützten

Datenerfassung aus der Luft sind zukünftig viele Vermessungsaufgaben schneller und kostengünstiger durchzuführen.

Während die klassische Luftbildphotogrammetrie durch den Einsatz von bemannten, spezialisierten Flugzeugen hohe Kosten verursacht und dementsprechend nur für sehr große Tagebaugebiete wirtschaftlich ist, wird die terrestrische Photogrammetrie auch in kleinen und mittelgroßen Abbaugebieten, wie sie typischerweise in Österreich und Mitteleuropa vorkommen, eingesetzt. Sie ist wesentlich kostengünstiger und flexibler, aber ihr Anwendungsbereich ist durch den bodengebundenen Aufnahmestandort begrenzt.

Eine Anwendung basierend auf terrestrischen Bildern ist die 3D Rekonstruktion von Bruchwänden zur Sprengplanung. Allerdings ergeben sich durch den bodengebundenen Standort auch Probleme bezüglich Sichtbarkeit bestimmter Szenenbereiche. So kann zum Beispiel der Kopf einer Bruchwand nicht vermessen werden, da er im Sichtschatten liegt, obwohl gerade dieser von besonderem Interesse bei der Sprengplanung ist.

Um die Vorteile der luftgebundenen und terrestrischen Photogrammetrie zu vereinen, bieten sich unbemannte Multirotor-Flugsysteme als Aufnahmeplattform an. Diese durch vier oder mehr Rotoren betriebenen Luftfahrzeuge mit der Größe eines Modellflugzeuges können mit einer handelsüblichen Digitalkamera ausgestattet werden und jeden Punkt im Raum anfliegen. Die Vorteile eines solchen Systems sind vielseitig:

- Flexibilität – Ein UAV ist innerhalb von Minuten einsatzbereit. Es ist keine aufwändige Einschulung des Personals notwendig.
- Sicherheit – UAVs werden ferngesteuert oder fliegen autonom. Somit können Bereiche vermessen werden, die aufgrund von Sicherheitsbedenken nicht vom Menschen betreten werden können.
- Wirtschaftlichkeit – Durch moderate Anschaffungskosten rechnet sich der Einsatz von UAVs auch in kleinen und mittleren Betrieben.
- Vollständigkeit – Da die angebrachte Kamera frei dreh- und schwenkbar ist, kann die Aufnahme immer optimal der Oberflächengeometrie angepasst werden. Somit sind je nach Aufgabenstellung sowohl Detailaufnahmen von senkrechten Oberflächen wie Bruchwänden, als auch klassische, vertikale Luftbildaufnahmen von relativ großen Gebieten möglich.

In Verbindung mit einer automatisierten Mehrbildauswertung ist eine schnelle, kostengünstige und bedarfsgerechte 3D Rekonstruktion möglich. Vollautomatische, bildgestützte 3D Rekonstruktionen wurden zunächst in der Bildverarbeitung entwickelt [1] und werden zunehmend auch in der Photogrammetrie eingesetzt. Diese sind in der Lage, aus einer Vielzahl an (ungeordneten) Bildern zunächst die äußere Orientierung der Kamera und eine punktbasierete Szenenrekonstruktion zu errechnen, um dann in weiteren Schritten eine dichte Punktwolke zu erzeugen [10].

Allerdings stellen automatisierte Verfahren hohe Anforderungen an die Qualität und vor allem an die geometrische Konfiguration der Bilder zueinander. Für die Genauigkeit und die Vollständigkeit ausschlaggebend sind dabei unter anderem die Redundanz und die Bodenauflösung der aufgenommenen Bilder.

So dürfen die Bilder z.B. nicht zu große Skalierungsunterschiede aufweisen und der Blickwinkel zwischen benachbarten Bildern darf nicht zu groß sein (bis zu 30 Grad [2]). Ebenso muss gewährleistet sein, dass ein ausreichender Bildüberlapp gegeben ist, und somit jeder Oberflächenpunkt mindestens in einem Bildpaar zu sehen ist, damit eine Rekonstruktion möglich ist. Durch die Möglichkeit, jeden beliebigen Punkt im Raum anzufliegen, ist es für einen Piloten nicht immer möglich abzuschätzen, ob all diese Parameter erfüllt sind. Dies führt häufig dazu, dass die Rekonstruktion nicht den Genauigkeitsanforderungen entspricht, oder sogar unvollständig ist. Da diese Parameter während der Bildaufnahme ohne Hilfsmittel schwer zu kontrollieren sind, stellen wir in diesem Artikel ein Verfahren vor, mit dem bereits während der Datenerfassung in Echtzeit eine Abschätzung ermöglicht wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die aufgenommenen Bilder für die nachfolgende automatisierte, photogrammetrische Auswertung verwendbar sind und die Qualitätsanforderungen erfüllen. Es verringert sich auch die Gefahr, den Bildflug wiederholen zu müssen.

Zunächst skizzieren wir den Arbeitsablauf einer automatisierten Mehrbildauswertung, deren grundlegende Verfahren in der photogrammetrischen Objektrekonstruktion bereits allgemein bekannt sind und in vielen, zum Teil freien Softwarepaketen zur Verfügung stehen (z.B. VisualSfM, Agisoft PhotoScan, Acute3D, Pix4D, u.a.). Wir beschreiben dann eine neue Methode, mit der bereits während des Fluges die Qualität der Mehrbildauswertung kontrolliert werden kann. Anschließend zeigen wir, dass



Abb. 1: Terrassenförmiger Tagebau am steirischen Erzberg

die automatisierte Mehrbildauswertung es ermöglicht, Vermessungen mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich durchzuführen. Wir zeigen, dass mit den so aufgenommenen Bildern in Kombination mit der hier vorgestellten automatisierten Mehrbildauswertung ohne Zuhilfenahme von externen Pass- und Kontrollpunktmessungen eine Messunsicherheit von unter 0.1% auf einer Länge von 100 m erreicht wird.

Die Auswertung erfolgt am Beispiel eines Bild Datensatzes, der eine typische Bruchwand eines Tagebaus zeigt. Aufgenommen wurde dieser Datensatz mit einem Multicopter Flugsystem am steirischen Erzberg (Abbildung 1 und 2).

Im nachfolgenden Abschnitt beschreiben wir die einzelnen Schritte, die bei einer automatisierten Mehrbildauswertung durchgeführt werden, um anschließend die Vermessung einzelner Bildpunkte zu ermöglichen.

2. Automatisierte Mehrbildauswertung

Die automatisierte Mehrbildauswertung wurde zunächst im Bereich der Bildverarbeitung entwickelt und wird zunehmend auch in der Photogrammetrie eingesetzt. Dabei kann der Prozess der Rekonstruktion in drei Teile gegliedert werden: Bestimmung der äußeren Orientierung der Kameras und der Objektpunkte, Verdichtung der Objektpunkte, und Erstellung eines dreiecksbasierten Oberflächenmodells.

2.1 Bestimmung der äußeren Kameraorientierung und der Objektpunkte

Eine für unbemannte Flugsysteme geeignete automatische Mehrbildauswertung muss mit einer beliebigen Bildkonfiguration zurechtkommen. Im Gegensatz zu meist regelmäßig, streifenweise angeordneten Bildverbänden in der klassischen Luftbildphotogrammetrie stellen beliebige Bildanordnungen und perspektivische Verzerrungen in der terrestrischen beziehungsweise Nahbereichs-Photogrammetrie hierbei besondere Anforderungen an die verwendeten Methoden für die Bestimmung der äußeren Orientierung und der 3D-Rekonstruktion. Als photogrammetrische Sensorplattformen werden in den meisten Fällen UAVs verwendet, die mit einem globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) wie beispielsweise GPS, sowie einem elektronischen Kompass, Luftdrucksensoren zur Höhenbestimmung und einer inertialen Messeinheit (IMU) zur Schätzung der Plattformorientierung ausgestattet sind. Mit deren Hilfe ist es bereits möglich, die Position für eine direkte Georeferenzierung der aufgenommenen Fotos auf 1–2 Meter und die Orientierung mit 1–2° Genauigkeit zu bestimmen [17]. Die Messunsicherheit in der Positionsbestimmung mittels GNSS und IMU lässt aber im Allgemeinen keine ausreichende Genauigkeit für eine Bestimmung der Kameraorientierungen zu, welche für die hier vorgestellte automatische bildbasierte



Abb. 2: Oktokopter der Firma Asctec

Rekonstruktion notwendig ist (beispielsweise aufgrund von Abschattung oder Reflexion von GPS-Signalen an Gebäuden, steilen Berghängen, etc.). Deshalb wird die räumliche Lage der Bilder zum Zeitpunkt der Aufnahme bei unserem Verfahren rein durch bildbasierte Methoden ermittelt.

Im Folgenden wird ein vollautomatischer Prozess zur Gewinnung der 3D Objektgeometrie von der Bildaufnahme bis hin zur Erzeugung von Oberflächenmodellen durch Verfahren der Mehrbild-Auswertung beschrieben. Grundlage bilden Algorithmen basierend auf projektiver Stereo- beziehungsweise Mehrbild-Geometrie [1].

Notwendige Verarbeitungsschritte für die Berechnung der äußeren Orientierung sind Kamerakalibrierung, Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse, Bestimmung der relativen Kameraorientierung zweier Kameras aus bekannten Punktkorrespondenzen, das Einfügen neuer Kameras mittels Rückwärtsschnitt, die Berechnung von 3D-Objektkoordinaten durch Vorwärtsschnitt und der Bündelblockausgleich zur Optimierung von Kameraorientierungen und 3D-Koordinaten der Objektpunkte.

Voraussetzung um innerhalb eines Bildes messen zu können ist ein entsprechendes Kameramodell und bekannte Abbildungsparameter der Kamera (innere Orientierung). Dazu gehören der Bildhauptpunkt, die Brennweite des Objektivs, sowie Parameter, welche die Linienverzeichnung beschreiben. Für handelsübliche Digitalkameras, wie sie bei UAVs eingesetzt werden, eignet sich das Lochkameramodell. Diesem liegt das Prinzip der Zentralprojektion zugrunde, welches um die Modellierung der Linienverzeichnung erweitert wird. Die Parameter der inneren Orientierung werden per Kamerakalibrierung ermittelt. Dazu kann ein planares, schwarz-weißes Kalibriermuster verwendet werden. In den aus unter-

schiedlichen Blickrichtungen aufgenommenen Bildern, werden anschließend gut zu lokalisierende Merkmalspunkte extrahiert. Voraussetzung ist, dass ausreichend viele korrespondierende Punktpaare bekannt sind, um die Abbildungsparameter zu bestimmen. Dies wird mittels robuster Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse der extrahierten Merkmalspunkte erreicht. Die Güte der Kalibrierung ist, neben der Redundanz der Bildaufnahme, mitentscheidend für die Genauigkeit der rekonstruierten Objektpunkte.

Für die automatisierte Merkmalsanalyse existiert eine Vielzahl an Methoden, um Merkmalspunkte zu detektieren und zu beschreiben. Eine Methode, die robust gegenüber Skalierung, Rotation und Beleuchtungsänderungen ist, ist die Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [2]. Sie ist invariant gegenüber Blickwinkeländerungen von bis zu etwa 30 Grad. Dieses ist daher der maximale Winkel zwischen einem Bildpaar, bei dem eine automatische Korrespondenzanalyse noch möglich ist, was bei der Bildaufnahme berücksichtigt werden muss. Zudem lässt sich die Merkmalspunkteextraktion auf moderner Grafikkarten-Hardwarearchitektur parallelisieren und somit ein enormer Geschwindigkeitsgewinn bei der Berechnung erzielen.

Für ein Bild mit einer mittleren geometrischen Auflösung von beispielsweise 4000×3000 Pixel ergeben sich bis zu 10.000 Merkmalspunkte. Da wir davon ausgehen, dass keine weiteren Informationen über die Bilder wie GPS-Positionen bekannt sind, erfordert die Korrespondenzanalyse in ungeordneten Bildersets zwischen allen Bildpaaren einen flächendeckenden Vergleich aller Merkmalspunkte eines Bildes gegen alle Punkte eines zweiten Bildes. Für einen Datensatz bestehend aus einigen hundert Bildern, wie er hier in dieser für den Tagebau typischen Anwendung dargestellt ist, ist die Korrespondenzanalyse zwischen allen Bildpaaren mit dem hier vorgestellten automatischen Offline-Verfahren in einer Zeit von ca. 2 Stunden möglich. Die vollständige Korrespondenzanalyse zwischen allen möglichen Bildpaaren ist notwendig, um

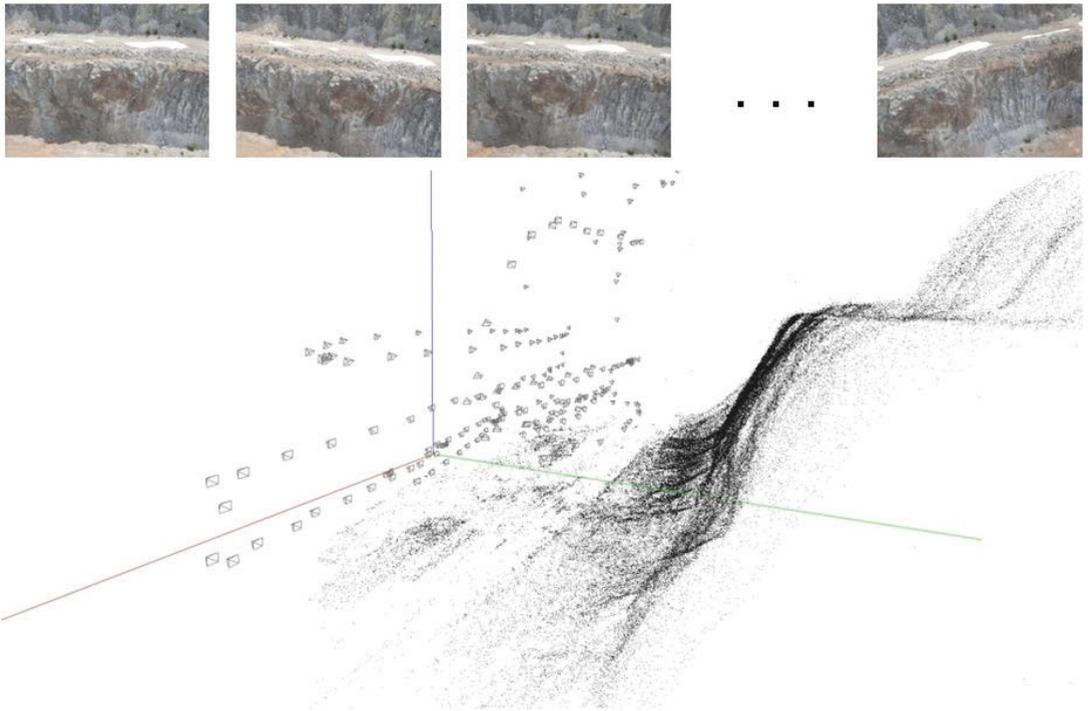


Abb. 3: Äußere Orientierung und triangulierte Objektpunkte aus den aufgenommenen Bildern. Die Punktwolke besteht aus etwa 130.000 Objektpunkten.

möglichst viele Bildmessungen für einen Objektpunkt zu erhalten. Wie in [3] gezeigt wurde, sind die Anzahl der Bildmessungen und ein möglichst großer Triangulationswinkel entscheidend für die Rekonstruktionsgenauigkeit. Der theoretisch optimale Schnittwinkel liegt hierbei bei 90° , von praktischer Relevanz sind wie oben erwähnt Winkel von 20° bis maximal 30° bei Verwendung des SIFT Deskriptors. Die Rechenzeit für die Korrespondenzanalyse kann ebenfalls durch die Verwendung von Grafik-Hardware verringert werden.

Mit Hilfe der gefundenen Korrespondenzen zwischen den Bildpaaren werden nun durch geometrische Verifikation basierend auf dem Fünf-Punkt-Algorithmus [6] die relativen Kameraorientierungen zwischen den Bildpaaren geschätzt und als Epipolar-Graph dargestellt. Da die als Messwerte aufgefassten Merkmalspunkt-Korrespondenzen mit Ausreißern und groben Fehlern behaftet sein können, geschieht dies mittels eines robusten Schätzverfahrens innerhalb einer RANSAC-Schleife [7]. Der so ermittelte Epipolar-Graph stellt die paarweisen Rekonstruktionen und relativen Orientierungen dar, wobei die Knoten den Bildern und die Kanten den relativen Orientierungen zwischen den Bildern entspre-

chen. Ausgehend von einem initialen Bildpaar [2] können nun inkrementell neue Aufnahmen zur Rekonstruktion mittels 3-Punkt-Algorithmus [8], beziehungsweise Rückwärtsschnitt, hinzugefügt werden. Durch robusten Bündelblockausgleich [9] werden Kameraorientierungen und die über Vorwärtsschnitt bestimmten 3D-Punktkoordinaten simultan optimiert und verfeinert.

Als Ergebnis dieser vollautomatischen Mehrbild-Rekonstruktionspipeline erhält man neben den optimierten äußeren Orientierungen der Bilder auch eine bis auf einen Skalierungsfaktor bestimmte 3D-Rekonstruktion der Szene als Punktwolke. Das Ergebnis der äußeren Orientierung der am Erzberg aufgenommenen Bilder ist in Abbildung 3 gezeigt.

2.2 Verdichtung der Objektpunkte

Das Ergebnis des vorherigen Schrittes ist die Bestimmung der äußeren Orientierung und die Triangulierung einzelner Merkmalspunkte. Aufgrund der geringen Anzahl an triangulierten Merkmalspunkten (etwa 500 – 1000 pro Bild, abhängig von der Textur) im Vergleich zur Anzahl der Pixel im Bild (10 Millionen) und deren ungleichmäßigen Verteilung auf der Oberfläche, ist eine exakte Modellierung der Oberfläche noch



Abb. 4: Die durch PMVS2 [10] verdichtete Punktwolke besteht aus etwa 10 Millionen 3D Punkten

nicht möglich. Um die Anzahl an 3D Punkten zu erhöhen, können Stereoverfahren [11] oder auch Mehrbildmethoden [10,16] zum Bild-Matching verwendet werden.

Stereomethoden verwenden zwei rektifizierte Bilder, um für jeden Pixel im Bild eine Tiefe zu bestimmen. Im Fall von Bildern, die mit einem Multitrottkopter aufgenommen wurden, ist eine Rektifizierung aufgrund der geometrischen Anordnung der Kameras häufig nur mit großem Verlust in der Bildauflösung möglich. Daher eignen sich für mittels UAVs aufgenommener Bilder Mehrbildmethoden wie das frei verfügbare PMVS2 [10], das mit beliebigen Kamerakonstellationen zurecht kommt. Abbildung 4 zeigt eine mittels PMVS2 verdichtete Punktwolke der Bruchwand. Diese enthält etwa 10 Mio. 3D Punkte, die annähernd gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt sind.

2.3 Dreiecksbasiertes Oberflächenmodell

Für viele Aufgaben im Bergbau, wie z.B. der Planung von Sprenglöchern, ist eine verdichtete Punktwolke nicht ausreichend, da sie keine geschlossene Oberfläche darstellt. Eine bekannte Methode, die aus dichten, gleichmäßig verteilten 3D Punkten eine Oberfläche extrahiert und auch bei Laserscandaten verwendet wird, ist die Poisson-Rekonstruktion [12]. Diese interpoliert die verdichteten Punkte zu einer geschlossenen Oberfläche. Das Oberflächenmodell der Bruchwand ist in Abbildung 5 zu sehen. Solche Modelle

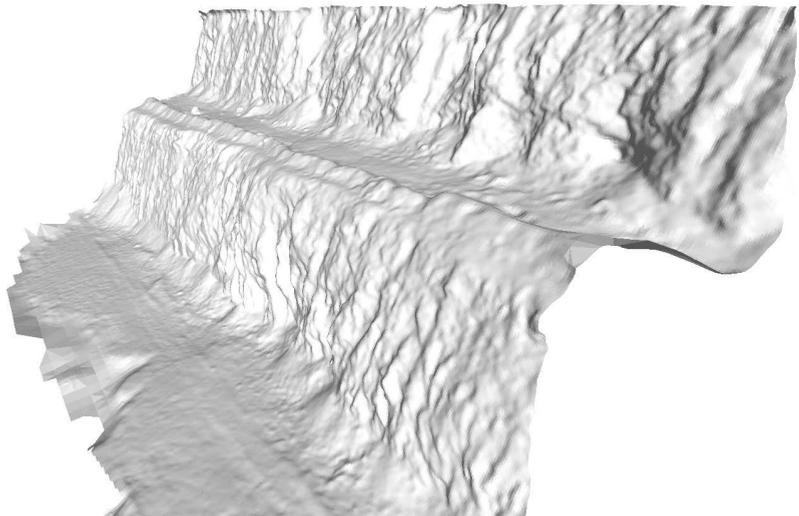


Abb. 5: Dreiecksbasiertes Oberflächenmodell der rekonstruierten Bruchwand

dienen im Bergbau beispielsweise der Planung von Sprenganlagen oder zur Analyse von Kluftsystemen.

3. Online Mehrbildauswertung

Die oben beschriebene Mehrbildauswertung garantiert eine sehr hohe Genauigkeit, wie wir in Kapitel 4 zeigen. Allerdings benötigt die Korrespondenzanalyse zwischen allen Bildpaaren zum Teil mehrere Stunden Rechenzeit, und damit ist das Endergebnis erst zeitlich versetzt zur Bildaufnahme verfügbar. Entspricht das Ergebnis nicht den Erwartungen, z.B. aufgrund fehlender Bilder von Bereichen die für die Vermessung relevant gewesen wären, ist eine Wiederholung des Fluges notwendig, was weitere Kosten und Zeitverzögerungen verursacht.

Um bereits während des Fluges beurteilen zu können, ob die aufgenommenen Bilder für eine vollautomatische Rekonstruktion verwendbar sind und die Rekonstruktion den erwarteten Anforderungen entspricht, haben wir eine Methode [14] entwickelt, die bereits während des Fluges die äußere Orientierung der Kameras berechnet und aufgrund der triangulierten Merkmalspunkte die Szenenoberfläche bestimmt. Diese Oberfläche dient dann dazu, die Bodenauflösung und die Redundanz der Rekonstruktion zu visualisieren. Das Verfahren verarbeitet die hochaufgelösten Bilder einer 10 Megapixel Kamera auf einem Notebook mit Quadcore CPU und leistungsfähiger Grafikkarte in Echtzeit. Die Bilder werden vom UAV über eine mit WLAN ausgestattete SD Karte in der Kamera zum Notebook am Boden gesendet.

3.1 Bestimmung der äußeren Orientierung während des Fluges

Das in Kapitel 2 beschriebene Mehrbild-Rekonstruktionsverfahren setzt voraus, dass alle Bilder bereits zu Programmstart vorhanden sind, um eine vollständige, paarweise Korrespondenzanalyse durchführen zu können. Da während der Datenerfassung etwa alle zwei Sekunden ein neues Bild aufgenommen wird, wird die Mehrbildauswertung so modifiziert, dass diese inkrementell per Folgebildanschluss arbeitet. Dies verringert zwar die Genauigkeit der äußeren Orientierung, aber ermöglicht bereits während der Aufnahme, die Szenenabdeckung zu beurteilen. Eine exakte Auswertung erfolgt dann nach der Aufnahme mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Verfahren.

Zunächst wird mit Hilfe der ersten beiden aufgenommenen Bilder eine initiale 3D Rekonstruktion erzeugt. Dafür wird zunächst die Korrespondenzanalyse durchgeführt, um mit den daraus resultierenden Korrespondenzen die relative Orientierung des Bildpaares mittels 5-Punkt-Algorithmus [6] zu bestimmen. Anschließend werden mittels Vorwärtsschnitt die 3D Koordinaten der Korrespondenzen bestimmt. Wird ein neues Bild aufgenommen, wird versucht dessen äußere Orientierung zu berechnen und anschließende neue Objektpunkte zu triangulieren. Im Bereich der Bildverarbeitung ist die Bestimmung der Orientierung anhand existierender 3D Punkte als bildbasierte Lokalisierung bzw. Rückwärtsschnitt bekannt. Um die äußere Orientierung des neuen Bildes zu berechnen, werden Korrespondenzen zwischen 2D Merkmalspunkten und rekonstruierten 3D Punkten benötigt. Sind mindestens drei Korrespondenzen bekannt, kann die äußere Orientierung mittels des 3-Punkt-Algorithmus berechnet werden. Anschließend triangulieren wir neue 3D Punkte mit Hilfe der Bilder, die sich in der Umgebung des neu aufgenommenen Bildes befinden.

Um effizient Korrespondenzen zwischen dem zu integrierenden Bild und den existierenden 3D Punkten zu finden, ist eine vollständige Korrespondenzanalyse zwischen allen Bildpaaren nicht möglich, da diese quadratisch mit der Anzahl der Bilder steigt und ein neues Bild etwa alle zwei Sekunden aufgenommen wird. Daher beschränken wir uns bei der Korrespondenzanalyse auf die 10 optisch ähnlichsten Bilder deren äußere Orientierung bereits bekannt ist. Das Finden von visuell ähnlichen Bildern ist im Bildverarbeitungsbereich als „Image Retrieval“ [4,5] bekannt und ist selbst bei extrem großen Datensätzen mit mehreren tausend Bildern in Bruchteilen von

Sekunden möglich. Diese Verfahren sortieren die Bilder anhand der Ähnlichkeit der extrahierten SIFT Merkmalspunkte. Da einige Merkmalspunkte der optisch ähnlichsten und bereits orientierten Bilder mit einem Objektpunkt verknüpft sind, lassen sich so 2D-3D Korrespondenzen zwischen Bildpunkten und bereits rekonstruierten Objektpunkten herstellen. Da hier auch falsche Korrespondenzen gefunden werden, wird die äußere Orientierung des neuen Bildes mit Hilfe von RANSAC gefunden. Somit kann trotz einer Vielzahl von fehlerhaften Korrespondenzen meist die korrekte Position bestimmt werden. Kann keine gültige Kameraposition errechnet werden, da z.B. zu wenige Korrespondenzen gefunden wurden, wird dieses Problem dem Benutzer gemeldet. Eine Programm-Meldung macht dem Benutzer deutlich, dass das aktuelle Bild nicht für eine 3D Rekonstruktion verwendet werden kann, weil z.B. keine Überlappung zur existierenden Rekonstruktion besteht oder die Textur nicht ausreichend ist.

Anschließend bestimmen wir im Vorwärtsschnitt mit den zuvor gefundenen Korrespondenzen, die noch nicht mit einem 3D Punkte verbunden sind, neue Objektpunkte. Um eine Fehlerfortpflanzung zu verhindern optimieren wir den Rückprojektionsfehler mit Hilfe des Bündelblockausgleichs [9]. Um die Rechenzeit konstant zu halten werden hierbei nicht alle Kamerapositionen berücksichtigt, sondern nur jene, die sich in unmittelbarer Nähe zum neuen Bild befinden.

Das oben beschriebene Verfahren benötigt etwa 2 Sekunden um die äußere Orientierung eines 10 Megapixel Bildes zu berechnen und neue Objektpunkte zu triangulieren. Durch die Restriktion der Korrespondenzanalyse und der Beschränkung des Bündelblockausgleichs auf die unmittelbar nächsten Nachbarn erhebt diese Rekonstruktion keinen Anspruch auf eine hohe Genauigkeit. Diese wird nur erreicht wenn eine vollständige Korrespondenzanalyse wie in Kapitel 2 beschrieben durchgeführt wird. Allerdings ermöglicht diese Methode die Abschätzung der erreichbaren Rekonstruktionsqualität bereits während der Bildaufnahme.

3.2 Redundanz- und Bodenauflösungsanalyse

Aus den triangulierten Merkmalspunkten lässt sich für den Benutzer die Qualität der Rekonstruktion nur schlecht ableiten. Für die Genauigkeit maßgebliche Parameter sind zum einen die Redundanz, welche aussagt wie oft ein Oberflächenpunkt gesehen wird, und zum anderen die

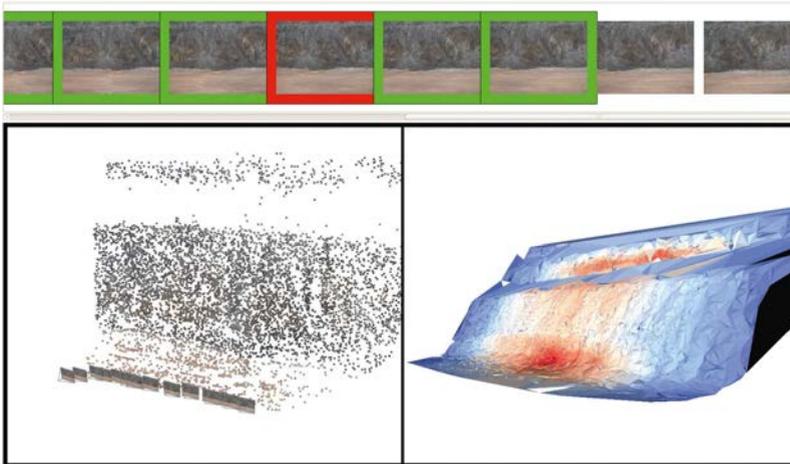


Abb. 6: Visualisierung des Rekonstruktionsergebnisses während der Bildaufnahme. Für das rot umrandete Bild konnte keine äußere Orientierung gefunden werden. Der Pilot sieht sowohl die äußere Orientierung und die Objektpunkte, als auch ein grobes Oberflächenmodell auf dem beispielsweise die Redundanz visualisiert wird. Je rötlicher der Farbton, desto häufiger wurde dieser Szenenbereich bereits fotografiert; blau signalisiert geringe Szenenabdeckung.

Bodenauflösung. Um diese beiden Werte ermitteln und visualisieren zu können, berechnen wir anhand der Objektpunkte ein dreiecksbasiertes Oberflächenmodell. Das in unserem Fall verwendete Verfahren ist näher in [13] beschrieben.

Da die äußere Orientierung der Bilder und die Szenenoberfläche bekannt sind, können sowohl die Redundanz als auch die Bodenauflösung berechnet werden. Anschließend visualisieren wir beide Qualitätsmaße auf der extrahierten Oberfläche mit Hilfe einer Farbkodierung. Für den Piloten ist sofort ersichtlich, welche Bereiche der Szene bereits wie oft fotografiert wurden und mit welcher Bodenauflösung diese rekonstruiert werden können. Diese Darstellung unterstützt den Piloten bei der Gestaltung des Fluges, sodass eine gleichmäßige Abdeckung der Szene mit gleichbleibender Bodenauflösung erreicht wird. Abbildung 6 zeigt das Rekonstruktionsergebnis während des Fluges. Das rot umrandete Bild konnte, im Gegensatz zu den grün markierten Bildern, nicht in die Rekonstruktion integriert werden. Die Bilder, die keine Umrandung besitzen, wurden noch nicht bearbeitet.

4. Testdaten, Genauigkeitsanalyse und Rekonstruktionsergebnisse

Am Beispiel der Rekonstruktion einer typischen Bruchwand eines Tagebaus zeigen wir, dass die UAV gestützte Photogrammetrie in Verbindung mit einer automatisierten Mehrbildauswertung in der Lage ist, eine exakte metrische 3D Rekonstruktion zu erstellen.

Zunächst beschreiben wir den verwendeten Datensatz und die Aufnahme mit einem Multirotorkopter. Wir zeigen, dass unter Zuhilfenahme der Online-Mehrbildauswertung ein Bilddatensatz aufgenommen werden kann, der zu einer

vollständigen Rekonstruktion mit hoher Genauigkeit führt. Weiters zeigen wir, dass auch ohne die Verwendung von händisch vermessenen Passpunkten eine Genauigkeit erreicht wird, die für viele Aufgaben im Tagebau ausreichend ist. Zusätzlich untersuchen wir, wie sich die Skalierungsmethode und die Güte der Kalibrierung auf die metrische Genauigkeit auswirken.

4.1 Testdaten

Die Befliegung der Bruchwand (Abbildung 7) wurde am 18.3.2012 mit einem Okto-rotorkopter „Falcon“ der Firma Asctec durchgeführt (Abbildung 2). Dieser ist mit einer frei dreh- und schwenkbaren hochauflösenden Panasonic Lumix DMC-LX3 Digitalkamera mit einer Brennweite von 24 mm ausgestattet. In der Kamera befindet sich eine SD-Speicherkarte die mit einem WLAN Sender ausgestattet ist, damit die Daten während des Fluges auf einen mobilen PC, der als Bodenstation dient, überspielt werden können und bereits die äußere Orientierung der Bilder errechnet werden kann.

Im Falle der Bruchwand wurden 294 Bilder mit einer Auflösung von 10 Megapixel aufgenommen. Aufgrund der gewünschten Genauigkeit im unteren Zentimeterbereich wurden die Aufnahmepositionen so gewählt, dass eine Bodenauflösung von etwa 1cm pro Pixel erreicht wird. Bei der verwendeten Brennweite und der Annahme, dass die Kamera senkrecht zur Oberfläche steht, entspricht dies einem Abstand von etwa 25 m zwischen Kamera und Oberfläche. Weiterhin wurden die Aufnahmepositionen so gewählt, dass eine Überlappung von etwa 80% vertikal und 30% horizontal besteht. Damit ergeben sich bei einer Länge von 100m etwa 30 Bilder pro Streifen. Um die Fehlerfortpflanzung innerhalb einer einzelnen Reihe zu reduzieren, wurden zu-



Abb. 7: Bildaufnahme von insgesamt 294 Bildern einer Bruchwand am Erzberg

sätzliche Bilder in größerer Entfernung (ca. 50 m) aufgenommen, welche die Bruchwand sowohl fronto-parallel als auch schräg zeigen.

4.2 3D-Punktwolke und Bruchwandprofile

Ausgehend vom aufgenommenen Bilddatensatz und einer bekannten Kamerakalibrierung erhalten wir mit unserer vollautomatischen Rekonstruktionspipeline die äußeren Orientierungen der Bilder sowie eine Punktwolke bestehend aus den rekonstruierten Merkmalspunkten (siehe Abbildung 3). Aufgrund der guten Texturierung der Oberfläche ist die Dichte der Objektpunkte bereits ohne die Anwendung pixelweiser Bild-Matching-Methoden sehr hoch und die Szene gut erkennbar. Abbildung 4 zeigt ein nochmals verdichtetes und texturiertes Modell, in dem bis hin zu feinen Details die Geometrie und Textur der Bruchwand gut erkennbar ist. Aus diesem Modell lassen sich bereits Schnitte der Bruchwand ableiten (Abbildung 8). Im Gegensatz zur Rekonstruktion aus terrestrischen Aufnahmen, bei denen der Kopfbereich der Bruchwand nicht zu sehen wäre, ist hier das gesamte Profil sichtbar. Diese durch die Luftaufnahmen gewonnene Zusatzinformation ist besonders für Anwendungen wie zum Beispiel die Planung der Sprenganlage wichtig.

4.3 Evaluierungsmethode und Genauigkeitsauswertung

In der Bildverarbeitung wird häufig der Rückprojektionsfehler der Objektbeziehungsweise Merkmalspunkte als adäquates Maß für die Beurteilung der Genauigkeit der äußeren Kameraorientierung herangezogen. Für photogrammetrische Anwendungen hingegen ist die Genauigkeit der rekonstruierten Objektpunkte von Interesse. Unsere Evaluierung stützt sich deshalb auf den Vergleich mit bekannten Referenzpunkten.

Zu diesem Zweck wurden an der Bruchwand mit ca. 24 m Höhe und 100 m Länge

Referenzpunkte markiert und mittels klassischer Vermessung mit Totalstation deren Position bestimmt. Abbildung 9 zeigt die Verteilung der Marker an der Bruchwand. Alle Marker sind farblich gut von der Bruchwand unterscheidbar und nummeriert. In der verdichteten Punktwolke bestehend aus ca. 10 Mio. 3D-Punkten sind insgesamt 74 Marker identifizierbar rekonstruiert und können somit eindeutig den händisch vermessenen Referenzpunkten zugeordnet werden.

Da die Anbringung und Vermessung von Referenzpunkten an einer Bruchwand hohen personellen und technischen Aufwand bedeutet, ist diese in der Praxis für eine Sprengplanung

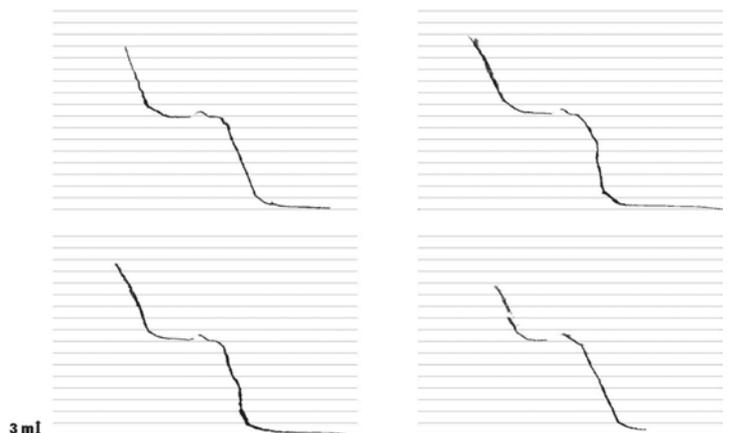


Abb. 8: Bruchwandprofile mit rekonstruiertem Kopfbereich der Abbauterrasse. Im Vergleich zu terrestrischen Aufnahmen ist in den Schnitten der Abbauwand das gesamte Profil sichtbar.

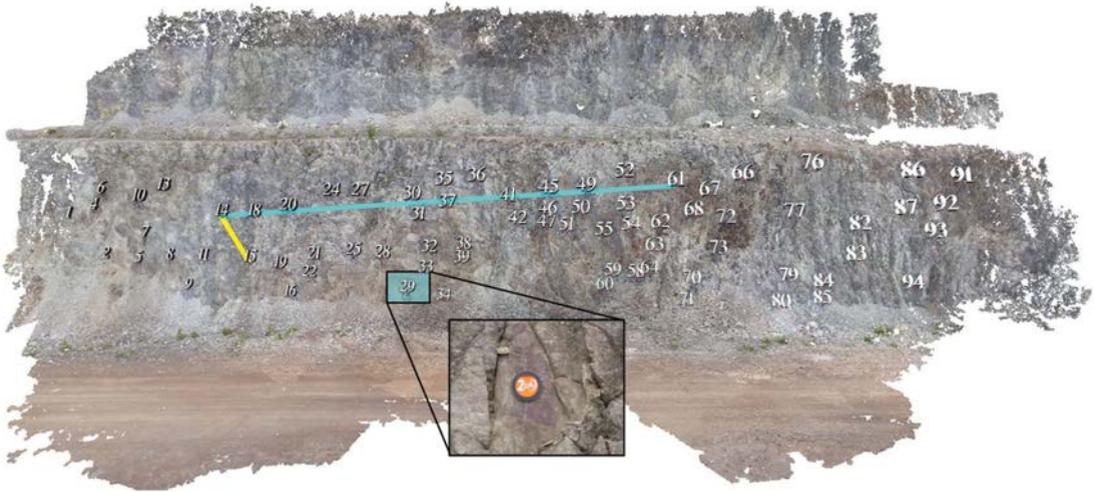


Abb. 9: Anordnung der mit einer Totalstation vermessenen Referenzpunkte an der Bruchwand. Jeder Referenzpunkt ist durch einen nummerierten Marker eindeutig identifiziert. Die bekannten metrischen Entfernungen der mit Linien verbundenen Punkte 14 und 15 beziehungsweise 14 und 61 werden zur Skalierung des rekonstruierten Modells verwendet.

nicht möglich. Das Kosten-Nutzen Verhältnis dafür ist zu hoch. Daher zeigen wir, dass für viele Vermessungsaufgaben im Bergbau eine ausreichende metrische Genauigkeit auch ohne Referenzpunkte erreicht werden kann. Daher werden diese nicht im Bündelblockausgleich berücksichtigt und nur zur Evaluierung herangezogen. Weiterhin zeigen wir den Einfluss der Qualität der Kamerakalibrierung auf die Rekonstruktionsgenauigkeit. Dafür untersuchen wir, wie sich die projektbegleitende Kalibrierung (on-the-job-Kalibrierung) der intrinsischen Kameraparameter während des Bündelblockausgleichs auf das Gesamtergebnis auswirkt.

4.3.1 Skalierung

Die äußere Orientierung der Kameras erfolgt zunächst in einem eigenen Koordinatensystem und ist demnach nicht metrisch. Um die Rekonstruktion in ein metrisches Koordinatensystem zu bringen, gibt es mehrere Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit besteht darin, dass man den Abstand zwischen zwei Kameras während der Aufnahme misst. Da durch die äußere Orientierung die Distanzen zwischen den Kamerazentren im Rekonstruktionsmaßstab und der entsprechende metrische Maßstab bekannt sind, kann ein Skalierungsfaktor berechnet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass der Abstand von zwei rekonstruierten 3D Punkten im metrischen System vermessen wird. Die Bestimmung des metrischen Abstandes zweier Punkte kann sehr günstig und einfach mit einem Laserdistanzmesser geschehen. Im Vergleich zu

einem Theodoliten ist dieser sehr günstig und kann auch von nicht geschultem Personal verwendet werden. [15] hat diese und noch weitere Verfahren zur metrischen Skalierung auf deren Genauigkeit untersucht und argumentiert, dass das Skalieren über zwei (oder mehr) bekannte Szenenpunkte die größte Genauigkeit liefert. Da in unserem Fall die Positionen der Referenzpunkte und damit auch die Distanzen zwischen ihnen bekannt sind, verwenden wir genau eine einzelne gemessene Distanz zur Skalierung der rekonstruierten Szene (Abbildung 9). Im folgenden Abschnitt untersuchen wir, wie die Wahl der zur Skalierung gewählten Distanz die Messgenauigkeit beeinflusst.

4.3.2 Evaluierung der relativen Punktgenauigkeit

Wir betrachten im Speziellen zwei Fälle, um den Maßstab für die metrische Skalierung der Rekonstruktion zu ermitteln. (1) Die Skalierung über zwei vertikale Punkte mit einer kleinen Entfernung von 6.92 m und (2) über zwei horizontale Punkte mit einer großen Entfernung von 52.38 m.

In beiden Fällen berechnen wir die relativen Punktabstände zwischen allen möglichen Punkt-paaren und tragen die Differenz des jeweiligen Punktabstandes zum Abstand der korrespondierenden Referenzpunkte als Datenpunkt über der Referenzlänge auf. Daraus ergibt sich eine Verteilung der relativen Abstandsfehler der Punkte bezogen auf deren Entfernung. Beide Experimente führten wir sowohl mit zu Beginn der Rekonstruktion bestimmten Kameraparametern

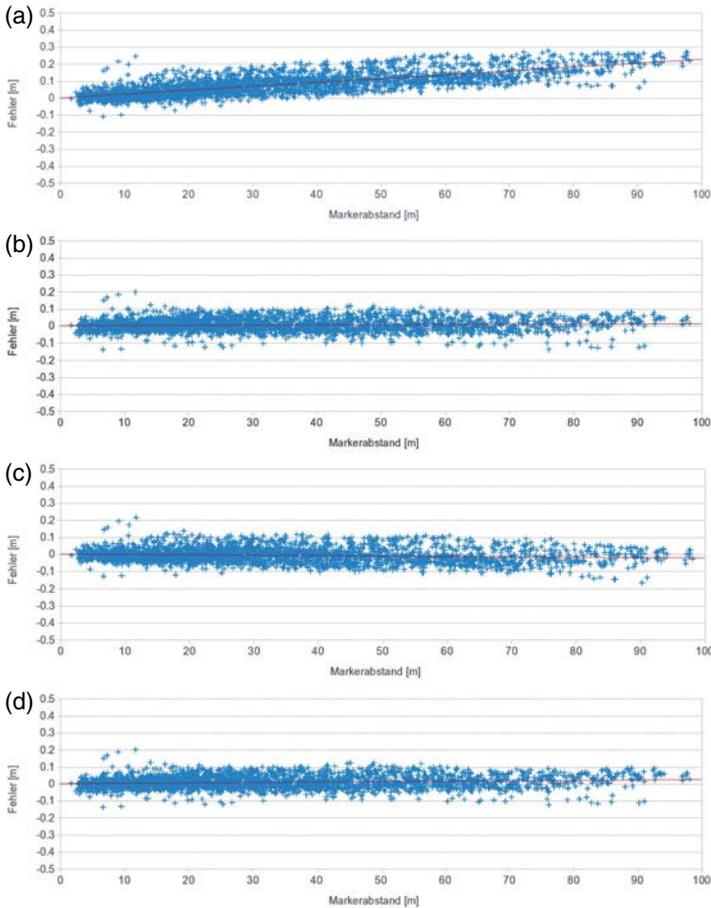


Abb. 10: Relative Fehler der Punktabstände zur Ground Truth (Referenzabstände) bei Skalierung über

(a) eine kurze Distanz mittels der Referenzpunkte 14 und 15 (Kameraparameter für alle Bilder fix),

(b) eine kurze Distanz mittels der Referenzpunkte 14 und 15 (gemeinsame innere Kameraparameter für alle Bilder mittels projektbegleitender Kalibrierung bestimmt),

(c) eine lange Distanz mittels der Referenzpunkte 14 und 61 (Kameraparameter für alle Bilder fix),

(d) eine lange Distanz mittels der Referenzpunkte 14 und 61 (gemeinsame innere Kameraparameter für alle Bilder mittels projektbegleitender Kalibrierung bestimmt).

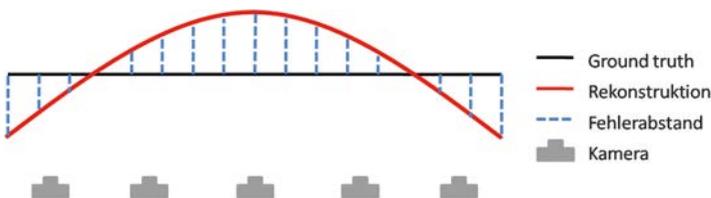


Abb. 11: Schematische Darstellung der Rekonstruktion und Fehlerverteilung. Systematische Fehler entstehen aufgrund einer Verformung des Bildblocks durch den Bündelblockausgleich.

tern für die innere Orientierung, wie auch projektbegleitend mit im Bündelblockausgleich optimierten Kameraparametern durch (siehe Abbildung 10).

Zu beobachten ist, dass bei einer Skalierung über eine kurze Distanz (Abbildung 10a), der relative Fehler der Punktabstände mit der Entfernung zunimmt. Wird die Kamerakalibrierung hingegen beim Bündelblockausgleich projektbegleitend bestimmt und optimiert (Abbildung 10b), verläuft der Fehler über alle Punktdistanzen annähernd konstant. Daraus ist abzuleiten, dass für den Fall von fixen intrinsischen Kameraparametern bereits die Kamerakalibrierung mit größter Sorgfalt durchgeführt werden muss, um Rekonstruktionsungenauigkeiten durch Fehlerfortpflanzung gering zu halten. Bei Skalierung der Rekonstruktion über eine längere bekannte Punktdistanz ist der Unterschied zwischen fixierten (Abbildung 10c) und projektbegleitend optimierten Kameraparametern (Abbildung 10d) weniger ausgeprägt.

Die Art der Skalierung stellt bei projektbegleitender Kalibrierung der Kameraparameter keinen merklichen Unterschied in der Genauigkeit dar. Die Standardabweichung der Fehler im Falle von projektbegleitender Kalibrierung der internen Kameraparameter beträgt bei beiden Skalierungsvarianten ca. 3.8 cm. Somit liegen 99.7% aller Messungen innerhalb einer Genauigkeit von $\pm 11.4\text{cm}$ (3σ), was für die meisten Vermessungsaufgaben im Bergbau absolut ausreichend ist.

4.3.3 Georeferenzierung und absolute Positionsgenauigkeit

Um die absolute Positionsgenauigkeit der rekonstruierten Markerpunkte in Szenenkoor-

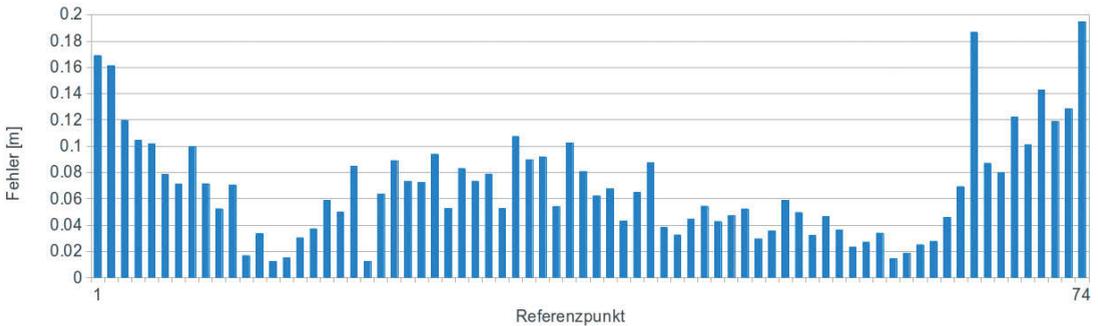


Abb. 12: Absolute Positionsfehler nach Georeferenzierung (gemeinsame innere Kameraparameter für alle Bilder mittels projektbegleitender Kalibrierung bestimmt)

dinaten zu evaluieren, wird die rekonstruierte 3D-Punktswolke der Bruchwand mittels räumlicher Ähnlichkeitstransformation (3D Helmertransformation) in das Szenenkoordinatensystem transformiert. Die Helmertransformation dient dabei zur formtreuen Georeferenzierung der Rekonstruktion aus einem lokalen dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem in ein entsprechendes geographisches, metrisches Zielsystem. Die Methode kann mittels einer Minimalanzahl von nur drei Punktkorrespondenzen zwischen rekonstruiertem Modell und Referenzmessungen berechnet werden. Eine größere Anzahl an Punkten und robuste Schätzung der zur Registrierung nötigen Transformationsparameter (Rotation, Translation und Skalierung) mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erhöhen die Genauigkeit der Ausrichtung des Modells.

Abbildung 12 zeigt eine Auswertung der absoluten Positionsfehler aller rekonstruierten Markerpunkte zu deren Position im Referenzmodell. Daraus ist erkennbar, dass der durchschnittliche Fehler im Zentrumsbereich der Rekonstruktion bei ca. 5 cm liegt. Weiters ist beobachtbar, dass sich der Fehler zu den Rändern hin leicht erhöht. Es kommt zu einer Verformung des Bildblocks durch den Bündelblockausgleich. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 11 gezeigt. Dies ist dadurch erklärbar, dass die Szene zum Rand hin von weniger Bildern gezeigt wird. Weniger Bildüberlapp führt zu weniger Bildmessungen pro Objektpunkt und damit dazu, dass der Epipolar-Graph, wie er in Kapitel 2 beschrieben wurde, an den Rändern weniger Verbindungen hat. Das hat zur Folge, dass das Ergebnis der Optimierung der Kamerapositionen und 3D-Objektpunkte im Bündelblockausgleich weniger stark eingeschränkt wird und sich die Positionen damit stärker verändern können.

Eine Möglichkeit, die durch die Verformung des Bildblocks entstehenden systematischen

Fehler zu vermeiden, ist die Einbringung bekannter Pass- und Kontrollpunkte sowie von direkt gemessenen GPS-Koordinaten der Kamerapositionen in den Bündelblockausgleich, wie dies in der klassischen Photogrammetrie angewendet wird. Dies führt einerseits zu kleineren Residuen, andererseits lässt sich ein gleichzeitiger Übergang in ein entsprechendes Referenzkoordinatensystem bewerkstelligen. Unser Fokus liegt in der rein bildbasierten Rekonstruktion ohne Verwendung von Pass- und Kontrollpunkten, da deren Anbringung und anschließende Vermessung per Totalstation nicht immer möglich und sinnvoll ist. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, dass der Bereich der Befliegung größer gewählt wird als die eigentlich gewünschte Rekonstruktion, beziehungsweise durch eine veränderte, hierarchische Bildaufnahmestrategie, um einen dichteren Epipolar-Graphen zu erhalten. Obwohl unsere Methode rein bildbasierend arbeitet, liegt der mittlere absolute Fehler über alle Messpunkte bei 6.87cm im Vergleich zu den mittels Theodolit vermessenen Markern, und ist damit auch im Bezug auf die absolute Positionsgenauigkeit für die meisten Anwendungen im Bergbau ausreichend.

5. Ausblick

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass mittels eines Multirotor-UAVs aufgenommener Bilder in Verbindung mit einer automatisierten Mehrbildauswertung vollständige und exakte 3D Rekonstruktionen erzeugt werden können. Damit ergeben sich für die Vermessung im Tagebau neue Anwendungen, wie eine exakte Sprengplanung oder regelmäßige Inventuren, die ohne die UAV-gestützte Bildaufnahme personell und zeitlich sehr aufwändig wären.

Das häufig in der Praxis auftretende Problem, dass die während des Fluges aufgenommenen Bilder nicht für eine automatisierte photogrammetrische Auswertung geeignet sind, wird durch das von uns entwickelte System verringert und

macht für viele, speziell kleinräumige Anwendungen eine klassische Flugplanung überflüssig. Eine metrische Skalierung der gewonnenen dreidimensionalen Rekonstruktion ist ohne Vorwissen über die Szene und bereits durch eine einzelne, in der Szene bekannte Distanz möglich.

Der nächste logische Schritt ist es, die Steuerung des UAVs zu automatisieren. Anhand der aktuellen Güte der Rekonstruktion während des Fluges kann das UAV die nächste Position für die Bildaufnahme selbst bestimmen und diese anfliegen. Damit wird sich der Aufwand für die Rekonstruktion besonders bei komplexen 3D-Geometrien wie Brücken oder Gebäuden weiter verringern, und kann somit viele Bereiche der klassischen Vermessung erweitern.

Für das Beispiel des Tagebaus wird die UAV-basierte Photogrammetrie voraussichtlich schon in naher Zukunft eine große Rolle spielen und viele Messaufgaben wesentlich vereinfachen können.

Referenzen

- [1] *Hartley, R. and Zisserman, A.*, Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2000.
- [2] *Lowe, D.*, Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. Journal of Computer Vision* 60(2), pp. 91–110, 2004.
- [3] *Rumpler, M., Irschara, A. and Bischof, H.*, Multi-View Stereo: Redundancy Benefits for 3D Reconstruction. *Proceedings of the 35th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition*, 2011.
- [4] *Nistér, D. and Stewenius, H.*, Scalable recognition with a vocabulary tree. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2161–2168, 2006.
- [5] *Sivic, J. and Zisserman, A.*, Video google: A text retrieval approach to object matching in videos. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 1470–1477, 2003.
- [6] *Nistér, D.*, An efficient solution to the five-point relative pose problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* 26(6), pp. 756–770, 2004.
- [7] *Fischler, M. A. and Bolles, R. C.*, Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. *Communication Association and Computing Machine* 24(6), pp. 381–395, 1981.
- [8] *Haralick, R. M., Lee, C., Ottenberg, K. and Nölle, M.*, Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 592–598, 1991.
- [9] *Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R. and Fitzgibbon, A.*, Bundle adjustment – A modern synthesis. In: *Vision Algorithms: Theory and Practice*, pp. 298–375, 2000.
- [10] *Furukawa Y. and Ponce J.*, Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* 32(8), pp. 1362–1376, 2010.
- [11] *Hirschmüller H.*, Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2005.
- [12] *Hoppe, H.*, Surface reconstruction from unorganized points. PhD Thesis, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, June 1994.
- [13] *Labatut P., Pons J.P. and Keriven R.*, Efficient Multi-View Reconstruction of Large-Scale Scenes using Interest Points, Delaunay Triangulation and Graph Cuts. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2007.
- [14] *Hoppe C., Klopschitz M., Rumpler M., Wendel A., Kluckner S., Bischof, H. Reitmayr G.*, Online Feedback for Structure-from-Motion Image Acquisition. *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2012.
- [15] *Sturzenegger M., Stead, D.*, Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 2009.
- [16] *Irschara A., Rumpler M., Meixner P., Pock T., Bischof H.*, Efficient and Globally Optimal Multi View Dense Matching for Aerial Images. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012.
- [17] *Pfeifer N., Gliira P., Briese C.*, Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Markus Rumpler, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: rumpler@icg.tugraz.at

Dipl.-Ing. Christof Hoppe, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: hoppe@icg.tugraz.at

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Wendel, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: wendel@icg.tugraz.at

AssProf. Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerhard Mayer, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Department Mineral Resources and Petroleum Engineering, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Str. 18, A-8700 Leoben.
E-Mail: gerhard.mayer@mu-leoben.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Horst Bischof, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, A-8010 Graz.
E-Mail: bischof@icg.tugraz.at

Naturgefahrenmonitoring alpiner Prozesse aus multitemporalen UAV- und LIDAR-Daten – Erfahrungen im praktischen Einsatz



Hansjörg Ragg, Klaus Hanke, Innsbruck und Matthias Granig, Schwaz

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) bieten mit hochauflösender Luftbildfotografie eine optimale Maßstabsergänzung zwischen bewährten terrestrischen und luftgestützten Aufnahmemethoden. Der alpine Raum stellt mit starken Reliefunterschieden, schwieriger Topographie und oft unzugänglichen Flächen den Einsatz moderner Kopter- und Flächen-UAVs vor neue Herausforderungen. Erfahrungen beim Einsatz und der Auswertung von UAVs im Zusammenhang mit der Dokumentation von Naturgefahren werden anhand verschiedener Einsatzszenarien (Steinschlag, Holzeintrag in Wildbach, Volumensbestimmung eines Rückhaltebeckens) aufgezeigt und diskutiert.

Schlüsselwörter: Naturgefahren, UAV, Monitoring, multitemporal, alpiner Raum

Abstract

UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) with their potential for high-resolution aerial imaging proved to be an ideal complement to close the metrological gap between terrestrial (close-range) and airborne photogrammetric platforms. Alpine areas with their varying relief and complex topography also lead modern copters and plane UAVs into definitive challenges regarding unapproachable areas. Experiences with the flight operation and the evaluation of data for the documentation of natural hazards are shown and various mission scenarios (falling rocks, wood impact into mountain torrent, volume estimation of retention pool) are discussed.

Keywords: Natural hazards, UAV, monitoring, multi-temporal, alpine space

1. Einleitung/Problemstellung

Unbemannte Flugzeuge, sogenannte Drohnen oder Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) (Abbildung 1) dienen neben dem Einsatz in ursprünglich militärischen, polizeilichen Bereichen auch vermehrt zivilen Anwendungen [1, 2, 3, 4, 5]. Kostengünstig und rasch einsatzbereit dienen diese Flugobjekte zur Erfassung von Geodaten vor allem in kleinräumigen Gebieten, unter anderem im Katastrophenschutz und -management [6, 7]. Bestückt mit digitalen Kameras schließen sie die messtechnische Lücke zwischen terrestrischer (Nahbereichs-) Photogrammetrie und der klassischen Luftbildmessung. Damit vermeiden diese photogrammetrischen Plattformen sowohl das Problem der sichttoten Räume bei terrestrischen Standpunkten als auch die kleinen Bildmaßstäbe und vor allem hohe Kosten beim Einsatz von herkömmlichen Messflugzeugen [3]. Die UAV-Photogrammetrie stellt daher keine konkurrierende sondern eine, zu Nahbereichsphotogrammetrie und Luftbildmessung für

spezielle Anwendungen besonders geeignete, komplementäre Technologie dar. Eine detaillierte und grundlegende Einführung in die Thematik der UAVs liefert u.a. Eisenbeiss in [7].

Durch die verschiedenen Möglichkeiten, die Kamera am UAV zu montieren, werden nicht nur Senkrechtaufnahmen, sondern auch Schrägaufnahmen in fixen Winkeln sowie auch das fern ausgelöste oder vordefinierte Schwenken der Kamera während des Einsatzes möglich [8]. Die sich daraus ergebenden Bildverbände zeichnen sich durch eine hohe Überlappung und damit starke Redundanz der aufgenommenen Daten aus. Sind in der herkömmlichen Flugplanung Überlappungen von 60% in Längs- und 20% in Querrichtung üblich, so können aufgrund der geringen Flugkosten bei UAVs Überlappungen von 80% und mehr sowohl in Längs- als auch in Querrichtung realisiert werden [3, 4, 8, 9, 10]. Damit ergeben sich in Kombination mit neuen Auswertestrategien und Matching-Ansätzen [9,

10, 11, 12], in denen jeder Bildpunkt eines Fotos mit korrespondierenden Punkten in sämtlichen Nachbarbildern korreliert wird, einerseits ganz neue Herausforderungen an die Flugplanung und andererseits hochredundante und daher robuste Möglichkeiten zur Herstellung von digitalen Oberflächenmodellen und Orthophotos.

Ein weiterer Vorteil dieser Technologie liegt neben dem bereits erwähnten günstigen Kostenfaktor in der raschen und kurzfristigen Einsetzbarkeit der UAVs, was sie dadurch für Anwendungen im Katastrophenmanagement besonders prädestiniert [5, 13]. In der Folge können neben dem bloßen Bild als maßstabsfreie Informationsquelle für Interpretationen, innerhalb kurzer Zeit auch Auswertungen wie digitale Oberflächenmodelle (DOM) und digitale Orthophotos (DOP) generiert werden, um im Katastrophenfall als aktuelle Grundlage für politische Entscheidungsträger und Einsatzleiter von Rettung, Feuerwehr und anderen Einsatzkräften zu dienen.

Mit den Vermessungsdrohnen (UAVs) steht uns ein messtechnisches System zur Verfügung, das – sehr flexibel und mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung – zuverlässige Geodaten auch in schwer zugänglichen Gebieten und unter schwierigen Verhältnissen liefern kann. Diese Vorzüge sollen im Folgenden an praktischen Beispielen aus dem alpinen Raum verdeutlicht werden. In allen durchgeführten Projekten kamen Hexa- oder Oktokopter mit schwenkbaren Kamerasystemen, welche vorab mittels Testfeld kalibriert wurden, zum Einsatz.



Abb. 1: Hexakopter bestückt mit Ricoh-GXR Kamera. Flugzeit: 30 Minuten (Foto: GRID-IT)

2. Anwendungen aus der Praxis

2.1 Beurteilung und Dokumentation von Felssturzereignissen – Multitemporale Auswertung von UAV-Befliegungen

Problemstellung / Ausgangssituation

Die Beurteilung, Dokumentation und Überwachung von Sturzprozessen im Gebirge stellt, besonders wenn Siedlungen und Infrastruktur gefährdet sind, eine große Herausforderung dar. Die notwendige rasche Entscheidungsfindung nach Ereignissen basiert meist auf Erkenntnissen von örtlichen Begehungen der Experten und leider oft auch auf veralteten Datengrundlagen. Begehungen sind im Katastrophenfall durch die akute Gefährdung oftmals nicht durchführbar, weshalb die Gefahrenbeurteilung erheblich erschwert wird.



Abb. 2: UAV-Luftbilddokumentation des Felssturzereignisses im Oktober 2012. Ein Fels (mit Pfeil gekennzeichnet) markiert die beim Sturz verursachte Waldschneise.

Im aufgezeigten Anwendungsfall wurden nach dem Abbruch eines etwa 30 m^3 großen Felsens Risse im darüber liegenden Hang entdeckt, die als Hinweis auf ein künftig mögliches größeres Ereignis zu beurteilen waren. Der Interessensbereich befindet sich ca. 350m oberhalb einer Siedlung an einer ca. 35° steilen Bergflanke und durfte aufgrund der akuten Gefährdung großflächig nicht betreten werden [13]. Der Fels (in Abbildung 2 mit Pfeil markiert) schlug eine Schneise durch den Wald und kam kurz vor der Siedlung, am Gegenhang des Bachbetts, zum Stillstand. Die Dokumentation dieser Situation und eine Rekonstruktion zur Durchführung einer Veränderungsanalyse sollte im Bereich der Abbruchstelle auf Basis multitemporaler UAV Luftbildphotogrammetrie durchgeführt werden.

Durchführung

Der beinahe senkrechte Felsvorsprung, sowie die zu überwindende Höheunterschiede stellten die größte Herausforderung an die UAV-Kampagne dar. Die Festlegung der Flugroute erfolgte unter Berücksichtigung des vom Land Tirol zur Verfügung gestellten LIDAR-Oberflächenmodells und verlief nahezu hangparallel in einer Höhe von 80m über Grund (Abb. 3). Einzelne Flugstreifen in verschiedenen Höhenstufen direkt über der Ausbruchsregion sollten eine photogrammetrische Stereoauswertung ermöglichen.

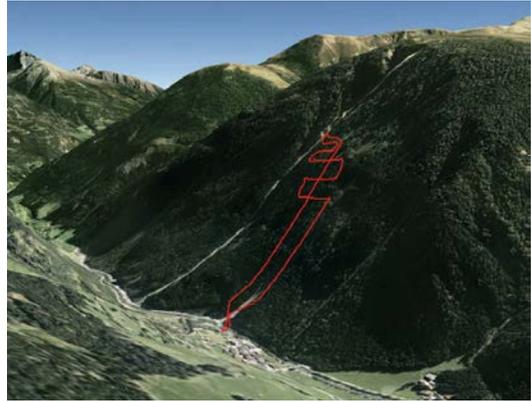


Abb. 3: Flugroute des photogrammetrischem Bildflugs zur 3D Rekonstruktion der Ausbruchregion

Die Überlappung wurde auf 80% Längs- und Querüberdeckung festgelegt, was einer Aufnahmebasis von ca. 18m entspricht. Um die geforderte Bodenauflösung $< 2\text{ cm}$ zu erzielen wurde eine Kamera des Typs Ricoh GXR mit 33mm Brennweite eingesetzt. Die Kamera war am Kopter schwenkbar montiert, wodurch selbst im steilen Gelände eine annähernd orthogonale Ausrichtung zum Hang und somit konstante Bodenauflösung gewährleistet werden kann. Aufgrund des strikten Betretungsverbots konnten keine Passpunkte terrestrisch eingemessen aber



Abb. 4: Das Kluftsystem oberhalb des Felsabsatzes

eine näherungsweise Georeferenzierung des Bildverbandes [14, 15] aus den aufgezeichneten Positionsdaten des Kopters erzielt werden. In einem weiteren Schritt wurde durch Transformation auf das bestehenden LIDAR Oberflächenmodell die absolute Lage auf ± 1 m verbessert.

Ergebnisse

Eine Interpretation der UAV-Luftbilder konnte durch die Geologen unmittelbar nach der Landung durchgeführt werden. Die in Abbildung 4 dargestellten Klüfte (manuell schematisch eingezeichnet) oberhalb der Abbruchstelle sind deutlich zu sehen und müssen künftig in regelmäßigen Abständen beobachtet werden. Weiten sich die ca. 30 cm breiten Risse, besteht die Gefahr eines Ereignisses, dessen Volumen deutlich größer als die bisherigen Vorboten sein könnte und damit auch Infrastruktur und Siedlung betreffen kann.

Die photogrammetrische Auswertung erfolgte mit der vom IGN France entwickelten OpenSource Software APERO/MICMAC [17, 18]. Im Zuge der Aerotriangulation wurden Abweichungen der inneren Orientierung zur vorausgegangenen Kamerakalibrierung festgestellt, die vermutlich durch Außentemperaturen um den Gefrierpunkt hervorgerufen wurden. Um dem entgegenzuwirken, wurden zusätzliche Passpunkte aus dem existierenden LIDAR Oberflächenmodell extrahiert und in den Auswerteprozess eingeführt. Die

Bildweite der Kamera konnte im Bündelblockausgleich als freier Parameter eingeführt und die innere Orientierung optimiert werden. Abbildung 5 stellt die mittels „Dense Matching“ [9] aus 29 Luftbildern automatisch abgeleitete texturierte Punktwolke dar. Als Hintergrund ist der 1 m aufgelöste Laserscan des Landes Tirols dargestellt. Die photogrammetrische Punktwolke weist eine Dichte von ca. 1000 Punkte/m² auf, wobei zwischen Bewuchs und freiem Gelände hinsichtlich Genauigkeitserwartungen unterschieden werden muss. Das für die Aufgabenstellung interessante Fels- und Wiesengelände konnte mit einem sehr hohen Detailgrad rekonstruiert und so für weitere Analysen herangezogen werden. Regionen mit starkem Bewuchs wurden unzureichend dicht und nur mit hohen Unsicherheiten („Rauschen“) abgeleitet und deshalb von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Der zwei Wochen später stattfindende Zweitflug wurde relativ zum ersten Bildflug georeferenziert, um die multitemporale Analyse zu gewährleisten. Hierzu wurden aus der Punktwolke des Erstflugs 10 Punkte ausgewählt und als Passpunkte für die photogrammetrische Auswertung des Zweitfluges herangezogen. Die Veränderungsdetektion wurde im GIS System mittels der multitemporalen Orthophotos durchgeführt, indem die Klüfte manuell digitalisiert, bemaßt und von den Experten interpretiert wurden. Eine dreidimensionale Veränderungsanalyse auf Basis der

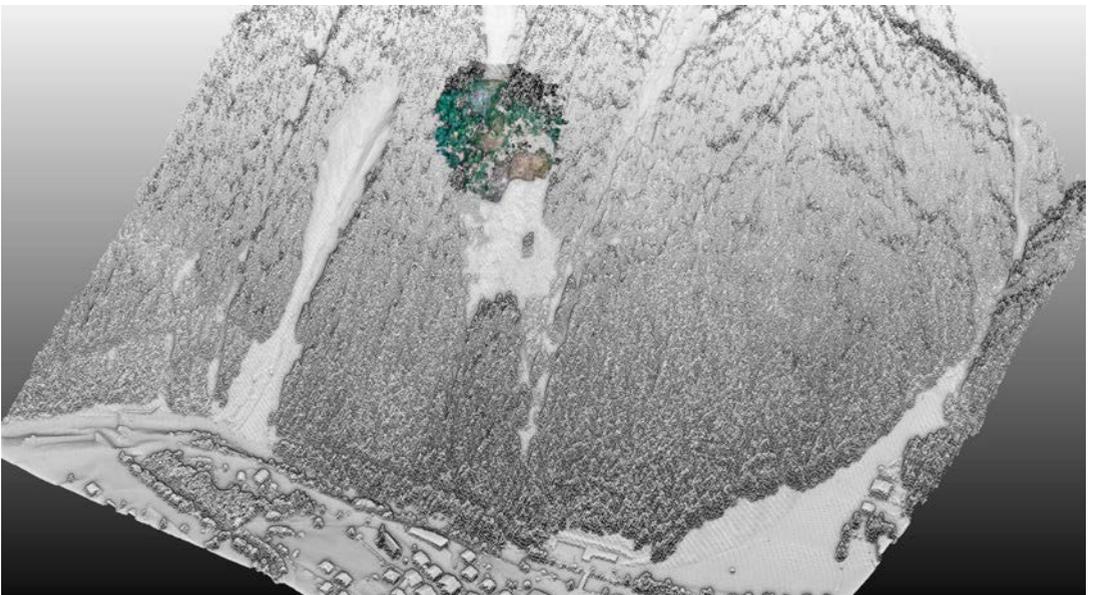


Abb. 5: Perspektivische Ansicht der LIDAR- (grau) und der photogrammetrisch abgeleiteten UAV Punktwolke (farbig)

multitemporalen Punktwolken aus MICMAC brachte dagegen nur unzureichende Ergebnisse für eine Beurteilung. Die Bewegungsraten waren mit unter 5 cm in der Größenordnung des „Rauschens“ der Punktwolke und sind deshalb nicht aussagekräftig.

Das Fallbeispiel demonstriert die bereits weit entwickelte UAV Technologie und deren Einsatzmöglichkeiten im Gebirge, speziell im Bereich der Naturgefahrenokumentation und -überwachung. Gerade bei Wiederholungsflügen vermindert sich der Aufwand für die Flugplanung und kann so zeitnah und kostengünstig durchgeführt werden. Besondere Anforderungen werden hinsichtlich Überlappung, Drehwinkel (Verkipfung der Kamera) und zu erreichende Bodenauflösung im Vergleich zur klassischen Luftbildphotogrammetrie an die UAV Aufnahmen gestellt. Dies ist bei der Flugplanung, im Sinne einer optimalen Kameraausrichtung orthogonal zum Böschungswinkel und der zu erzielenden Bodenauflösung, sowie im Auswerteprozess bei der Auswahl der Softwarekomponenten zu berücksichtigen.

2.2 Retentionsbecken Bachertal – Analyse in Verbindung mit Laserscandaten

Problemstellung/Ausgangssituation

Das Bachertal befindet sich im Gemeindegebiet von Neustift im Stubai und wurde vor allem wegen der gleichnamigen Lawine, welche zuletzt im Jahre 1951 bis zum Ortskern vordrang, bekannt. Die in den 1950er Jahren errichtete Anrissverbauung zum Schutz der Siedlung wurde zuletzt durch den Bau eines Retentionsbeckens oberhalb des Ortsgebiets ergänzt. Diese Maßnahme diente einerseits dazu, dem wachsenden Siedlungsdruck gerecht zu werden und zum anderen, dem erhöhten Bedürfnis der Bevölkerung nach Schutz zu genügen.

Durchführung

Um flächige Aussagen über Setzungen des Aufschüttungsgeländes, den Vegetationszuwachs im Becken und bauliche (Massen-)Veränderungen im direkten Einflussbereich des Beckens zu ermöglichen, wurde das Gebiet im Juli 2012 mit einem TWIN-HEX-Kopter (Abbildung 1) photogrammetrisch aufgenommen. Die Befliegung wurde mit einer Ricoh GXR Kamera durchgeführt, mit dem Ziel ein 5 cm Oberflächenmodell des Gebiets zu erstellen. Auf Basis einer Differenzanalyse zwischen dem UAV Oberflächenmodell und der LiDAR-Landesaufnahme aus dem Jahr 2006 sollten Höhenänderungen im Dezimeterbereich detektiert werden.

Aufgrund des stark ansteigenden Reliefs und des hohen Fichtenbewuchses erwies sich vor allem der taleinwärts gelegene Teil des Beckens aufgrund der Enge und des damit resultierenden geringen Manövrierplatzes als schwierig für die Flugplanung. Die Ricoh GXR Kamera wurde mit einem 18mm Objektiv ausgestattet, um durch den relativ großen Öffnungswinkel die erfasste Aufnahmefläche insgesamt über die eigentliche Flugstrecke hinaus zu erweitern. Durch die in der GRID-Flightmanager Software durchgeführte Kollisionsprüfung konnte auf Basis des vom Land Tirol zur Verfügung gestellten Oberflächenmodells der Flugpfad sicher gestaltet werden. In Abbildung 6 ist der manuell definierte Flugweg (schwarz) inklusive Kamera-Auslösepunkte (gelb) dargestellt. Die relativen Flughöhen werden als Färbung des Orthophotos dargestellt und unterstützen so die Flugplanung. Die rot eingefärbten Gebiete stellen die Kollisionszonen dar, wohingegen orange und gelb jeweils mit 10 m bzw. 20 m den Mindestabstand visualisieren.

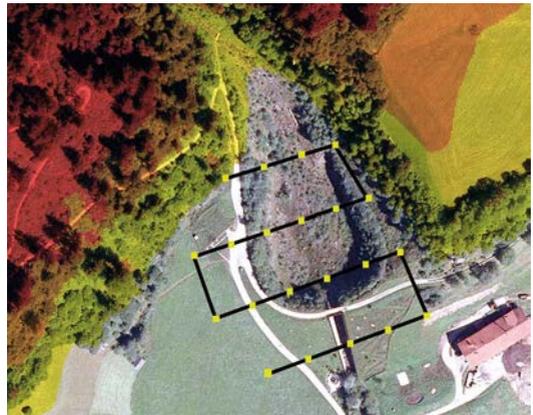


Abb. 6: Flugplan mit vordefinierten Auslösepunkten. Im Hintergrund farbig (rot, orange, gelb) hinterlegt die Kollisions- bzw. Hinderniswarnungen des Flugpfades.

Aus einer Höhe von ca. 80m über Grund wurden in einem rund 6 Minuten dauernden Flug 21 Luftbilder aufgenommen. Die Kombination aus Kameraparametern und Flughöhe ließ eine Bodenauflösung von 4cm erwarten. Um die Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen, wurden 6 Passpunkte tachymetrisch vermessen und in den Auswerteprozess eingeführt.

Ergebnisse

Die photogrammetrische Auswertung erfolgte mit dem Open Source Paket APERO/MICMAC [17, 18]. Die Ergebnisse der Triangulation weisen eine Standardabweichung der Passpunktkoordinaten von < 4 cm in der XY und < 6 cm in der Höhe auf. Nachfolgend wurde ein Dens-

Matching mit MICMAC durchgeführt und so eine fototexturierte, dreidimensionale Punktwolke (Abbildung 7) mit einem mittleren räumlichen Punktabstand von 3cm erzeugt, welche in einem weiteren Schritt zu einem „True-Orthophoto“ und einem gerasterten Oberflächenmodell mit 5cm Rasterweite verarbeitet wurde. Die hohe Auflösung, sowie gut erkennbare Strukturen aller Oberflächenelemente erlauben dem densmatching Algorithmus eine gute Pixelkorrelation jeglicher Oberflächen. Besonders hervorzuheben ist hier die gute Oberflächenrekonstruktion bei vorhandenen Vegetationselementen.

Mithilfe der Ergebnisse der Höhendifferenzen (Abbildung 8) zwischen dem 2006 aufgenommenen LIDAR Oberflächenmodell und dem aktuellen UAV-Modell ließen sich Antworten auf die geforderten Aufgabenstellungen ableiten. Im 6-jährigen Zeitraum zwischen den Aufnahmen konnte eine maximale Höhenänderung der Vegetation im Becken von 5 m festgestellt werden. Desweiteren konnte die Giebelhöhe des neu errichteten Wirtschaftsgebäudes auf der orographisch links liegenden Terrasse mit 3,6m bestimmt werden. Die Quantifizierung von Volumina konnte auch für die Erdbewegungen im Zuge der Böschungsschüttung vor dem Wirtschaftsgebäude durchgeführt werden. Hierbei entspricht das abgetragene Volumen (blau) bis auf 4% jenem der Aufschüttung auf der Terrassenfront (rot). Jegliche Volumensänderungen sind durch manuelles abgrenzen/digitalisieren im Differenzmodell einfach und rasch zu erledigen. Großflächigere Setzungen im Wiesenbereich südlich des Beckens konnten nicht festgestellt werden.

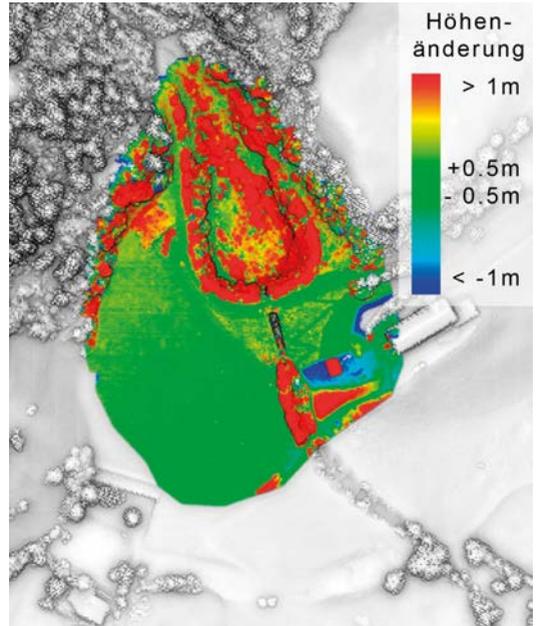


Abb. 8: Höhendifferenzen zwischen LIDAR- und UAV-Punktwolke. Rot stellt den Zuwachs >1m, blau die Abnahme <-1m dar

Der skizzierte UAV Anwendungsfall zeigt die Möglichkeiten der flächenhaften Aufnahme von Schutzbauwerken und exemplarisch mögliche Analysen auf. Hervorzuheben ist vor allem der geringe Zeitbedarf (ca. ½ Tag) und die Möglichkeit zusätzlich das umgebende Gebiet zu erfassen. Der dargestellte Ablauf kann vielfältig für die dreidimensionale Dokumentation und Veränderungsanalyse im Bereich Schutzbauwerke gegen Lawinen, Muren, Hochwasser etc. angewandt werden.

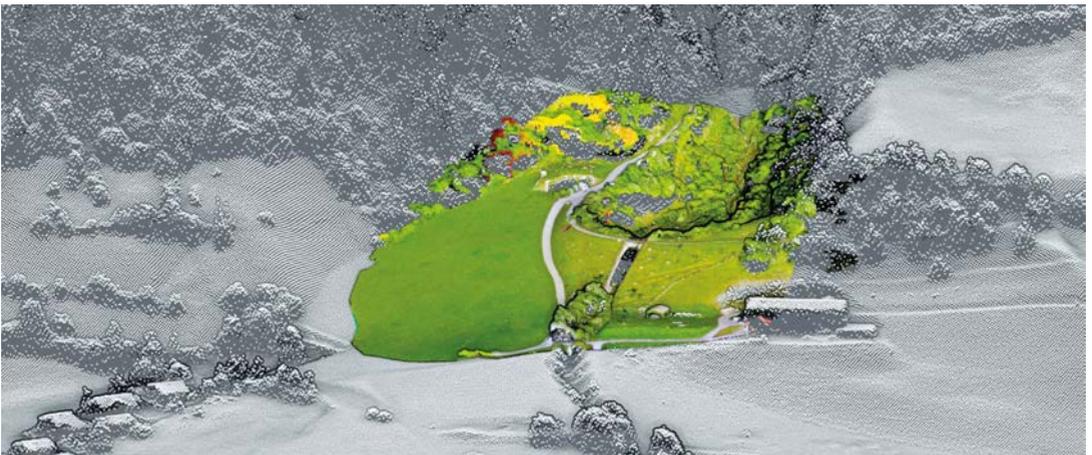


Abb. 7: Perspektivische Ansicht der photogrammetrisch abgeleiteten 3D Punktwolke mit einem mittleren Punktabstand von 4 cm

2.3 Beurteilung des Verklauungspotentials durch Totholzeintrag im Einzugsgebiet von Wildbächen

Problemstellung

Eine Verklauung von Wildbächen durch Totholz kann das Aufstauen und ein Ansteigen der Sohle zur Folge haben. Ein möglicher Durchbruch der Verklauung wiederum kann zu einem Murenabgang führen und stellt somit eine Bedrohung für Mensch und Infrastruktur dar [19]. Vor allem die durch die Gewässerdynamik verursachte Erosion, sowie Hangrutschungen an den Flanken können den Holzeintrag auslösen. An exponierten Stellen kommen desweiteren auch Wind- und Schneebruch als Verursacher hinzu [16].

Zu deren Vermeidung wurde auf Gemeindeebene die sogenannte Wildbachbegehung eingerichtet, welche im §101 Abs. 6 und 7 des Forstgesetzes geregelt ist. Aufgrund der häufig vorliegenden Unzugänglichkeit dieser Gebiete kann dieses gesetzlich vorgeschriebene Vorgehen jedoch eine massive Gefährdung für die beauftragte Person darstellen. Aus diesem Grund wurde die Eignung von UAV-Koptern als Aufnahme- und Dokumentationsmethode für nicht zugängliche und schwer einsehbare Wildbäche im alpinen Raum erprobt und die verschiedenen Prozessierungsstadien der erhobenen Daten (Luftbild, Orthophoto, Oberflächenmodell) anschließend auf deren Eignung zur Erfüllung des Auftrags des Forstgesetzes überprüft.

Durchführung

Aufgrund der vorwiegend engen Talgeometrie kam für die Befliegung ein Hexakopter mit

schwenkbarer Kamera zum Einsatz. Der Kopter wurde mit einer Ricoh GXR Kamera mit einem 33mm Objektiv bestückt, wodurch im Vergleich zu dem in 2.1 und 2.2 genannten Anwendungsfällen mit größeren Flughöhen gearbeitet und dennoch eine hohe Bodenauflösung gewährleistet werden konnte. Entscheidende Kriterien bei der Flugplanung waren die Auswahl eines geeigneten Start- und Landeplatzes mit möglichst ungehinderter Sicht auf den fliegenden Kopter und die reliefbedingt schwierige Definition der durch große Höhenunterschiede schwierigen Flugroute. Die reliefbedingten Einschränkungen des GPS Empfangs erschwerten zusätzlich die Durchführung des autonomen Fluges. Der technisch und rechtlich limitierte Operationsradius erforderte die Einrichtung getrennter Flugbereiche für jeden Wildbachabschnitt. Jeder dieser Bereiche wurde in zwei Flugstreifen (Hin- und Rückflug) und einer Überlappung von ca. 80% aufgenommen.

Ergebnisse

Die visuelle Beurteilung der originalen UAV Luftbilddaufnahmen durch Experten, ohne weitere photogrammetrische Auswertung, erwies sich in diesem Stadium als zielführend. Durch die niederen Flughöhen konnten Bodenauflösungen zwischen 3 und 10 cm erzielt werden. Bereits aus diesen Luftbildern kann ein Gefährdungszustand in terrestrisch nicht einsehbaren Bereichen erkannt und ein möglicher Handlungsbedarf abgeleitet werden. Der Vorteil liegt in der Verortung von Gefahrenstellen, basierend auf den Auslösepunktes der einzelnen Luftbilder, welche aus den GPS Daten des UAV extrahiert wurden. Orthophotomosaiken erwiesen sich durch ihre

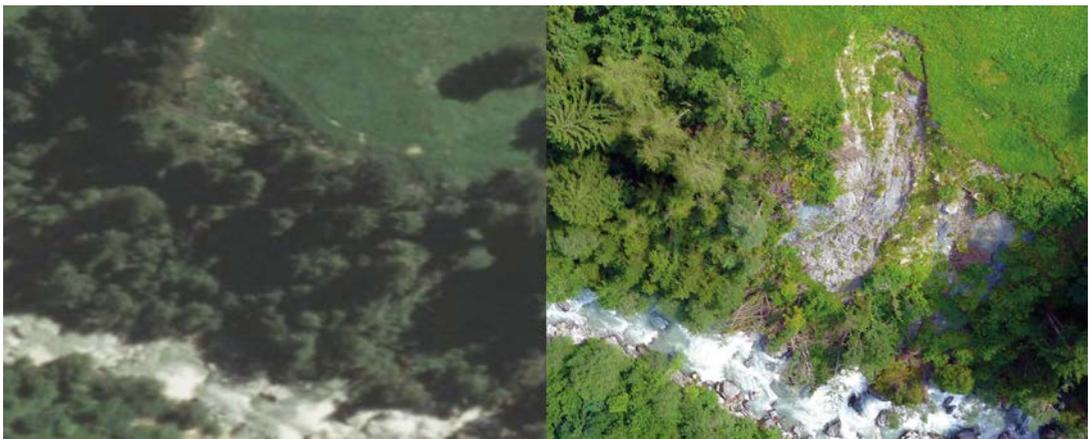


Abb. 9: Durch eine Hangrutschung bedingter Eintrag von Totholz. Im Vergleich, links das Orthophoto aus 09/2010 © Land Tirol und rechts, derselbe Ausschnitt für das Luftbild der UAV-Kampagne 08/2012 mit einer Bodenauflösung von 3 cm.

Größe und die notwendige Software/Viewer nur als zweitbeste Wahl, die Prozessierung zu einer 3D Punktwolke war zu aufwändig und für die Aufgabenstellung nicht rentabel. Aus diesen Gründen wurde auf georeferenzierten Einzel-Luftbilder zurückgegriffen, welche die Lage einer Verklauung oder sonstigen Gefahrenstelle ausreichend verortet interpretieren lassen, sodass vom Büro aus der Handlungsbedarf gezielt festgelegt und geplant werden kann. In einem weiteren Schritt ist angedacht, die Luftbilder künftig als WMS Dienst bereitzustellen. Eine Entkopplung zwischen UAV-Team und Waldexperten wäre so möglich und vor allem bei Wiederholungsflügen erstrebenswert.

Einen Spezialfall stellen Untersuchungen von Hangrutschungen dar, für welche selektiert Orthophotos abgeleitet werden, um die Veränderungen festzustellen. Hangbewegungen an den Seitenflanken von Bächen lassen sich auf diese Weise per UAV sehr gut dokumentieren und einen eventuell notwendigen Handlungsbedarf ableiten. Abbildung 9 stellt für eine solche Rutschung die Situation der Jahre 2010 und 2012 gegenüber. Die wesentlich höhere Bodenauflösung, die optimaleren Licht/Schatten-Verhältnisse bei niederen Flughöhen sowie die Möglichkeit kürzere Dokumentationsintervalle zu realisieren, prädestinieren UAV-Befliegungen als Instrument für das Monitoring von durch diese Hangrutschungen ausgelösten Holzeintrag.

Abbildung 10 zeigt ein Beispiel von Holzmassen, welche durch die Erosion der Gewässerdynamik in das Bachbett eingetragen wurden und so ein potentiell Transportgut mit der dazugehörigen Verklauungsgefahr darstellen. Aus diesen UAV Aufnahmen ist durch Experten die Abgrenzung und Verortung von Schadholz von Holz möglich, welches wirtschaftlich in Wert gesetzt werden kann. Weitere Schritte zu dessen



Abb. 10: Totholzeintrag in das Bachbett als Folge von Seitenerosion aufgrund der Gewässerdynamik

Beseitigung können mit den generierten Daten festgelegt und einleitet werden.

3. Ausblick

Gerade im Bereich der Ereignisdokumentation von Muren, Lawinen und Felsstürzen können UAV-Bilder und die daraus resultierenden Geodaten als Basis für Entscheidungen, zur Dokumentation und zur Maßnahmenplanung herangezogen werden. War man bisher auf Flugzeug und Hubschrauberflüge angewiesen, welche kostspielig und nur bei Großereignissen zu rechtfertigen sind, können die UAV-Fluggeräte hingegen zeitnah und kostengünstig eingesetzt werden. Beim Prozessierungsgrad müssen zwei Stadien unterschieden werden. Einerseits die direkte Interpretation der Luftbilder, welche sofort nach der Landung mittels GPS grob verortet und interpretiert werden können und andererseits die weiterführende photogrammetrische Auswertung zu Oberflächenmodellen und Orthophotos. Verortete Luftbilder sind für viele Fragestellungen im Naturgefahrenmanagement bereits ausreichend und können kostengünstig und zeitnah erstellt werden. Die photogrammetrische Auswertung hingegen benötigt Zeit und bedeutet dadurch einen Mehraufwand, welcher sich vor allem für geometrische Fragestellungen, wie Volumsbestimmungen und räumliche Veränderungsanalysen, lohnt.

Die multitemporale Schadensdokumentation und -analyse von gefährdeten Bereichen sowie die gemeinsame Verwendung von LiDAR und UAV Oberflächenmodellen wurden im vorliegenden Beitrag aus praktischer Sicht dargestellt. Damit ist ein effizienter und kostengünstiger Einsatz von UAV Technologie im Bereich der Erfassung von Geodaten vor allem in kleinräumigen Gebieten möglich.

Künftig sollen UAVs auch bei exponierten und/oder schwer zugänglichen Baustellen für Vermessungsaufgaben und zur Dokumentation des Baufortschrittes eingesetzt werden. Im Bereich des Lawinenschutzes der Wildbach- und Lawinerverbauung bestehen Bestrebungen den Grad der Verfüllung von Stützverbauungen in Anbruchgebieten oder auch die Überschneidung der Lawinenwerke flächig zu erheben, um den aktuellen Schutzgrad der Maßnahmen feststellen zu können. Desweiteren eignen sich die hochauflösenden UAV Oberflächenmodelle im Bereich der Modellierung von Naturgefahrenprozessen als aktuelle Grundlage für numerische Simulationenläufe.

Danksagung

Die Autoren danken dem Land Tirol für die Überlassung der LIDAR Daten sowie der Vereinigung der Waldaufseher und Forstwärter Tirols und den MitarbeiterInnen der Landesgeologie Tirol für die fachliche Interpretation der Luftaufnahmen.

Referenzen

- [1] *Eisenbeiss, H. & Sauerbier, M. (2011):* Investigations of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. In: *The Photogrammetric Record* 26, 400-421.
- [2] *Gülch E., 2011,* Photogrammetric evaluation of multi-temporal fixed wing UAV imagery. *ISPRS Archives, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.*
- [3] *Haala, N., Cramer, M., Weimer, F. and Trittler, M., 2011.* Performance Test on UAV-based data collection. *Proc. of the International Conf. on UAV in Geomatics. IAPRS, Volume XXXVIII-1/C22, 2011.*
- [4] *Abdel-Wahab, M., Wenzel, K. & Fritsch D., 2011.* Reconstruction of Orientation and Geometry from large Unordered Datasets for Low Cost Applications. *Proceedings LC3D Workshop, Berlin, December 2011*
- [5] *Insu, Lee , Jihun. Kang , Gabsoo. Seo, 2012.* Applicability analysis of Ultra-Light UAV for flooding site survey in South Korea. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W1, ISPRS Hannover Workshop 2013, 21 – 24 May 2013, Hannover, Germany*
- [6] *Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011.* UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling — Current status and future perspectives. *ISPRS Archives, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland*
- [7] *Eisenbeiss, H., 2009.* UAV Photogrammetry. Dissertation Nr. 18515, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, Switzerland, Mitteilungen Nr.105.
- [8] *Grenzdörffer G., Niemeyer F., Schmidt F., 2012.* Development of Four Vision Camera System for a Micro-UAV. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia*
- [9] *Haala, N. (2011):* Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching – In: *Fritsch, D. (2011):* Photogrammetrische Woche 2011, Stuttgart, Deutschland.
- [10] *Arnold Irschara, Markus Rumpler, Philipp Meixner, Thomas Pock and Horst Bischof,* Efficient and Globally Optimal Multi View Dense Matching for Aerial Images. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia*
- [11] *Pollefeys, M., Vergauwen, M. and Van Gool, L., 2000.* Automatic 3D Modeling from Image Sequences. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII B5/2, pp. 619–626.*
- [12] *Photomodeler Scanner," EOS, [Online]. Available: http://www.photomodeler.com. [Zugriff am März 2012].*
- [13] *Ragg H., Hanke K., Jörg P., Kleindienst H. und Granig M., „Erfahrungen beim Einsatz photogrammetrisch kalibrierter UAVs bei Naturgefahren im alpinen Gelände,“ In: Hanke, K. und Weinold T. (Hrsg.): 17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2013, Wichmann, 2013, pp. 271-274.*
- [14] *Pfeifer N., Glira P. und Briese C., „Direct Georeferencing with on Board Navigation Components of Light Weight UAV Platforms,“ in s International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B7, 2012, pp. 487-492.*
- [15] *Blaha, M., Eisenbeiss, H., Grimm, D. and Limpach, P., 2011.* Direct georeferencing of UAVs. In: *ISPRS Archives, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland*
- [16] *Bundesamt für Umwelt, „Totholz in Fließgewässern – BAFU,“ [Online]. Available: www.bafu.admin.ch/landschaft*
- [17] *Pierrot-Deseilligny M. und Clery I., „An Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of Set of Images,“ IAPRS&SIS, Vol. 38(5/W16), 2011.*
- [18] *Pierrot-Deseilligny M. und Paparoditis N., „A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery,“ International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 36 (Part 1/W41), 2006.*
- [19] *„Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT“, Schweizer Eidgenossenschaft, [Online]. Available: http://www.planat.ch/de/wissen/ueberschwemmung/verklaeuung/. [Zugriff am 14 März 2013].*

Anschrift der Autoren

Ing. Hansjörg Ragg, MSc., GRID-IT, Gesellschaft für angewandte Geoinformatik mbH, Technikerstr. 21a, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: ragg@grid-it.at

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Hanke, Leiter des Arbeitsbereichs Vermessung und Geoinformation, Universität Innsbruck, Technikerstrasse 13, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: klaus.hanke@uibk.ac.at

Dipl.-Ing. Matthias Granig, Leiter der Stabsstelle für Schnee und Lawinen, Wildbach- und Lawinenverbauung, Swarovskistraße 22a, A-6130 Schwaz.

E-Mail: matthias.granig@die-wildbach.at

Einsatz von UAV im alpinen Gelände. Erfahrungsbericht und Anwendungsbeispiel aus der Naturgefahrenpraxis



*Bernadette Sotier, Armin Graf, Johannes
Kammerlander, Innsbruck*

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Unbemannte Flugsysteme (UAV) werden immer mehr zum Standardwerkzeug zur Erfassung von Geodaten, insbesondere der Gewinnung von Luftbildern. Mit der entsprechenden Software können daraus verhältnismäßig rasch dreidimensionale Modelle der Geländeoberfläche berechnet werden. Im Naturgefahrenbereich sind solche aktuellen und hoch aufgelösten Oberflächenmodelle als Datengrundlagen für die weitergehende Analyse und das Prozessverständnis von Ereignissen gefragt. Vor diesem Hintergrund wurde im Sommer im Tiroler Halltal (Karwendel) die Befliegung einer Erosionsrinne mit einer ausgedehnten Schutthalde durchgeführt. Der folgende Beitrag geht im ersten Teil auf die besonderen Herausforderungen ein, welche die extreme alpine Topographie sowohl an die Durchführung des Fluges als auch an die anschließende Auswertung der Bilder stellt. Im zweiten Teil wird als konkretes Anwendungsbeispiel dieser neuen Geländedaten die Ereignisrekonstruktion zweier Murgänge beschrieben und der Mehrwert von Geländedaten aus UAV-Luftbildern diskutiert.

Schlüsselwörter: UAV, alpine Naturgefahren, Dokumentation, Ereignisrekonstruktion

Abstract

UAVs become a standard-method for geodata collection, particularly high-resolution aerial images. With easy to use image matching software nowadays it is possible to calculate 3D models of the surface fast and cost-effective. Such actual models often are asked for natural hazard management. For the purpose of calculating a mass balance of a debris flow in the Tyrolean Halltal a UAV was used. The extreme alpine environment was challenging for both the mission and the evaluation of the aerial images. With this data, a chronologically resolved back-calculation of one debris-flow event could be performed.

Keywords: UAV, alpine natural hazards, debris-flow event

1. Einleitung

Die Wechselreisse (Halltal, Tirol) ist eine ausgedehnte Schutthalde, welche von einer mächtigen Murrinne linear durchzogen wird. Diese beginnt in einer Seehöhe von 1438m am Fuß einer ausgeprägten Felsrinne und mündet 480 Höhenmeter tiefer in den Salzbergbach. Nach oben hin schließt das Bettelwurfkar an, ein verzweigtes Sammelgebiet zwischen den Gipfeln Bettelwurf (2726m Seehöhe) und Wechselspitze (2324m Seehöhe). Es entwässert ein oberflächliches Einzugsgebiet von 38,6ha (Abbildung 1).

In den Jahren 2010 und 2011 ereigneten sich zwei größere Murereignisse, welche erhebliche Schuttmengen aus der Reisse erodierten und eine mächtige Erosionsrinne formten. Die Straße ins Halltal, die den Salzbergbach in diesem Abschnitt rechtsufrig begleitet, wurde dabei verschüttet und teilweise zerstört [1]. Im Auftrag des

Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV), Gebietsbauleitung Mittleres Inntal, wurde Ende September 2012 eine Luftbildbefliegung der Wechselreisse durchgeführt. Diese Befliegung hatte primär zum Ziel (i) aus den Luftbildern ein aktuelles und möglichst genaues Oberflächenmodell der Erosionsrinne zu berechnen (ii) aus der Differenz zum vorhandenen Lasergeländemodell (Stand 2009) Erosions- und Ablagerungsbereiche zu identifizieren, sowie die verlagerten Schuttmassen zu quantifizieren und (iii) mittels dieser neuen Informationen die Ereignisrekonstruktion zu verifizieren und zu ergänzen.

2. Datenerfassung und Auswertung

2.1 Befliegung

Die Aufnahme der Luftbilder wurde mit Hilfe eines UAV durchgeführt (siehe Abbildung 2).

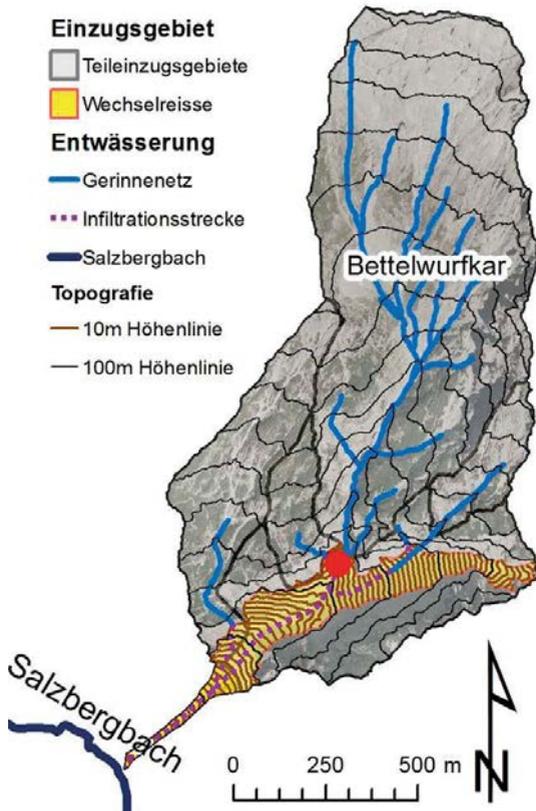


Abb. 1: Einzugsgebiet der Wechselreisse (links); Wurzel der Murgangrinne (rechts); Aufnahmestandort des Fotos ist als roter Punkt im linken Bild dargestellt – Blickrichtung Nord)

Zum Einsatz kam ein motorisiertes Segelflugmodell mit einer Spannweite von 2 Metern, das für die Verwendung als kameratragende Plattform umgebaut wurde. Der Motor wurde mit Lithium-Polymer-Akkus betrieben, ein Akku reicht für eine Flugzeit von ca. 30 Minuten. Als Sensor wurde eine Sony NEX 5N mit einer Festbrennweite von 16 mm verwendet. Das UAV wurde zusätzlich mit einem Autopiloten – einer Kombination aus Lagesensoren (IMU) und einem GPS-Empfänger – ausgestattet, so dass es im autonomen Modus betrieben werden kann. Als Hardware kam ArduPilot Mega in der Version 1.0 zum Einsatz, dessen Programmierung im Rahmen eines Open-Source-Projektes stattfindet [2, 3]. Mit Hilfe dieses Autopiloten ist es unter optimalen Voraussetzungen möglich, einen Flugpfad vorzugeben, um die erforderliche Bildüberlappung für die photogrammetrische Auswertung zu garantieren. Die besonderen Gegebenheiten der Wechselreisse stellten die Flugplanung und Durchführung der Befliegung jedoch vor einige Schwierigkeiten und es mussten speziell für die weitere Prozessierung der Luftbilder teilweise

erhebliche Einschränkungen in Kauf genommen werden:

- Die Höhererstreckung ist mit 480 Höhenmetern auf eine horizontale Distanz von ca. 900 Metern sehr groß, zusätzlich biegt die Rinne im oberen Teil gegen Norden ab. Dies führt dazu, dass das UAV sehr schnell aus dem kontrollierbaren Blickfeld verschwindet. Daher musste die Befliegung in zwei Etappen von verschiedenen Standpunkten aus durchgeführt werden (Abbildung 3 links). In der Rinne selbst sind keine geeigneten Landeplätze vorhanden, der Untergrund besteht aus Schutt oder ist mit Latschen bestockt. Die Landungen führten zu Beschädigungen an Rumpf und Leitwerken, die jedoch vor Ort repariert werden konnten.
- Die möglichen Standplätze für den Piloten liegen im zentralen und oberen Bereich der Wechselreisse. Dort hat man bereits eine sehr eingeschränkte Himmelssicht und zu wenige Satelliten, um ein zuverlässiges GPS-Signal empfangen zu können. Aus diesem Grund konnte das Fluggerät i) nicht im autonomen



Abb. 2: Start des UAV im Testgebiet

Modus betrieben werden und ii) kein Flugpfad vorgegeben werden. Das UAV musste daher manuell gesteuert werden, der nachträglich rekonstruierte Flugpfad (Abbildung 3 rechts) zeigt die daraus resultierenden Bereiche mit schlechter Bildüberlappung vor allem am oberen und unteren Ende der Rinne.

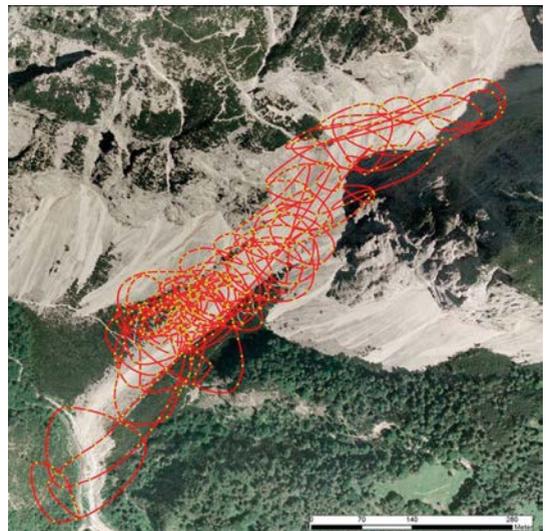
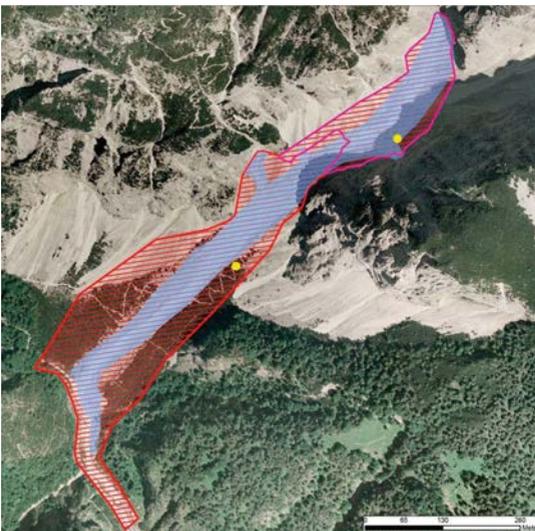


Abb. 3: Pilotenstandpunkte (gelb), oberer und unterer Teilbereich für die Berechnung des DSM (schraffiert) und Abgrenzung zur Berechnung des Differenzmodells (blau). Rechts der aus den Bildern rekonstruierte Flugpfad.

- Ein echter Überflug über die tief eingeschnittene Rinne mit dem Ziel, ein GPS-Signal zu empfangen, hätte eine Flughöhe von ca. 500 Metern über dem Standpunkt des Piloten bedeutet. Dies wäre jedoch aus Sichtbarkeitsgründen nicht machbar, da auf diese Distanz die Fluglage des UAV kaum mehr beurteilt werden kann und somit im Bedarfsfall ein manuelles Eingreifen nicht mehr möglich ist; ein alternativer Pilotenstandpunkt oberhalb der Rinne kam nicht in Frage, da das Gelände entweder nicht zugänglich ist oder keine Landemöglichkeit besteht.
- Die schluchtartige Verengung im oberen Teil der Wechselreisse – stellenweise ist die Schlucht nur zwischen 50 und 80 Meter breit – ist für Wendemanöver besonders kritisch, da die Distanz zu den begrenzenden Felswänden aus der Pilotensicht kaum abzuschätzen ist. Aus diesem Grund konnte nicht bis in den hintersten Winkel der Rinne geflogen werden. Daher sind die Bilder in diesem Bereich aus einem sehr ungünstigen, flachen Winkel (aus der Kurvenlage heraus) aufgenommen.
- Die schlechte Satellitenverfügbarkeit erschwerte zusätzlich die Erhebung von Passpunkten für die nachträgliche Georeferenzierung des Oberflächenmodells.
- Aufgrund der zu erwartenden starken Thermik über den Latschenfeldern war es erforderlich, die Befliegung möglichst bis Mittag abzuschließen. Dies hatte zur Folge, dass die oberen Abschnitte der Rinne noch im Schatten lagen,



Abb. 4: Auf der Suche nach den Passpunkten; im UAV-Luftbild (links) und im 2009er Orthofoto (rechts)

was die photogrammetrische Auswertung entsprechend erschwerte.

- Eine vollständige und systematische Abdeckung des Gebietes konnte mit der Befliegung unter den gegebenen Umständen nicht erreicht werden; vielmehr handelt es sich um eine unsystematische Ansammlung von Bildern mit stark variierender Bodenauflösung, randlich schlechter Bildüberlappung, darunter sehr viele Schrägaufnahmen mit großen Höhendifferenzen in einem Bild.

2.2 Photogrammetrische Auswertung

Für die Orientierung der Luftbilder sowie die Berechnung des 3D-Modells stand das Programmpaket PhotoScan Professional (Agisoft, www.agisoft.ru, [5]) zur Verfügung. Von den 1140 Bildern wurden 625 ganz oder teilweise verwendet. Da in diesem Gelände die in einem Foto abgebildeten Höhendifferenzen häufig um ein Vielfaches größer als die Flughöhe über dem höchsten Geländepunkt sind, kommen unweigerlich starke Verzerrungen zustande. Dies führt dazu, dass die für die Orientierung notwendigen Verknüpfungspunkte für viele Bilder nicht automatisch gefunden werden können. Für die Auswertung bedeutete dies einen erhebli-

chen manuellen Nachbearbeitungsaufwand. Die abgedeckte Fläche von 11,3 ha und die damit verbundene große Datenmenge von mehr als 600 Bildern hatte zudem sehr lange Rechenzeiten zur Folge.

Da bei der Befliegung aufgrund der starken Abschattungen kein GPS-Signal aufgezeichnet werden konnte, erfolgte die Verortung der Luftbilder im Postprocessing über Passpunkte, die aus dem aktuellen Orthofoto und dem Laser-DGM (beides Stand 2009) bestimmt wurden. Zur Definition des Raumbezugs wurden in den Bildern 37 Passpunkte verortet. Die Lage der Passpunkte ist aber aufgrund der mäßigen Auflösung des Orthofotos nur mit einer mittleren Genauigkeit von ca. 0,5 – 1 Meter (im Schatten deutlich schlechter!) bestimmbar, siehe hierzu auch Abbildung 4. Die X- und Y-Koordinaten wurden, wenn möglich an klar identifizierbaren Strukturen in den vom Murgang nicht veränderten Randbereichen abgegriffen, z. B. an Felswänden (Übergang Fels-Schutt), an großen Steinen oder entlang der Wege. Die Höhenwerte stammen aus dem Laser-DGM. Die Lagegenauigkeit des Laser-DGM wird mit $\pm 0,3\text{m}$, die Höhengenaueigkeit mit $\pm 0,15\text{m}$ angegeben [4]. Besonders im zentralen Bereich der Rinne konnten auf dem

Orthofoto keine Passpunkte identifiziert werden, da sie entweder nicht auffindbar (wegen Auflö- sung, Beleuchtung, Schatten, Schneefeld) oder aufgrund der Erosion infolge der Murgänge gar nicht mehr vorhanden waren.

Die Berechnung des Modells erfolgte mittels Bild-Matching getrennt für den oberen und den unteren Teil der Rinne (Abbildung 3 links). Dadurch konnte einerseits die Genauigkeit des Modells verbessert und andererseits die Re- chenzeiten erheblich verkürzt werden.

2.3 Ergebnisse

Für die georeferenzierte 3D-Punktwolke wurde ein aus allen X, Y und Z-Werten gemittelter Ko- ordinatenfehler von 0,95 m für den unteren Teil und 1,77 m für den oberen Teil ausgegeben. Aus der Punktwolke wurde das Oberflächenmodell (DSM) berechnet und anschließend als Raster mit einer Auflösung von 15 cm exportiert. In dieser Auflösung sind Detailstrukturen bis hin zu einzelnen Steinen und Latschen gut erkennbar (Abbildung 5). Für die weiteren Berechnungen wurde das DSM auf eine Rasterweite von 0,5 m aggregiert.

Die Lage- und Höhengenaugigkeit des be- rechneten DSM ist aufgrund fehlender exakt

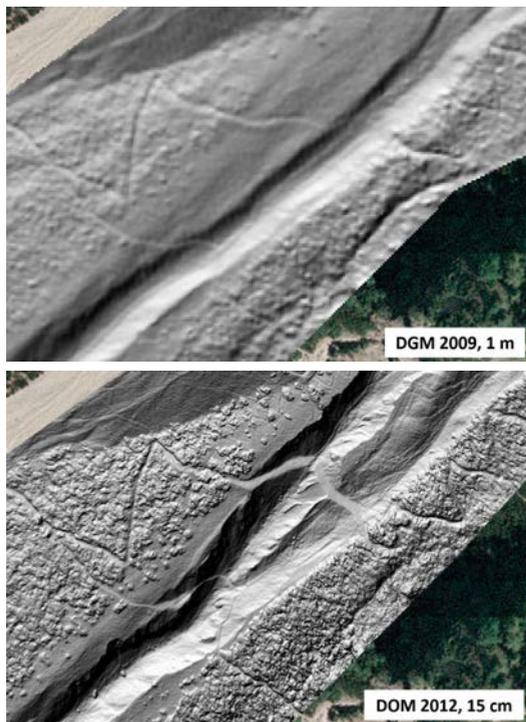


Abb. 5: Vergleich Laser-DGM 2009 (oben) und Luftbild- DSM (unten)

eingemessener Passpunkte nur grob abschätz- bar und zudem von der Identifizierbarkeit der Passpunkte aus dem vorhandenen Orthofoto abhängig. In den nicht vom Murreignis betrof- fenen stabilen Bereichen liegt das Luftbild-DSM im Mittel $-0,5\text{ m} \pm 0,7\text{ m}$ über dem Laser-DGM. Besonders im unteren, latschenbestandenen Teil des Modells resultieren die Höhenunterschiede aus der Vegetation (Differenz aus Geländemo- dell und Oberflächenmodell). Größere Fehler können auch im oberen Teil der Rinne und zu den Rändern hin festgestellt werden. Dort sind vermutlich die deutlich geringere Bildüberlap- pung, Verzerrungen und tiefe Schatten in den Luftbildern, sowie schlecht sichtbare Passpunkte als Ursache anzunehmen.

3. Anwendungsbeispiel – Ereignisrekonstruktion

3.1 Allgemeines

Murgänge vermögen große Massen an Sedi- menten binnen kurzer Zeit entlang ihrer Fließstrecke zu erodieren und umzulagern. Während sich die Entstehung von Murgängen zumeist auf intensi- ven Oberflächenabfluss und/oder Porenwasser- überdruck infolge der Bodenwassersättigung zurückführen lässt, wird die Erosions-/ Umlage- rungsintensität zudem maßgeblich von der Ver- fügbarkeit an Geschiebematerial bestimmt [7].

Die geringe Auftretenswahrscheinlichkeit von Murgängen sowie deren kurzer Ablaufzeit- raum erschweren eine direkte Beobachtung, respektive die Messung der Prozessdynamik. Somit kommt der Analyse von vergangenen Ereignissen eine hohe Bedeutung zu [8]. Am Beispiel der Wechselreise werden im Folgen- den die Methoden und die Unsicherheiten einer Ereignisrekonstruktion kurz erläutert bzw. der Mehrwert von Geländedaten aus unbemannten Flugsystemen erörtert.

3.2 Sedimentumlagerung – Massenbilanz

Durch den Vergleich zwischen dem Laserge- ländemodell aus dem Jahr 2009 und dem 2012 photogrammetrisch erstellten Oberflächenmodell konnte die Erosions-/ Umlagerungsintensität in dieser alpinen Schutthalde quantifiziert werden. Das Differenzbild zeigt eine lineare Sedimen- tation im Ausmaß von 85361 m^3 , in deren Folge eine markante Tiefenrinne entstanden ist (Abbildung 6).

Die Ereignisdokumentation des Forsttechni- schen Dienst der Wildbach- und Lawinenver- bauung (WLVB) [6] verzeichnet für den Zeitraum 2009 bis 2012 zwei Murgangereignisse, welche

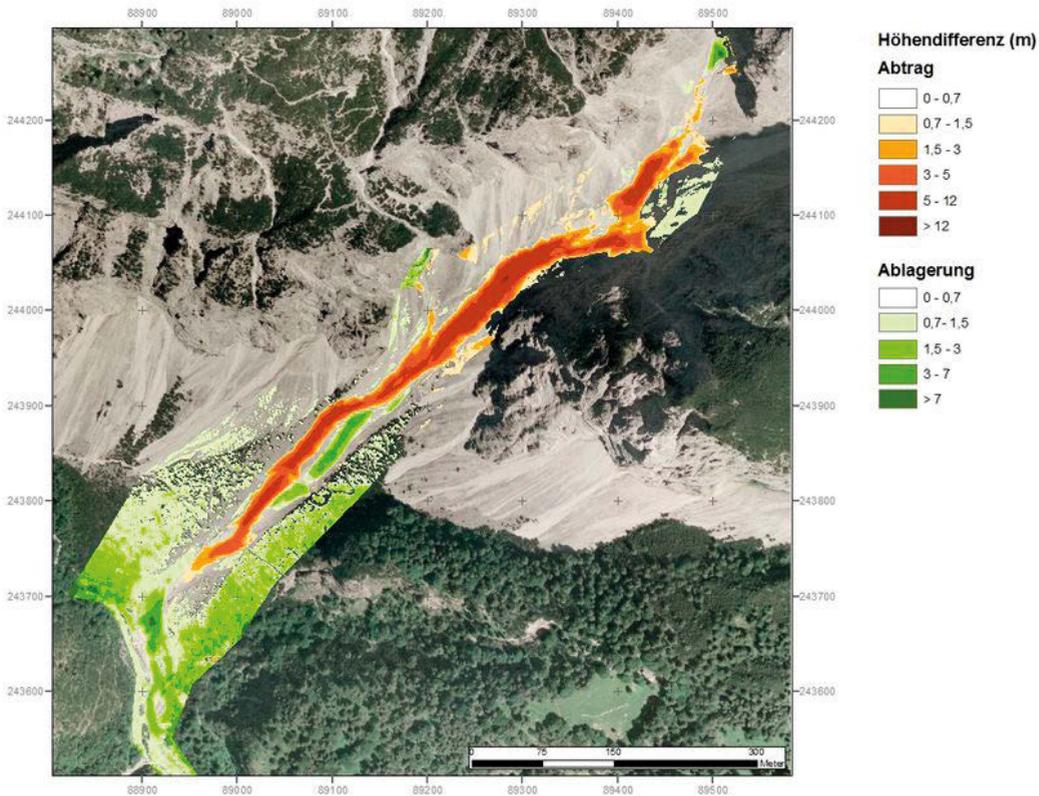


Abb. 6: Höhendifferenzen in Metern zwischen den Jahren 2009 und 2012

jeweils große Mengen an Sedimenten aus der Schutthalde erodierten und in den unterhalb anschließenden Salzbergbach verlagerten.

Der erste und auch maßgebende Murgang ereignete sich am Abend des 17. Juli 2010. Mit Hilfe einer Fotodokumentation, welche unmittelbar nach dem Ereignis aufgenommen wurde, konnte das Erosionsvolumen grob auf 51300 m^3 geschätzt werden. Eine terrestrische Vermessung der Sedimentablagerung am unteren Ende der Schutthalde, ebenfalls kurz nach dem Ereignis durchgeführt, beziffert ein Volumen von 43220 m^3 (Abbildung 10). Die Differenz der beiden Volumina kann dahin gehend interpretiert werden, dass das abgelagerte Murgangmaterial teilweise durch den Salzbergbach remobilisiert und weitertransportiert wurde; Bachbegehungen und Fotos der WLW bestätigen einen intensiven Geschiebeeinwurf in den Salzbergbach.

Das zweite aufgezeichnete Ereignis fand im Jahr 2011 statt und führte zu einem erneuten Sedimentaustrag von 25000 m^3 [6].

Beide Abtragsvolumina aufsummiert ergeben ein Gesamtabtragsvolumen von rund 76300 m^3 . Verglichen mit der Differenz aus Gelände- und Oberflächenmodell, welche einen linearen

Materialaustrag mit 85361 m^3 quantifiziert, zeigt sich eine trotz aller Unsicherheiten gute Übereinstimmung zur Massenbilanz: Die Größenordnung der Sedimentumlagerung aus der Ereignisdokumentation konnte über die Geodatenerfassung mittels UAV sehr gut verifiziert werden.

3.3 Murgangereignis 2010 – Prozessrekonstruktion

Die Entstehung des Murgangs vom 17. Juli 2010 ist auf mehrere, kurz aufeinanderfolgende Starkregenereignisse zurückzuführen (Abbildung 7). Kurze Starkregen führen in kleinen, felsreichen Einzugsgebieten, wie dem Einzugsgebiet der Wechselreisse (Abbildung 1 links) zu einer starken hydrologischen Reaktion in Form rasch ansteigender Abflusswellen [9]. Bedingt durch den großflächig subanstehenden Felsuntergrund und die spärliche Vegetation im Bettelwurfkar ist die Infiltrationsleistung des Bodens stark reduziert. In Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität überwiegen somit oberflächliche Abflussprozesse, welche ein schnelles Abfließen und kurze Konzentrationszeiten kennzeichnen.

Die N/A-Simulation des ersten Starkregenereignisses (am frühen Nachmittag des 17. Juli

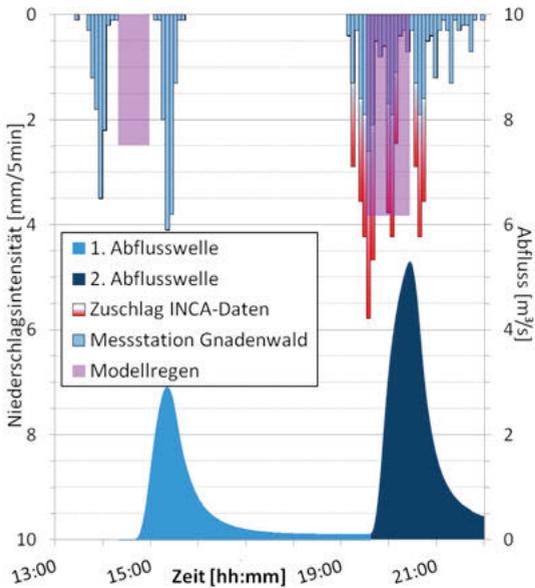


Abb. 7: Niederschlagsdaten und N/A-Modellerggebnis der hydrologischen Rückrechnung vom 17. Juli 2010

2010; vgl. Abbildung 7) führt zu einer Abflusswelle von rund 1,5 Stunden Dauer und einem Spitzenabfluss von $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ aus dem Bettelwurfkar. Infolge der losen Lagerung des Schutts in der Wechselreisse und der trockenen Witterung der vorgehenden Tage ist bei der ersten Abflusswelle von einer intensiven Versickerung entlang der Wechselreisse auszugehen. Der maßgebende Murgang ereignete sich in den frühen Abendstunden gegen 20.30 Uhr [6] und ist somit auf die zweite Abflusswelle zurück zu führen.

Tognacca [10] stellte über zahlreiche Modellversuche zum Erosionsverhalten von Murgängen in Schuttstrecken fest, dass vor allem bei kurzen Abflusswellen (wie jenem der ersten Abflusswel-

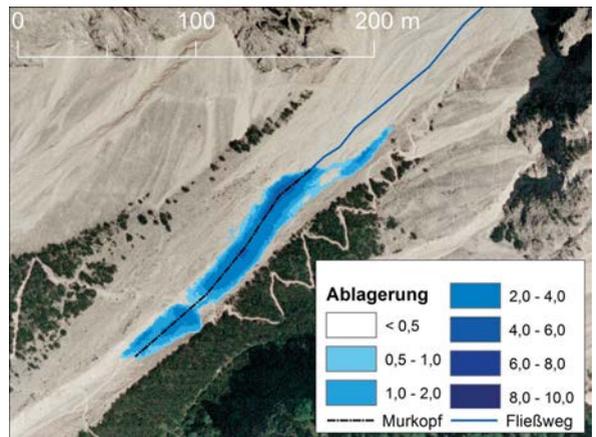
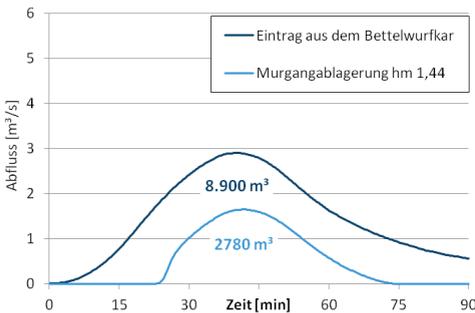


Abb. 8: Abflustranslation der ersten Abflusswelle entlang der Wechselreisse unter Berücksichtigung einer Infiltrationsrate von $0,5 \text{ mm/s}$ (links); Schuttablagerung in der Murgangrinne (rechts)

le) der zunehmende Wasserverlust infolge von Infiltration zu einem frühzeitigen Stillstand des Murgangs, bzw. zur abrupten Schuttablagerung führt. Dieser Effekt wird im Differenzbild der beiden digitalen Oberflächenmodelle (Abbildung 6) ersichtlich: Neben der großen linearen Erosionsrinne ist auch eine geringmächtige Schuttablagerung von 5685 m^3 im unteren Drittel der Wechselreisse entstanden (Abbildung 8 rechts).

Aus dem Berechnungsansatz zur Bestimmung der Transportkapazität von Murgängen nach [10] resultiert für das Wasservolumen der ersten Abflusswelle im Bereich der Schuttablagerung bei hm 1,44 (2780 m^3 ; Abbildung 8 links) ein mobilisiertes Feststoffvolumen von 5163 m^3 . Unter Berücksichtigung der Porosität der Schuttalade mit 24% (vgl. [10]) ergibt sich ein Ablagerungsvolumen von 6793 m^3 , welches im Vergleich zum geodätisch berechneten Volumen von 5685 m^3 wiederum eine allen Unsicherheiten und Annahmen entsprechend gute Übereinstimmung aufweist. Somit kann die Hypothese, dass die erste Abflusswelle zwar ebenfalls zu einer Feststoffumlagerung führte, jedoch zu einem erheblichen Anteil in der Schuttalade infiltrierte mit Hilfe des digitalen Oberflächenmodells ausreichend plausibilisiert werden.

Die erhöhte Disposition infolge der teilweisen Wassersättigung im oberflächennahen Schuttkörper der Wechselreisse und die zweite Abflusswelle als direktes Auslöseereignis führten schließlich zur Entstehung eines großen Murgangs. Die Ausbildung einer mächtigen, linearen Erosionsrinne belegt die intensive Schuttmobilisierung entlang der ganzen Fließstrecke, welche für dieses Ereignis mit 51300 m^3 quantifiziert werden konnte.

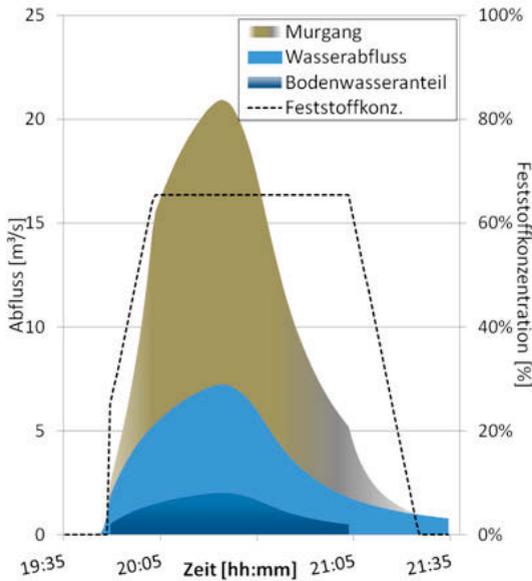


Abb. 9: Murganghydrograph des Ereignisses vom 17. Juli 2010

Die Rekonstruktion des Murganghydrographs basiert wiederum auf der Transportformel nach [10] und berücksichtigt den anfänglich raschen Übergang von intensiven Geschiebetransport

hin zu einer Murgangbewegung über den linearen Anstieg der Feststoffkonzentration; gleiches gilt für das Ende des Murgangs (Abbildung 9). Unter Berücksichtigung des im Zuge der ersten Abflusswelle in den Schuttkörper infiltrierten Bodenwassers und einer Porosität von 24% (vgl. [10]) ergibt sich das Abtragsvolumen mit 51856 m^3 .

4. Schlussfolgerungen

Wie am Beispiel der Wechselreise im Tiroler Halltal gezeigt werden konnte, liefern die mit Hilfe eines UAV gewonnenen Geländedaten neben der eigentlichen Ereignisdokumentation auch einen ganz wesentlichen Beitrag zu deren nachträglichen Rekonstruktion und können somit zum Prozessverständnis solcher Ereignisse beitragen. Im Vergleich zu anderen Methoden zur Erfassung von Oberflächeninformation wie z. B. terrestrische Photogrammetrie und Airborne Laserscanning sind UAV flexibel, schnell einsetzbar und zudem deutlich kostengünstiger. Unbemannte Luftfahrzeuge können im alpinen Gelände auch dort noch eingesetzt werden, wo selbst terrestrische Vermessung einen großen Aufwand bedeuten würde. Diese Problematik

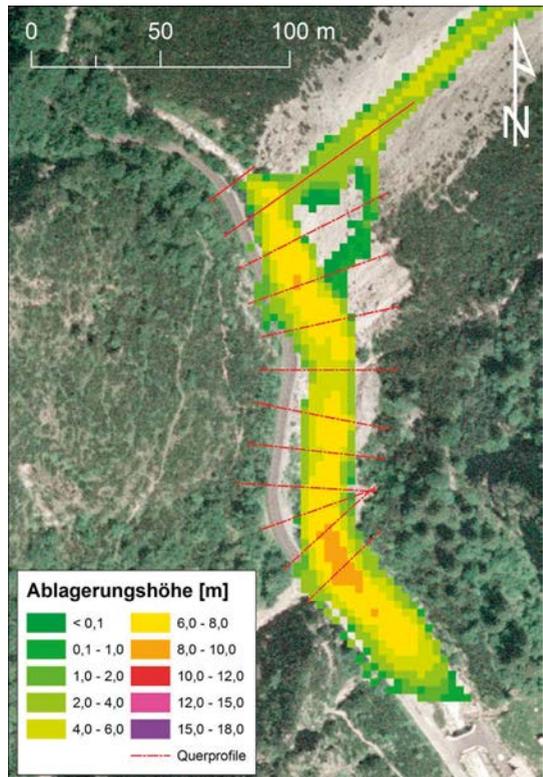
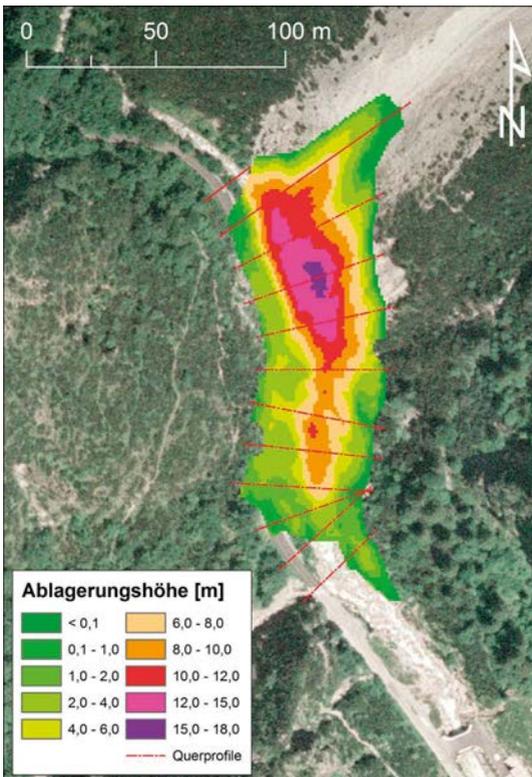


Abb. 10: Gemessene Murgangablagerung des Ereignisses vom 17. Juli 2010 (links); simulierte Ablagerung (rechts)

wurde beispielsweise in [11] beschrieben. Dort wurde mittels terrestrischem Laserscanning ein hochaufgelöstes Geländemodell von angrenzenden Gebieten erstellt, einzelne Teilbereiche konnten jedoch wegen ihrer topografischen Lage nicht erfasst werden. Dies führte dazu, dass die Massenbilanz (Erosion vs. Ablagerung) in [11] nur bedingt erfasst werden konnte. Zusammen mit den aus der Wechselreise gewonnenen Erkenntnissen kann man daraus folgern, dass für Zwecke der Ereignisrekonstruktion und/oder Modellkalibrierung die flächige Abdeckung des gesamten Untersuchungsgebietes entscheidender ist als eine hohe Genauigkeit in Teilbereichen. Desweiteren konnte gezeigt werden, dass auch mit Bildern aus nicht systematisch durchführbaren Befliegungen aufgrund der mittlerweile großen Leistungsfähigkeit von Image-Matching-Verfahren ausreichend gute Ergebnisse erzielt werden können.

Danksagung

Diese Arbeit sowie Bau und Ausstattung des UAV konnte im Rahmen des EU-Projekts NewFOR – NEW technologies for a better mountain FORest timber mobilization (INTERREG Alpine Space) finanziert und durchgeführt werden.

Referenzen

- [1] *Kammerlander, J., Kohl, B. (2011):* Modellierung der Halltalmure. Gutachten im Auftrag des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung BMLFUW
- [2] www.diydrones.com
- [3] <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/>
- [4] GEOLAND.AT Metadatenkatalog (2013): <http://www.geoland.at/geonetwork/srv/de/main.home>
- [5] Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 0.8.4. www.agisoft.ru
- [6] Forsttechnischer Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung (2012): WKL. Digitaler Ereigniskataster. (unveröffentlicht). Ereigniskarte einsehbar unter www.naturgefahren.at

- [7] *Rickenmann, D. (2003):* Methoden zur Beurteilung von Murgängen. In: ETAlp (2003): Agerer, H., Aigner, H., Angerer, H., Anker, F., Bunza, G., Ferlan, E., Gaztermaier, W., Hafner, K., Hehn, F., Honsowitz, H., Hübl, J., Kirnbauer, R., Klaus, W., Kohl, B., Markart, G., Marschallinger, R., Mayer, R., Mayerl, M., Mölz, M., Ofner, G., Pirkl, H., Pittracher, M., Rickenmann, D., Schiegg, H., Schiffer, M., Schmid, F., Schmidt, R., Schnetzer, I., Stepanek, L. ETAlp - Erosion, Transport in Alpen Systemen - Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. Projektbericht des BMLFUW, Wien.
- [8] *Hübl, J., Kienholz, H. & Loipersberger, A. (2006):* DOMODIS – Dokumentation alpiner Naturereignisse [Documentation of Mountain Disasters]. Abrufbar unter www.boku.ac.at.
- [9] *Dobmann, J. (2009):* Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Interpretations- und Praxishilfe. Inauguraldissertation an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- [10] *Tognacca, C. (1999):* Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich.
- [11] *Bremer, M. & Sass, O. (2012):* Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology* 138, S. 49-60.

Anschrift der Autoren

Bernadette Sotier, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Institut für Naturgefahren, Hofburg – Rennweg 1, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: bernadette.sotier@uibk.ac.at

Armin Graf, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Institut für Naturgefahren, Hofburg – Rennweg 1, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: armin.graf@uibk.ac.at

Dipl.-Ing. Johannes Kammerlander, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Wasserbau, Technikerstraße 11, A-6020 Innsbruck.

E-Mail: johannes.kammerlander@uibk.ac.at

Zur Auswahl und Bewertung von Flächenflugzeug-Mikrodrohnen für die Luftbildvermessung



Oliver Gebauer, Pasching

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Der zu Aufklärungszwecken im militärischen Bereich erfolgreiche Einsatz unbemannter Mikrodrohnen (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) lenkte in den letzten Jahren die Aufmerksamkeit verschiedener Gruppen auf die Möglichkeiten dieser Systeme, deren ständige Weiterentwicklung inzwischen auch für das Vermessungswesen attraktive Chancen bietet.

Die in den Geräten vereinte Integration der in sich bereits anspruchsvollen Themenfelder Flugzeugtechnik, Sensorik, Elektronik, Software, Modellbau und Photogrammetrie schafft eine Komplexität, die es für Außenstehende schwierig macht, für ihre Anwendungen geeignete Produkte zu identifizieren. Es werden daher einige Punkte beleuchtet, die für die Auswahl und Nutzung dieser Systeme in der Geodäsie wichtig sind.

Schlüsselwörter: Mikrodrohnen, UAV, Auswahlkriterien, praktische Erfahrungen

Abstract

The successful application of microdrones (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) in military intelligence has directed the attention of several groups onto the possibilities of these systems, whose continuing evolution meanwhile offers attractive chances for surveying purposes.

These systems integrate a handful of already challenging topics like aviation engineering, sensors, electronics, software, modelling and photogrammetry, which causes a degree of complexity that makes it difficult for outsiders to identify a good product. Therefore a few issues shall be highlighted, which are important for choosing and using these systems in surveying.

Keywords: Microdrones, UAV, Evaluation, practical experiences

Die in der bemannten Fliegerei verbreiteten Messverfahren des Laserscannings und der Photogrammetrie sind grundsätzlich auch für Mikrodrohnen (Abbildung 1) geeignet. Da derzeit noch keine ausreichend kleinen und leichten Laserscanner für geringe Nutzlasten von maximal 2 kg verfügbar sind, konzentriert sich das Angebot auf die Nutzung der Photogrammetrie als Messverfahren unter Verwendung von Kameras bis 1,5 kg Gewicht.

Befördert wurde die dynamische Entwicklung der UAV durch Fortschritte bei Lithium-Polymer Akkus, Faserverbundstoffen, elektrischen Außenläufermotoren, der Bildqualität, Pixeldichte und Gewichtsreduktion moderner Digitalkameras, preiswerten und stark verkleinerten mikroelektronischen Lage-, Richtungs- und Beschleunigungssensoren, der Genauigkeit der GPS-Sensorik und mikroelektronischer Funktechnik mit hoher Bandbreite auf öffentlich freigegebenen Frequenzen.



Abb. 1: Mikrodrohne der GeoSpy Aerial Imaging & Mapping GmbH

1. Nutzen von Mikrodrohnen

Das nahe liegende Motiv der Kostensenkung durch den Einsatz von Mikrodrohnen ist im Vergleich zum bemannten Bildflug nur für kleinräumige Gebiete bis 10 km² realisierbar. Die Großfliegerei erreicht bei großen Flächenbefliegungen eine hohe Produktivität, der jedoch die Kosten für Flugplätze, Flugsicherung, Betriebs- und Investitionskosten des Flugzeuges und aufwändiger Hardware, Hin- und Rückflug zum Zielgebiet und 2 Mann Personal entgegenstehen. Im Vermessungswesen sind jedoch gerade Aufgaben mit kleinen Losgrößen die tägliche Praxis. Dennoch sprechen eher qualitative Argumente für die Verwendung von Mikrodrohnen in der Geodäsie.

1. Die niedrige Flughöhe von 50–150 m über Grund ermöglicht trotz Verwendung deutlich kürzerer Brennweiten eine Bodenauflösung von 2 cm/Pixel.
2. Durch größere Bildöffnungswinkel können plastische 3D-Modelle errechnet werden, die auch auf vertikalen Flächen wie z.B. Gebäuden eine realitätsnahe Textur aufweisen.
3. Relativ hohe Wetterunabhängigkeit: Winterlicher Hochnebel, dichte Bewölkung oder Regen stellen keine Einschränkung des Betriebes dar.
4. Datenverfügbarkeit binnen 2 Tagen bei kleinräumigen Aufgabenstellungen: Beim bemannten Bildflug entstehen durch die wirtschaftlich notwendige Zusammenlegung mehrerer kleiner Aufträge Wartezeiten bis zur Auftragsabwicklung. UAV sind hingegen auch für einzelne kleine Aufträge wirtschaftlich einsetzbar.
5. Hohe Datendichte der entstehenden Orthofotos, Höhen- und 3D-Modelle:

Sie stellt den Hauptvorteil der Luftbildvermessung mit Mikrodrohnen gegenüber der terrestrischen Vermessung dar. Die Darstellung von Bruchkanten oder Höhenmodellen wird detaillierter, weil sich die Entfernung zweier Messpunkte von mehreren Metern auf wenige Zentimeter verkürzt. Bei der Berechnung von Volumina kann der Geländekontur theoretisch mit einer Bodenauflösung von 2 cm gefolgt werden. Querprofile können mit geringem Aufwand in großer Dichte dargestellt werden. Der Fehler der entstehenden 3D-Modelle ist durch die Verwendung nicht in die Modellberechnung einfließender Kontrollpunkte überprüfbar und liegt bei den meisten kommerziell verfügbaren Systemen in der Größenordnung des Differential-GPS (Siehe als Beispiel Abbildung 2).

Aus diesen Merkmalen ergibt sich, dass ein UAV-gestütztes, fotogrammetrisches Vermessungssystem gut geeignet ist für die Geländeerhebung im Tiefbau, Volumsberechnungen für Halden, Deponien, Rohstoffabbau und Bergbau, für allgemeine Vermessungsaufgaben großer Bauvorhaben, den Katastropheneinsatz (Murenabgänge, Überschwemmungen etc.) kleinflächige Kartographie, 3D-Dokumentation und mit Einschränkungen für die Gebäudevermessung. Wenig geeignet ist es im Hochgebirge, bei großen Höhenunterschieden von kleinräumigem Gelände, Gebieten über 15 km² Fläche und in Flugbeschränkungsgebieten der allgemeinen Luftfahrt.

2. Kriterien der Drohnenauswahl

Für Vermessungszwecke kommen Flächenflugzeuge mit Spannweiten von 80 cm bis 3 m und Multicopter mit 4 bis 10 Rotoren zur Anwendung. Multicopter gewinnen ihre Popularität aus ihrer auch für geschulte Laien guten Steuerbarkeit auf

# Label	X/East	Y/North	Z/Altitude	Error(m)	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)
P1004	77739.221000	359853.874000	499.647000	0.000000	0.000000	-0.000000	0.000000
P1010	77622.149000	360026.278000	501.518000	0.019324	-0.003320	0.003339	-0.018741
P1013	77592.261000	359961.442000	498.635000	0.046620	-0.030979	0.010814	0.033117
P1014	77584.351000	360033.258000	503.505000	0.052064	-0.007972	0.021518	-0.046734
P1001	77624.655000	359919.009000	497.718000	0.000000	0.000000	-0.000000	0.000000
P1002	77658.727000	359864.428000	499.923000	0.000000	0.000000	-0.000000	-0.000000
P1003	77666.181000	359826.781000	503.175000	0.081491	0.034476	-0.034463	0.065336
P1006	77872.205000	359809.357000	498.172000	0.000000	0.000000	-0.000000	-0.000000
P1007	77862.560000	359882.648000	492.003000	0.000000	0.000000	-0.000000	0.000000
P1008	77751.762000	359965.038000	493.748000	0.000000	0.000000	-0.000000	-0.000000
P1009	77700.998000	360037.851000	496.214000	0.000000	0.000000	-0.000000	-0.000000
P1011	77584.714000	360050.627000	504.915000	0.000000	0.000000	-0.000000	-0.000000
P1012	77549.197000	359972.542000	499.789000	0.000000	0.000000	-0.000000	-0.000000
P1015	77692.285000	360084.907000	498.599000	0.000000	0.000000	-0.000000	0.000000
P1005	77797.260000	359832.935000	499.004000	0.084857	0.008853	0.015547	-0.082950

Abb. 2: Beispiel für die Ermittlung von Messfehlern zwischen 3D-Modell und Kontrollpunkten

Flächenbelastung: entspricht dem Verhältnis zwischen Gewicht des Geräts und der Flügelfläche. Sie beeinflusst die erforderliche Flug- und →Überziehgeschwindigkeit und ist direkt proportional zur Flugstabilität (Einfluss von Turbulenzen und Windscherungen auf den Flugzustand, Veranschaulichung durch den Vergleich fallender Stein vs. fallende Feder)

Überziehgeschwindigkeit (Stall Speed): ist die Grenzgeschwindigkeit, bei deren Unterschreitung mangels Auftriebs kein stabiler Flugzustand mehr vorliegt. Sie ist direkt proportional zur Quadratwurzel der Flächenbelastung und indirekt zum maximalen Auftrieb des Flügels

Auftrieb und Widerstand: steigen mit dem Quadrat der Fluggeschwindigkeit und linear mit der Flügelfläche und dem Auftriebsbeiwert Da die Parameter Flügelfläche, Gewicht, Auftriebsbeiwert, Fluggeschwindigkeit, Energieverbrauch (=Reichweite), Start- und Landegeschwindigkeit im Zusammenhang zueinander stehen und die Bandbreite sinnvoller Größenverhältnisse im Hinblick auf gute Flugstabilität, geringe Start- und Landegeschwindigkeit, große Reichweite, hohe Nutzlast und niedrige Aufschlagsenergie schmal ist, kommt dem Wissen des Herstellers über Aerodynamik und Flugzeug- bzw. Modellbau deutlich größeres Gewicht zu, als die Kleinheit der Geräte suggeriert.

engstem Raum und der Möglichkeit, wie klassische Helikopter im Flug ihre Position zu halten und dabei die Flughöhe verändern zu können. Besonders in städtischen Gebieten sind sie nicht nur für die Vermessung sondern auch für Foto- und Videodokumentationen geeignet. Nachteilig ist ihre gegenüber Flächenflugzeugen deutlich geringere Energieeffizienz und damit Flugdauer.

Im Markt für Flächenflugzeuge zeichnet sich eine Abgrenzung zwischen Kleinstgeräten für Nutzlasten bis 300 g und Flächen um 1 km² sowie hochwertigen Systemen für Nutzlasten bis 2 kg mit Echtzeit-Videoüberwachung (Immersionflug, Remote Pilot), Fallschirmlandefähigkeit, geringer Windanfälligkeit, echtzeitfähiger Telemetrie, hochwertiger Flugplanungssoftware, Flugzeiten bis 90 min und Flächen bis 10 km² ab. Die Preisspanne liegt derzeit bei 10-60 TEUR.

Angesichts dieser Kosten, der Sicherheitsaspekte beim Betrieb des Gerätes und des mit dem Aufbau der notwendigen Infrastruktur für IT, Photogrammetrie und Flugbetrieb verbundenen

Aufwands sollte ein derartiges System sorgfältig ausgewählt werden.

Dieser Aufsatz beschränkt sich auf Auswahlkriterien bei Flächenflugzeugen, da sie aufgrund ihrer höheren Flugleistungen z.B. für Geländeerhebungen bei Flächen von 1–10 km² besser geeignet erscheinen.

Folgende Themen sollten bei der Entscheidung für ein Flächenflugzeug-UAV geprüft werden:

2.1 Startverfahren

Mechanische Starttrampen bieten im Vergleich mit dem Handstart ein definiertes Startverfahren, sind aber mit erhöhtem Zeit- bzw. Materialaufwand, größerem Systemgewicht und einem nicht unerheblichen Verletzungsrisiko verbunden. Durch ihr Gewicht schränken sie unter Umständen das Einsatzgebiet ein (Bsp. Gletscherbefliegungen, unwegsames Gelände). Sie werden bei Geräten mit hoher Flächenbelastung (=hoher Flug- und Überziehgeschwindigkeit) verwendet, die zum Teil nur mittels Fallschirm sicher gelandet werden können. Welche Bedeutung eine ausgewogene aerodynamische Konfiguration hat zeigte bei einem Test, dass auch der Vizeweltmeister im Wettbewerbs-Modellflug mit einem der teuersten Geräte des UAV-Marktes in mehreren Versuchen aufgrund der hohen Landegeschwindigkeit von 60 km/h kaum eine sichere und schadensfreie Landung durchführen konnte.

Der alternative Handstart setzt eine niedrige Überziehgeschwindigkeit voraus, die in der Nähe der Abwurfgeschwindigkeit liegen sollte. Der Pilot muss auch ohne weiteren Helfer bei Windstille und ohne hohe Anlaufgeschwindigkeit einen sicheren Start durchführen können.

Eine Autostartfunktion ist nicht zwingend erforderlich, reduziert jedoch das Risiko eines Fehlstarts. Mit ihr wird der Motor des UAV auf Vollgas geschaltet und die Fluglage bereits beim Abwurf vom Autopiloten geregelt, wobei eine stabiler Steigflug mit wählbarem Abflugwinkel und Höhengewinn bis zum Startpunkt des Flugpfades sichergestellt wird. Beim manuellen Start liegt das Startrisiko hauptsächlich in der Phase zwischen dem Abwurf und der Herstellung einer stabilen Fluglage durch die Handsteuerung.

2.2 Windanfälligkeit

Die Fähigkeit eines UAV, trotz Turbulenzen dem geplanten Flugpfad ohne größere Abweichungen und Änderungen der Fluglage zu folgen, hat aufgrund der qualitativen Anforderungen der Photogrammetrie große Bedeutung (Abbildung 3). Durch Lücken in der Bildüberlappung kann

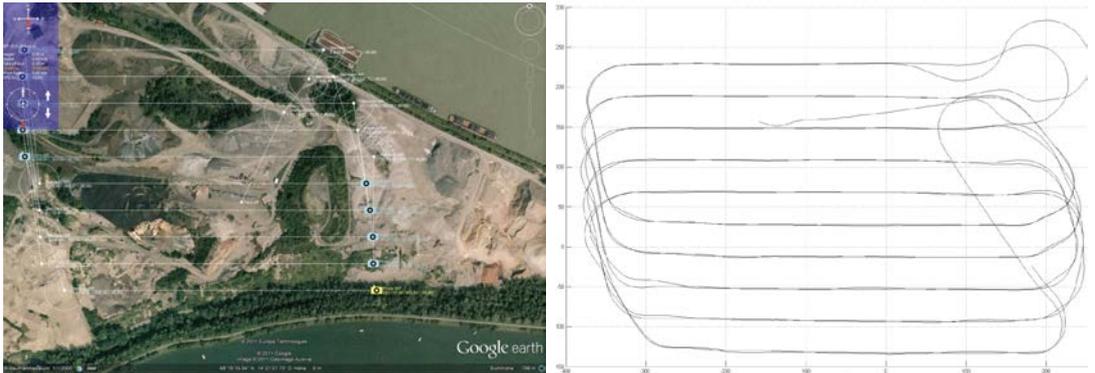


Abb. 3: Flugplanung und Vergleich mit dem tatsächlich geflogenen Flugpfad

die gesamte Befliegung unbrauchbar werden. Mit elektronisch gesteuerten Kameraaufhängungen (Gimbals) wird von einigen Herstellern versucht, Lageänderungen des UAV zu kompensieren. Die Schnelligkeit der Bewegungen limitiert jedoch deren Wirksamkeit. Durch hohe Eigenstabilität und gut gewählte Flächenbelastung können ungewollte Fluglageänderungen bereits durch konstruktive Maßnahmen minimiert werden. Der Anwender sollte eine Einsatztauglichkeit des UAV bis zu einer Windgeschwindigkeit von 40 km/h in Bodennähe erwarten können, wobei die Fluggeschwindigkeit in einem sinnvollen Verhältnis zu allfälligen Windscherungen stehen sollte.

2.3 Flugleistungen

Die Angaben der erzielbaren Flugzeit sind in Einzelfällen überprüfenswert und liegen zwischen 15 und 100 min. Für das Fliegen innerhalb der Sichtweite des Piloten (alternativ 500 m Entfernung) ist eine maximale Flugzeit von 45 min ausreichend. Bei einer für Flächenflugzeug-UAV typischen Fluggeschwindigkeit von 70 km/h und einer zu berücksichtigenden Reserve von 10 min errechnet sich eine Flugstrecke von rund 40 km und bei einer Bildüberlappung von 65% in beiden Dimensionen eine Abbildungs-Flächenleistung von 2,7 km²/h.

2.4 Landeverfahren

Im Vergleich zum privaten Modellflug haben die Landeeigenschaften eines UAV große Bedeutung. Hobbyflugmodelle werden in der Regel an Modellflugplätzen betrieben die befestigte Landepisten oder großzügig bemessene, ebene Wiesen-Landeflächen bieten. Auch verunglückte Landungen von Modellen mit und ohne Fahrwerk können so ohne Totalverlust enden. Überdies ist der wirtschaftliche Wert ihrer Nutzlast vergleichsweise gering.

Der Einsatz kommerziell genutzter UAVs erfolgt hingegen in der Regel unter nicht vorhersehbaren Landebedingungen, wodurch die Nutzung von Fahrwerken entfällt. Die Verwendung von Fallschirmen als primäres Landeverfahren erscheint angesichts der Kosten der Systeme dringend geboten. Derzeit bieten nur wenige Hersteller diese Option. Für ein konventionelles Landeverfahren sollte ein Landefeld von wenigstens 150×100 m zur Verfügung stehen und der Pilot gute Erfahrungen in der Steuerung von Modellflugzeugen besitzen.

2.5 Sicherheit

Die Sicherheit des Flugbetriebs eines UAV wird erfahrungsgemäss durch folgende Faktoren besonders gefährdet:

- Falsch eingeschätzte, verringerte Akkuleistung: Mit der Anzahl der Ladezyklen und falschen Ladeverfahren nimmt die Kapazität der Akkus ab
- Fertigungs- und konstruktive Mängel des UAV: Gängige Materialien sind Elapor (EPP), glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), Kevlar und Kohlefaser (CFK). Elapor hat Gewichtsvorteile gegenüber allen Alternativen; geschäumt weist es deutlich höhere Festigkeit auf als geschnitten, benötigt aber große Wandstärken für ausreichende Stabilität, wodurch der Luftwiderstand des UAV steigt. Die Formstabilität bei Einwirkung von Hitze und mechanischem Druck ist gering, wodurch sich aerodynamische Eigenschaften verändern können. CFK ist besonders leicht und stabil, hat aber stark abschirmende Wirkung auf Funksignale und verhält sich bei Schlägen sehr spröde. Kevlar bietet gegenüber GFK und CFK Vorteile in der Schlag- und Bruchfestigkeit.
- Überhitzung des Motors und elektronischer Komponenten: Eine wirksame Belüftung des

Motors und der Reglerelektronik ist auch bei Elektromotoren unter allen Umständen sicherzustellen. Der Laie unterschätzt erfahrungsgemäß das Ausmaß der elektrischen und thermischen Belastung, die durch die heute möglichen hohen elektrischen Entladeströme von Lithium-Polymerakkus entstehen.

- **Funkstörungen:** Gefährdungen können durch Transformatorstationen, Hochspannungsfelder oder die Nähe starker Funkanlagen entstehen. Die Beurteilung der Maßnahmen des Herstellers zur Reduzierung dieser Gefahren ist für Laien schwierig bis unmöglich. Aus den Zulassungsverfahren der bemannten Fliegerei bekannte standardisierte Verfahren und Messungen sind bei der Entwicklung von Mikrodrohnen derzeit noch nicht gebräuchlich.
- **Hard- und Softwarefehler:** Im Gegensatz zur bemannten Fliegerei sind die Steuerungssysteme von UAV in der Regel nicht redundant und selbstüberwachend ausgeführt, wodurch Hardwareausfälle und Softwarefehler unmittelbare Auswirkungen auf die Sicherheit des Betriebs haben.

Weitere beachtenswerte Faktoren sind:

- **Schutz aller elektronischen Komponenten** gegen Feuchtigkeit und Nässe
- **Schutz von Kamera und Objektiv** gegen harte Landungen und Bodenkontakt
- **Telemetrie:** Der Datenaustausch mit dem UAV per Funk sollte die Übertragung der Flugplanungs- und Flugzustandsdaten in Echtzeit erlauben. Im Fall des Verlustes sollte durch Funkkontakt oder GSM-Netz die Position des UAV ermittelbar sein
- **Coming Home:** Für den Fall des unerwarteten Auftauchens eines anderen Luftfahrzeuges oder anderer Gefahren wie Turbulenzen, Vogelschwärme, zu niedrige Flughöhe bei Annäherung an hohe Hindernisse (Bsp. Kirchturm, Hochspannungsleitungen) etc. ist eine Coming-Home Funktion ein wirksames Sicherheitsmerkmal. Damit kann die Mission abgebrochen werden und das UAV unter Eigensteuerung auf direktem Weg zum Startpunkt zurückkehren. Der Nutzen dieser Funktion wird bei großer Entfernung zum Piloten an der Grenze zur Sichtbarkeit des UAV deutlich.
- **Benutzerfreundlichkeit:** Die Einfachheit der Bedienung und rasche Einsatzfähigkeit hat nennenswerten Einfluss auf den Nutzwert des Systems, weil seitenlange Checklisten

die Anfälligkeit für Fehlbedienungen deutlich erhöhen.

- **Flugplanung:** Die Festlegung des zu befliegenden Gebiets mit Definition der Bildüberlappung, Flughöhe und -geschwindigkeit, Flugpfad, Start- und Landeplatz und Kamerasteuerung sollte sowohl bei der Flugplanung im heimischen Büro als auch vor Ort möglich sein. Eine texturierte Kartendarstellung mit ausreichend hoher Auflösung ist dazu Voraussetzung. Eine für Navigationszwecke im PKW ausreichende schematische Kartendarstellung reicht nicht aus, weil UAV in der Vermessung häufig abseits von Strassen, Gebäuden und anderen markanten Geländemerkmale eingesetzt werden. „Schwache“ Geländemerkmale wie Sträucher, Bäume, Geländekanten, Felsen etc. dienen der Flugplanung und sind in der Regel nur in texturierten Karten erkennbar. Angaben über die Geländehöhe sind aufgrund der geringen Flughöhe über Grund für die Flugplanung zwingend erforderlich.

3. Die Kamerasteuerung

Bei einem mit Mikrodrohnen verwendeten typischen Bildwinkel von 70° und einer sich aus 80 m Flughöhe ergebenden Bodenauflösung von 2 cm/Pixel, sowie einer Auflösung von 24 Megapixel pro Bild muss bei oben erwähnten Flugdaten die Kamera alle 1,1 sec bzw. 22 m ausgelöst werden, woraus sich die Produktion von 1159 Fotos/km² errechnet, die einer Datenmenge von rund 10 GB entspricht (siehe Beispiel Abbildung 4). Deren Verarbeitung erfordert eine über die Möglichkeiten konventioneller Desktoprechner deutlich hinausgehende Leistung, die in der Regel von Multiprozessorsystemen mit mehreren Hochleistungs-Grafikprozessoren und wenigstens 64 GB Hauptspeicher, sowie Festplatten ab 1 TB erreicht wird.

Zur Minimierung des Rechenaufwands werden – meistens durch IMU (Inertial Measurement Units) unterstützte, mit GPS ermittelte – Kameraauslösepositionen benötigt, die vom UAV bereitgestellt werden müssen. Das Fokussierungs- und Belichtungsverfahren der häufig verwendeten Consumer-Digitalkameras garantiert nicht, dass die Bildauslösung bei der erforderlichen, relativ kurzen Bildfolge tatsächlich durchgeführt wird. Die Kamerasteuerung muss daher in der Lage sein, durch Erfassung der Auslöserückmeldung die korrekte Zuordnung der Bilder zu den Positionsdaten sicherzustellen, weil bereits eine einzige Falschzuordnung die Positionsdaten des gesamten Fluges unbrauchbar macht.

Eine exakte Georeferenzierung wird zwar in der Regel durch vermessene Bodenkontrollpunkte gewährleistet, die Dauer der fotogrammetrischen Modellberechnung erhöht sich jedoch durch fehlende Kamerapositionsdaten mit dem Quadrat der Bildanzahl und damit durchaus um einen Faktor 10 bzw. viele Stunden, bei großen Flächen auch Tage.

Ein häufiger Einwand ist die Erwartung von Bewegungsunschärfe, die für die Präzision der Modellberechnung nachteilig wäre. Durch die niedrige Fluggeschwindigkeit der UAV von 50–100 km/h ist dieses Problem im Vergleich zum bemannten Bildflug reduziert und weitgehend vernachlässigbar. Moderne Digitalkameras können mit ISO 1600 ohne erkennbare Einbußen der Bildqualität (Körnigkeit) betrieben werden, woraus sich auch bei Bewölkung Belichtungszeiten von 1/1500 sec, bei wolkenlosem Himmel bis 1/4000 sec erzielen lassen. In den meisten Fällen muss auch nicht mit Offenblende belichtet werden.

Wesentlich größeren Einfluss auf die Bildqualität hat die Qualität des Objektivs, die insbesondere bei Kleinst-UAV bisweilen vernachlässigt wird. Optische Verzerrungen, Randabfall (Vignettierung) und Farbsäume (chromatische Aberrationen) wirken sich deutlich nachteilig auf das Matching der Bildpunkte sich überlappenden Bilder aus und können mit hochwertigen Objektiven minimiert werden. Die neuen Systemkameras mit Wechseloptiken bieten in dieser

Hinsicht gegenüber Kompaktkameras deutliche Qualitätsvorteile und auch größere Bildwinkel.

4. Gesetzeslage

Mit der im Mai 2013 veröffentlichten und per 1.1.2014 in Kraft tretenden Novellierung des österreichischen Luftfahrtgesetzes wird unter anderem die gewerbliche Nutzung von Modellfluggeräten erstmals geregelt. Mit dieser Novelle wurde erstmals der Begriff des unbemannten Luftfahrzeuges in die österreichische Luftfahrtgesetzgebung eingeführt. Neben einer Reihe von Detailregelungen ist insbesondere der für gewerbliche Mikrodrohnenbetreiber wesentliche §24f von Bedeutung (siehe dazu auch [1]). Darin heißt es:

Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1

§24f.(1) Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 sind nicht der Landesverteidigung dienende unbemannte Fahrzeuge, die selbständig im Fluge verwendet werden können und in direkter, ohne technische Hilfsmittel bestehender Sichtverbindung zum Piloten

1. auch in einem Umkreis von mehr als 500 m und/oder
2. gegen Entgelt oder gewerblich oder zu anderen als in §24c Abs. 1 Z 2 genannten Zwecken betrieben werden.

(2) Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 dürfen nur mit Bewilligung der Austro Control GmbH oder einer auf Grund einer Übertragung



Abb. 4: Screenshot eines fotogrammetrisch erstellten 3D-Modells mit Darstellung der Kamerapositionen

gemäß § 140b zuständige Behörde betrieben werden. Diese Bewilligung ist zu erteilen, wenn

1. vom Antragsteller glaubhaft gemacht werden kann, dass das unbemannte Luftfahrzeug der Klasse 1 den gemäß § 24h erlassenen Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen entspricht, sowie
2. durch den Betrieb des unbemannten Luftfahrzeuges der Klasse 1 das öffentliche Interesse der Sicherheit der Luftfahrt nicht gefährdet wird.

(3) Die Bewilligung gemäß Abs. 2 ist insoweit bedingt, befristet und mit Auflagen zu erteilen, als dies im Interesse der Sicherheit der Luftfahrt erforderlich ist. Die Bewilligung ist zu widerrufen, wenn einer der Bewilligungsvoraussetzungen nicht oder nicht mehr gegeben ist oder gegen Auflagen verstoßen worden ist. Bewilligungen oder Zertifizierungen, die von einem Mitgliedsstaat der europäischen Union oder einem durch zwischenstaatliche Vereinbarung gleichgestellten Staat ausgestellt worden sind, sind von der Austro Control GmbH oder der auf Grund einer Übertragung gemäß § 140b zuständigen Behörde anzuerkennen, soweit in dem jeweiligen Staat zumindest die gleichen Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen gestellt werden.

(4) Die Bestimmungen des § 13 und § 17 sowie die für Luftfahrzeuge geltenden Bestimmungen über die Haftung und Versicherung gemäß den §§ 146 bis 168 sind anzuwenden. Weiters ist § 136 anzuwenden, wobei das unbemannte Luftfahrzeug der Klasse 1 als Zivilluftfahrzeug im Sinne dieser Bestimmung gilt.

(5) Etwaige vom Bundesminister für Verkehr, Innovation und Technologie in einer Verordnung gemäß § 124 erlassene Bestimmungen über den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1 bleiben unberührt.

(6) Der Betrieb eines unbemannten Luftfahrzeuges der Klasse 1 innerhalb von Sicherheitszonen bei Militärflugplätzen ist nur mit Bewilligung des Bundesministers für Landesverteidigung und Sport zulässig. Diese Bewilligung ist insoweit bedingt, befristet oder mit Auflagen zu erteilen, als dies im Interesse der Sicherheit der Luftfahrt bzw. im Interesse der Landesverteidigung erforderlich ist. Die Bewilligung ist zu widerrufen, wenn einer der Bewilligungsvoraussetzungen nicht oder nicht mehr gegeben ist oder gegen Auflagen verstoßen worden ist.

UAV dürfen damit zukünftig auch in mehr als 500m Entfernung vom Piloten gewerblich betrieben werden, sofern eine optische und nicht durch technische Unterstützung bewirkte Sichtverbindung besteht. Bei den bisher marktüblichen Spannweiten von UAV ist davon auszugehen, dass eine Entfernung von 500m zum Piloten für die manuelle Steuerbarkeit des Fluggerätes eine kritische Grenze darstellt.

Für Anwendungen von UAV, die größere Distanzen zum Piloten erfordern, wurde mit dem § 24g eine Klasse 2 unbemannter Luftfahrzeuge geschaffen. Dieser lautet:

§ 24g. (1) Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 2 sind nicht der Landesverteidigung dienende unbemannte Fahrzeuge, die selbständig im Fluge verwendet werden können und ohne Sichtverbindung betrieben werden.

(2) Für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 2 sind sämtliche für Zivilluftfahrzeuge und deren Betrieb geltende Bestimmungen dieses Bundesgesetzes oder von auf Grund dieses Bundesgesetzes erlassenen Verordnungen anzuwenden. Der Bundesminister für Verkehr, Innovation und Technologie kann mit Verordnung Sonderbestimmungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 2 festlegen, wenn dadurch das öffentliche Interesse der Sicherheit der Luftfahrt nicht gefährdet wird.

Die Zulassungsanforderungen an diese UAV sind damit jenen der Großfliegerei gleichgestellt. Angesichts der bekannt aufwändigen Zulassungsverfahren kann man vermuten, dass die Erfüllung dieser Bedingungen für die Hersteller von Mikrodrohnen außerhalb ihrer wirtschaftlichen und technischen Möglichkeiten liegen wird und sich diese Geräteklasse nur für die Zulassung von Drohnen mit Abfluggewichten mehrerer 100 bis 1000 kg eignet.

Dem Betreiber einer Mikrodrohne sollte bewusst sein, dass er sich nicht auf die Fähigkeit des UAV verlassen sollte, vom Start bis zur Landung vollständig autonom zu fliegen. Unabhängig von der Gesetzeslage ist ausreichende Erfahrung mit der Steuerung von Modellflugzeugen eine dringend empfohlene Voraussetzung auch für den Betrieb von UAV.

Zusammenfassung

Autonom fliegende Mikrodrohnen stellen ein geeignetes Mittel zur fotogrammetrischen Geländevermessung für Flächen bis 10km² dar. Durch die Zusammenführung unterschiedlicher Technologien ist ihr Betrieb jedoch eine Her-

ausforderung für Betreiber, die durch intensive Beschäftigung mit der Materie auch für Laien als zunehmend bewältigbar erscheint. Der Markt für UAV ist sehr dynamisch und wird durch laufend verbesserte Systeme als Alternative zur terrestrischen Vermessung immer attraktiver. Der Gesetzgeber hat in Österreich bereits die Voraussetzungen für den legalen Betrieb von UAV im gewerblichen Einsatz geschaffen.

Referenzen

- [1] Republik Österreich, Änderung des Luftfahrtgesetzes, http://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXIV//I_02299/fname_301325.pdf

Anschrift des Autors

Mag. Dr. Oliver Gebauer, Geschäftsführer GeoSpy Aerial Imaging & Mapping GmbH
Thurnhartingerstr. 13, 4061 Pasching.
E-Mail: oliver.gebauer@geospy.at

vgi



GeoSpy.at
Aerial Imaging & Mapping

**Luftbildvermessung
mit Mikrodrohnen**

- 3D Modelle
- Referenzierte Orthofotos
- Geländemodelle
- Bruchkanten
- Volumensberechnungen
in 2cm Bodenauflösung

office@geospy.at
Tel. 0676/3289463

Schüttvolumenbestimmung einer Zwischenlagerdeponie mit twinGEO-UAVs. Ein Praxisbericht, von der Datengewinnung bis zur Auswertung und Dokumentation



Gerhard Neuner, Christian Neuner, Ampass; Hansjörg Ragg, Innsbruck; Alexander Riha, Ampass

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Elektrisch betriebene Mini UAV's (Unmanned Aerial Vehicles) sind kostengünstige und leistungsstarke „Messinstrumente“ für die Gewinnung von hochauflösenden GeoDaten. Das System twinGEO bietet eine Komplettlösung für die Erfassung und Auswertung im Bereich der Nahbereichsphotogrammetrie. Am Beispiel einer Zwischenlagerdeponie in Ampass, Tirol wird der gesamte Arbeitsablauf, von der Projektvorbereitung, Flugplanung, Befliegung, photogrammetrischen Auswertung, Volumsberechnungen und Lageplanerstellung aufgezeigt und vom praktischen Standpunkt beurteilt.

Schlüsselwörter: UAV-Komplettsystem, Photogrammetrie, Volumensbestimmung, Dokumentation, Monitoring

Abstract

UAV's (Unmanned Aerial Vehicles) are cost effective survey-tools for the acquisition of high resolution geospatial data. The twinGEO solution provides excellent tools for data acquisition and -exploitation for the whole workflow in close range photogrammetry. For a disposal site in Ampass, Tyrol the workflow of applying this system in collecting aerial images, calculating terrain models, mass calculation and documentation are illustrated and assessed based on practical experience.

Keywords: UAV solution, photogrammetry, mass calculation, documentation, monitoring

1. Einleitung

Für eine Zwischenlagerdeponie im Tiroler Unterland wird im vorliegenden Beitrag eine, mit einem elektrisch angetriebenen mini UAV System [1] durchgeführte, Bestandsaufnahme aufgezeigt. Ziel ist die Bestimmung von abgelagerten Schuttmassen und deren Typisierung. Die quantifizierten Ablagerungs- bzw. Schüttvolumina werden seitens des Betreibers zum Nachweis für Abrechnungen, sowie zu Dokumentationszwecken benötigt. Für die Folgemonate bzw. -jahre sind Wiederholungsflüge bzw. Auswertungen angestrebt, um eine stetige Inventur sowie ein Dokumentations-Monitoring mit UAVs zu etablieren.

Der Artikel illustriert in einem „Bericht aus der Praxis“ den Arbeitsablauf für die genannte Aufgabenstellung und stellt die notwendigen und verwendeten Komponenten rund um den eigentlichen UAV Flug dar. Eine Besonderheit ist die geringe Deponiefläche von 3 ha, sowie die –

für den UAV Flug herausfordernde – Umgebung mit Relieffanstiegen und hohem Baumbestand. Im Beitrag werden Arbeitsabläufe einer UAV Kampagne, vgl. Remondino et al. [2], im praktischen Einsatz illustriert. Diese Arbeit setzt die wissenschaftlichen Untersuchungen [3, 4] fort, in welchen großflächigere Abbaugelände von UAVs mit Benzin- bzw. Gasantrieb aus aufgenommen wurden.

Des Weiteren werden Flug und Ergebnisse in den Kontext der Wirtschaftlichkeit und den Zusatznutzen für Deponiebetreiber gestellt und analysiert.

2. Flugplanung, Datenauswertung und -aufbereitung

Das von Praktikern entwickelte Komplettlösungssystem twinGEO der Fa. Twins.nrn OG bietet die Möglichkeit eines durchgängigen Arbeitsflusses, von der Planung über Befliegung, Georeferenzierung und Auswertung von Flugkampagnen. Ein Kom-

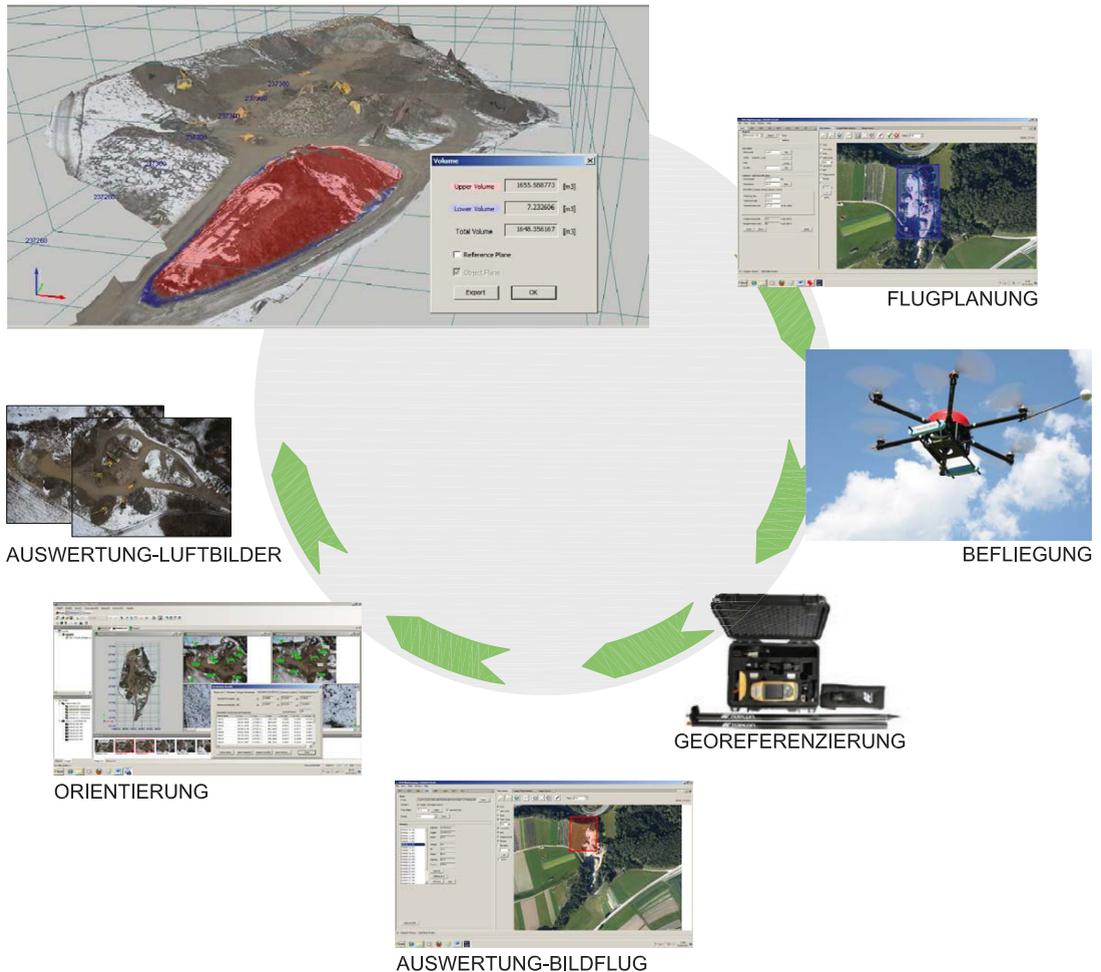


Abb. 1: Systemübersicht „twinGEO“

plettsystem (Abb. 1) erleichtert die praktische Handhabung und gewährleistet den wirtschaftlichen Einsatz des UAVs als „Messinstrument“. Die Durchgängigkeit wird einerseits durch die einfache Handhabung und Transportmöglichkeit des Geräts selbst gewährleistet und andererseits durch das Zusammenspiel der notwendigen Komponenten für die Vorbereitung bis zur Auswertung des Flugs. Der UAV Flug, welcher in der Regel vollautonom per Wegpunktsteuerung durchgeführt wird, rückt als Datenerhebungskomponente in den Hintergrund. Die photogrammetrische Auswertung wird durch zuverlässige (stabile) und automatisierte Methoden erleichtert. Zu nennen sind hier SIFT [5] für das automatische Auffinden korrespondierender Punkte, RANSAC [6] als Methode zur Parameterschätzung bei vielen groben Fehlern, z.B. bei der automatischen

relativen Orientierung, und letztendlich – Dense Image Matching zur Ableitung von Oberflächenmodellen [7]. Durch die Zuverlässigkeit sind diese Methoden auch für den Praxiseinsatz und damit auch für den privatwirtschaftlichen Bereich nutzbar.

Die folgenden Komponenten wurden für die UAV Kampagne eingesetzt und werden anhand des praktischen Einsatzes näher beschrieben:

- twinHEXMultirotor-UAV mit twinSWIVEL Kameraplattform, Fa. Twins.nrn OG
- Systemkamera RICOH GXR A12 (18.3mm Brennweite, 12.3MegaPixel, 5.5µm Pixelgröße, Weitwinkel), Fa. Ricoh
- GRIDFlightmanager, Fa. GRID-IT GmbH
- GPS-System, GSR-1, Fa. Topcon
- IMAGE MASTER PHOTO, Fa. Topcon

3. Durchführung in der Praxis – Zwischenlagerdeponie Ampass

Die Zwischenlagerdeponie (Abb. 2) in Ampass, Tirol hat ein Ausmaß von ca. $250 \times 120 \text{ m}^2$, wobei das aufzunehmende und auszuwertende Gebiet ca. 1.9ha beträgt. Auf dieser Fläche werden verschiedene Materialien wie bspw. Asphaltbruch, Betonabbruch und Humus zwischengelagert. Als Ergebnis der Vermessung werden vonseiten des Betreibers die Volumina der verschiedenen Teilbereiche (Mieten) dieses Gebietes erwartet. Die geforderte Genauigkeit in der Abgrenzung der Bereiche ist „ $< 10 \text{ cm}$ “.

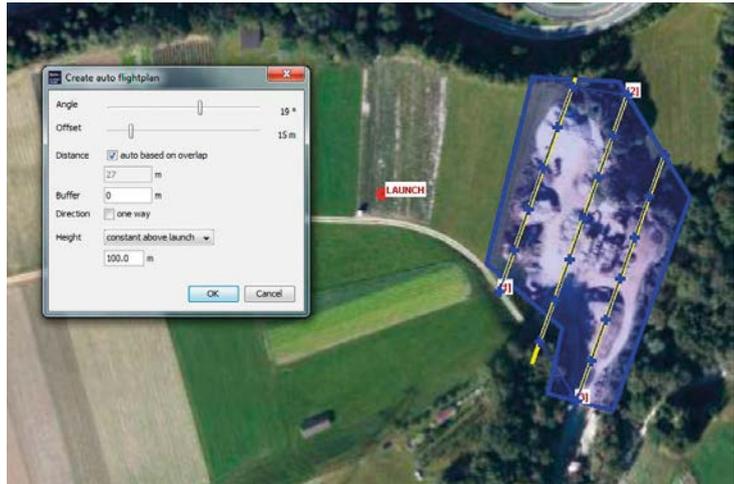


Abb. 2: Blau markiert die Auslösepositionen der Kamera entlang des Flugpfades (Gelb), erstellt auf Basis des Gebietspolygons (Blau) und den photogrammetrischen Vorgaben

a) Flugplanung und -management

Bereits vor der Befliegung erfolgte die Beurteilung des Gebiets hinsichtlich verschiedener flugsicherheitsrelevanter Kriterien. Hierzu zählen vor allem

- Topographie,
- Windverhältnisse,
- vorhandene Start- und Landeplätze (auch Notlandplätze) und
- Bewilligungen (z.B. in Flugsicherungszonen).

Das Interessensgebiet soll mit einer Bodenauflösung von 5cm aufgenommen werden, entsprechend der geforderten Genauigkeit in der Abgrenzung der Teilbereiche und der erforderlichen Auflösung für die Erkennbarkeit (Interpretation des Bildinhaltes). Aus der Erfahrung vergangener Projekte wird eine etwas höhere Bodenauflösung von 3–4cm angestrebt. Für die photogrammetrische Auswertung soll eine Längsüberdeckung von 80% und eine Querüberdeckung von 60% realisiert werden um auf Basis dieser hohen Überlappung eine zuverlässige und automatische Prozessierung zu garantieren. Mit Hilfe eines georeferenzierten Übersichts-Orthobildes kann das Interessensgebiet mittels eines frei definierbaren Polygons eingegrenzt werden. Auf Basis der Kameradaten, Längs- und Querüberdeckung bzw. Flughöhe oder Bodenauflösung werden die Parameter für den Bildflug automatisch berechnet (Abb. 2). Für das vorliegende Gebiet wurden 3 Streifen mit je 7

Bildern in einer Flughöhe von 100m über Grund bestimmt.

Das gesamte Bildflugmanagement für den photogrammetrischen Flug wird durch das Softwarepaket Flightmanager, Fa. Grid-IT realisiert. Das Programm ermöglicht Flugplanung (Wegpunktdefinition), Überwachung (inkl. Kollisionskontrolle), Datenaufbereitung (Kamerapositionen, Passpunktdefinition) und darüber hinaus Export zu verschiedensten Photogrammetriepaketen wie LPS, MICMAC und INPHO. Alle Bildflugdaten und -parameter können gespeichert und bei Bedarf für periodische Bildflüge, z.B. im Monitoring, wiederverwendet werden.

Zur Berücksichtigung aktueller meteorologischen Bedingungen am Flugtag empfiehlt sich die Vorbereitung von Alternativflugplänen.

b) twinHEX Multirotor-UAV mit Swivel-Kameragestell und Ricoh GXR Kamera

Kernstück bildet das Multirotorsystem vom Typ Hexacopter (twinHEX, siehe Abb. 3) mit sechs Propellern, einer Traglast von maximal 2.5 kg und einer Flugzeit von bis zu 40 Minuten. Am UAV verbaute Sensoren und Software erlauben einen stabilen Schwebeflug, das GNSS System einen autonomen Anflug von sogenannten Wegpunktevents, welche vom Autopiloten abgearbeitet werden und so einen Bildflug erst ermöglicht. Zu beachten sind hierbei die in den Ländern unterschiedlich geltenden Rechtsvorschriften hinsichtlich Technikstandards (Funkfrequenzen), Flughöhe und -entfernung, sowie diverse Auflagen.

Während des Bildfluges werden die wichtigsten Parameter wie Position, Flughöhe, Kameradrehungen, Motorströme und -temperaturen im 1 Hz Takt im UAV auf einer SD-Karte geloggt und parallel dazu per Funk an die Bodenstation übertragen und visualisiert. Der Autopilot folgt den vordefinierten Kamerapositionen der Flugplanung (Wegpunkte) und löst an diesen durch die vorprogrammierten Events die Kamera aus. Nach Abarbeiten des letzten Wegpunkts fliegt das UAV zur vorgegebenen Heimposition zurück und wird manuell gelandet.

Ausgestattet mit einer schwenkbaren Kameraplattform (twinSWIVEL) aus Kohlefaserverbund-Werkstoff können Horizontal- bis Vertikalnahmen in einem Flug durchgeführt werden. Für die Aufgabenstellung der Volumensbestimmung wurde die Systemkamera Ricoh GXR mit einem Weitwinkelobjektiv verwendet. Diese Kamera besitzt den Vorteil, dass Sensor (Chip) und Objektiv eine Einheit bilden, wodurch bereits mechanisch eine höhere Stabilität der inneren Orientierung gewährleistet werden kann. Die Kalibrierung für die spätere photogrammetrische Auswertung erfolgte mittels Testfeldkalibrierung im Labor.



Abb. 3: TwinHEX im Flug

c) GNSS Passpunktbestimmung

Für die Orientierung bzw. Georeferenzierung wurden natürliche und künstlich vermarkte Punkte terrestrisch bestimmt. Für die künstlich zu vermarkenden Punkte haben sich aufgrund der Ab-



Abb. 4: Luftbildausschnitt mit künstlichen Passpunkten

grenzbarkeit zur Umgebungsfarbe orange Teller mit einem Durchmesser von ca. 25 cm bewährt (Abb. 4). Die Messung selbst erfolgte mit einem GPS-Empfänger GSR-1, Fa. Topcon, unter Verwendung des EPOSA RTK-Dienstes welcher die direkte Messung im Landeskoordinatensystem ermöglicht. Für die Deponie wurden 11 Vollpasspunkte vermarkt und mit einer Genauigkeit von besser als 5 cm (einfache Standardabweichung) eingemessen. Diese Überbestimmung diente in diesem Fall zur Kontrolle der Kamerakalibrierung bei niedriger Umgebungstemperatur (um den Gefrierpunkt). Üblicherweise kann bei bekannter Kamerakalibrierung mit ca. 6 Passpunkten für diese Anforderung eine ausreichende Genauigkeiten (<10 cm) erzielt werden.

d) Photogrammetrie und abgeleitete Produkte

Anhand des Zeitstempels der Kamera und der im UAV-Logfile aufgezeichneten Auslösepunkte der Kamera, kann für jedes Bild die äußere Orientierung genähert bestimmt werden (direkte Georeferenzierung). Der Bündelblockausgleich (Orientierung der Aufnahmen einschließlich Einpassung des gesamten Bildverbands in das Landeskoordinatensystem) wurde mit dem Photogrammetriepaket IMAGE MASTER PHOTO, Fa. Topcon, durchgeführt. Der RMS Fehler des Bündelblockausgleichs ergibt sich zu <math><0.4</math> Pixel und dementsprechend eine Genauigkeit der Verknüpfungspunkte von $dY=0.008\text{ m}$, $dX=0.006\text{ m}$ und $dH=0.003\text{ m}$. Je nach An-

forderung und gewünschtem Ergebnis können klassische Stereoauswertung oder durch Bild-matching automatisch Oberflächenmodelle und Schichtenlinien erzeugt werden. In Folge lässt sich auch ein Orthophoto berechnen (Abb. 5).

Für die Flächen- bzw. Volumensberechnung stehen graphische Werkzeuge mit Schnittstellen zu gängigen Softwarepaketen wie Autocad der Firma Autodesk zur Verfügung. Im vorliegenden Anwendungsfall wurden ein Oberflächenmodell mit einer Rasterweite von 20cm und Höhen-schichtlinien im Intervall von 0.50m erstellt.

e) Auswertung und Volumensbestimmung

Eine Volumenberechnung kann entweder als Differenz zweier Höhenmodelle bestimmt werden oder die Berechnung kann auf Basis einer zu definierenden Referenzebene ausgeführt werden. Für die Zwischenlagerdeponie Ampass wurden auf diese Weise für 10 Differenzmodelle (Schüttung zu Urgelände in 10 Teilbereichen) der Unterschied in Kubikmetern bestimmt, ins CAD-System AUTOCAD exportiert und dort zu einem Volumina-Lageplan (Abb. 6) weiterverarbeitet.

Die Genauigkeit der berechneten Volumina hängt stark vom Detaillierungsgrad des rekonstruierten Urgeländes (im vorliegenden Anwendungsfall eine Referenzebene, bestimmt durch 3 Punkte) und der UAV-Aufnahme ab. Die ermittelten Schüttvolumina wurden vom Betreiber auf Basis von Aufzeichnungen verifiziert und für die Anforderungen als Dokumentationsinstrument für „mehr als ausreichend genau“ benannt.

4. Fazit

Die Komplettlösung twinGEO hat sich als schnell verfügbare und kostengünstige Alternative zu regulären Flugzeug- oder Helikopterbefliegungen etabliert, sofern das relevante Gebiet nicht viel größer als einige Hektar ist.

Das System bietet sich auch als Alternative zu herkömmlichen terrestrischen Methoden an, die Anschaffungskosten sind in etwa gleich. Das Potential des UAV liegt aber einerseits in der Fülle der gewonnenen Geodaten (Orthophoto, dichtes Oberflächenmodell) und andererseits in der Zeitersparnis, die vor allem bei Wiederholungsflügen sehr markant ist. Der in Kapitel 3 beschriebene Ablauf (inklusive Mannstunden, exklusive Rechenaufwand) ist ca. 3 Stunden, wobei hier die Befliegung selbst mit ca. einer Stunde (inkl. Rüstzeiten) bereits berücksichtigt



Abb. 5: Ausschnitt des aus 21 Einzelbildern erzeugten Orthophotos mit 5 cm Bodenauflösung

ist. Ein Monitoringansatz setzt am Erstflug an und reduziert den Gesamtaufwand für Folgeflüge auf ca. 1h.

Der Zusatznutzen der Dokumentation auf Basis eines Orthophotos ist wohl höher zu beziffern als die Ermittlung der Schüttvolumen per se. Ein Nachweis und die Typisierung (visuell interpretiert) der zwischengelagerten Massen unterstützen den Betreiber bei Abrechnungs-unstimmigkeiten und den formellen Abläufen.

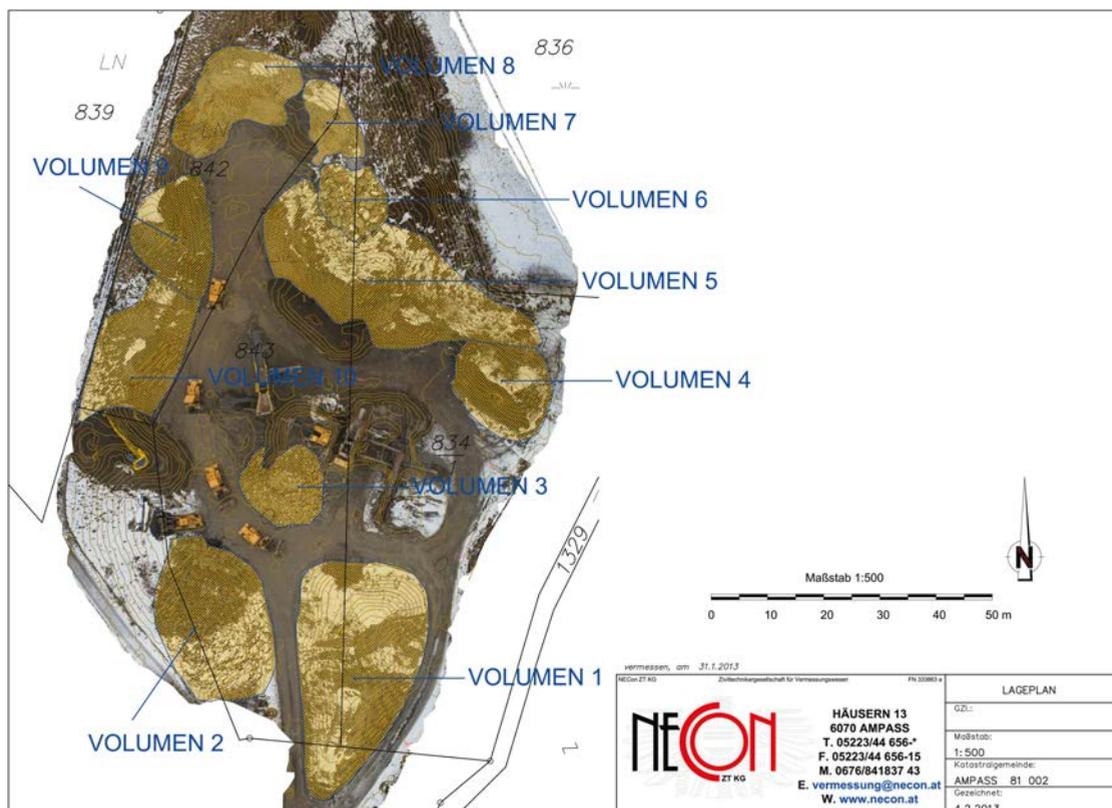


Abb. 6: Lageplan mit Orthophoto

Referenzen

- [1] van Blyenburgh, Peter 1999: UAVs – Current Situation and Considerations for the Way Forward – Euro Uvs – European Unmanned Vehicle Systems Association – <http://ftp.rta.nato.int/public//PubFulltext/RTO/EN/RTO-EN-009///EN-009-01.pdf>
- [2] Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011: UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling — Current status and future perspectives. ISPRS Archives, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland
- [3] Neitzel, F., Klonowski, J., Siebert, S., Dasbach, J. Ph., 2011: Mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System am Beispiel der Deponievermessung –
- [4] Eisenbeiss, H. & Sauerbier, M. (2011): Investigations of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. In: The Photogrammetric Record 26, 400-421.
- [5] Lowe, D. 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Features – In: International Journal Computer Vision 2004, 60, 91–110
- [6] Fischler, M. A. und Bolles, C. 1981. *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography*, Communication of the ACM (Association for Computing Machinery), 24(6), pp381-395
- [7] Haala, N. (2011): Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching – In: Fritsch, D. (2011): Photogrammetrische Woche 2011, Stuttgart, Deutschland.
- [8] Neuner, G, Neuner, Ch. und Riha, A. 2012: Untersuchungen zur Geodatenerfassung und Auswertung an Anlagen der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) mit einem Unmanned Aerial Vehicle (UAV) und einer kalibrierten Systemkamera (nicht publiziert).

Anschrift der Autoren

DI Gerhard Neuner, Häusern 13, 6070 Ampass.
E-Mail: g.neuner@twins.co.at

DI Christian Neuner, Häusern 15, 6070 Ampass.
E-Mail: c.neuner@twins.co.at

Ing. Hansjörg Ragg, MSc, Universität Innsbruck,
6020 Innsbruck
E-Mail: Hansjoerg.Ragg@uibk.ac.at

DI Alexander Riha, MSc, Häusern 13, 6070 Ampass.
E-Mail: a.riha@necon.at

Leica Nova MS50

Die richtige Entscheidung

Nova



Leica Nova MS50 – Die weltweit erste MultiStation

Sie haben nur einen einzigen Moment, um die richtige Entscheidung zu treffen. In diesem Moment zählen höchste Leistung und absolute Zuverlässigkeit. Die neue Leica Nova MS50 MultiStation kombiniert GNSS-Positionierung, Tachymetrie, Photogrammetrie und 3D-Laserscanning. Und ist damit die einzigartige Lösung, die Ihren kompletten Workflow abdeckt: Vom Erfassen und Visualisieren bis zum Entscheiden und Präsentieren der Ergebnisse. **Leica Nova: Die neue Dimension in der Messtechnologie.**

www.leica-geosystems.at/nova

 Leica Geosystems Austria GmbH
Gudrunstraße 179, 1100 Wien
www.leica-geosystems.at

- when it has to be **right**

Leica
Geosystems